

# Hodnocení řezivosti pilových nástrojů

Michal Jurásek

---

Bakalářská práce  
2016



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství  
akademický rok: 2015/2016

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Michal Jurásek**  
Osobní číslo: **T13076**  
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Technologická zařízení**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Hodnocení řezivosti pilových nástrojů**

Zásady pro vypracování:

1. Teoretická studie na dané téma
2. Příprava experimentu a dělení materiálů různými pilovými nástroji
3. Hodnocení řezivosti pilových pásů a kotoučů

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

**dle doporučení vedoucího práce**

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Ondřej Bílek, Ph.D.**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

**8. ledna 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce:

**20. května 2016**

Ve Zlíně dne 3. února 2016



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.  
*děkan*



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

Příjmení a jméno: Jurásek Michal

Obor: Technologická zařízení

## 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 užít 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 13.5.2016

.....  


<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 užit 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 výdělku jim dosaženého 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 přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Při řezání pilovými kotouči o různém počtu zubů, nebo pásy s jiným typem zubů vzniknou taky různé kvality řezů. Při špatném zvolení nástroje na určitý typ kompozitu můžou vzniknout v místě řezu nežádoucí vlivy, které mají za následek například delaminaci. To-  
mu lze částečně zamezit nalezením ideální varianty nástroje pro řezání určitého typu kom-  
pozitu.

Klíčová slova: kotoučová pila, pásová pila, kompozit, drsnost, pilový kotouč, házivost, delaminace

## **ABSTRACT**

When cutting saw blades having different numbers of teeth or belts with a different type of teeth occur too different quality cuts. When selecting the wrong instrument on a certain type of composite can occur at the incision site adverse effects, which result in such as delamination. This can be partially avoided by finding the ideal cutting tool variants of a particular type of composite.

Keywords: circular saw, band saw, composites, roughness, saw blade, runout, delamination

Mé poděkování patří vedoucímu bakalářské práce Ing. Ondřeji Bílkovi Ph.D. za užitečné rady, ochotu a pomoc při veškerých konzultacích při psaní této práce.

Motto:

„Za svůj dlouhý život jsem pochopil jedno - ve srovnání s objektivní realitou je naše věda dětinská a prostá, ale přece je tím nejlepším co vůbec máme.“

Albert Einstein

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

# OBSAH

<b>ÚVOD .....</b>	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>11</b>
<b>1 DĚLENÍ MATERIÁLU ŘEZÁNÍM .....</b>	<b>12</b>
1.1 ŘEZÁNÍ MATERIÁLU PILOVÝM PÁSEM .....	12
1.1.1 Bimetalické pilové pásy .....	12
1.1.1.1 Geometrie zubů pilových pásů .....	13
1.1.1.2 Tvary zubů pilových pásů .....	13
1.1.1.3 Rozteč zubů .....	15
1.1.1.4 Typy rozvodů zubů .....	15
1.2 ŘEZÁNÍ MATERIÁLU PILOVÝM LISTEM .....	16
1.2.1 Nástroje .....	16
1.3 ŘEZÁNÍ MATERIÁLU PILOVÝM KOTOUČEM .....	20
<b>2 CHARAKTERISTIKA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ .....</b>	<b>23</b>
2.1 VÝZTUŽE .....	24
2.1.1 Vlákenné výztuže .....	26
2.1.2 Částicové výztuže .....	29
2.2 ZÁKLADNÍ TYPY VÝROBY KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ .....	30
2.2.1 Stříkání .....	31
2.2.2 Ruční kladení .....	33
2.2.3 Lisování .....	33
2.2.4 Navíjení .....	34
2.2.5 Odstředivé lití .....	35
2.2.6 Tažení .....	35
<b>3 METODY DĚLENÍ MATERIÁLU .....</b>	<b>37</b>
<b>4 OBRÁBĚNÍ KOMPOZITŮ .....</b>	<b>38</b>
4.1 PROBLÉMY PŘI OBRÁBĚNÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ .....	38
4.2 DELAMINACE .....	39
4.3 STROJE PRO ŘEZÁNÍ PILOVÝMI PÁSY .....	41
4.3.1 Pásová pila .....	41
<b>5 SHRNUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI A CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI PRÁCE ....</b>	<b>42</b>
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>43</b>
<b>6 CHARAKTERISTIKA PILOVÝCH STROJŮ .....</b>	<b>44</b>
6.1 PÁSOVÁ PILA NA KOV .....	44
6.2 STOLNÍ KOTOUČOVÁ PILA .....	45
<b>7 CHARAKTERISTIKA MĚŘICÍCH ZAŘÍZENÍ .....</b>	<b>46</b>
7.1 DRSNOMĚR .....	46
7.2 ÚCHYLKOMĚR .....	47
7.3 POSUVNÉ MĚŘIDLO .....	47
7.4 UNIVERZÁLNÍ ZKUŠEBNÍ STROJ .....	48
<b>8 TYPY PILOVÝCH KOTOUČŮ A PÁSŮ .....</b>	<b>49</b>



8.1	PILOVÉ KOTOUČE .....	49
8.2	PILOVÉ PÁSY .....	50
<b>9</b>	<b>POUŽITÉ MATERIÁLY .....</b>	<b>52</b>
<b>10</b>	<b>ŘEZÁNÍ A VYHODNOCOVÁNÍ VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>56</b>
<b>11</b>	<b>VÝSLEDKY EXPERIMENTU .....</b>	<b>61</b>
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>66</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>67</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>70</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>71</b>
	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>73</b>

## ÚVOD

Při postupném rozvoji technologií, nároků a požadavků doby, bylo nezbytné, aby se přicházelo s novými nápady a vylepšeními. Lze tak říci, že každá nová látka a materiál, který člověk dovedl využívat, představoval novou kvalitu v jeho činnosti a životě. Lidstvo tak prošlo dobou kamennou, dobou bronzovou, dobou železnou a směřuje na nový stupeň spojený s tím, že budou vytvořeny nové, syntetické materiály, které v přírodě nenajdeme. Tyto materiály jsou složeny z řady komponentů a mají široký úhel využití. Musí se vyznačovat nejen odolností a pevností, ale také některými důležitými fyzikálními vlastnostmi, dále je nutné též vyzdvihnout estetické vlastnosti povrchu materiálu a jeho náročností na energii při výrobě. Materiál by měl mít předem určené vlastnosti podle použití a výroba by měla co nejčastěji používat domácí suroviny. S tím souvisí, že tyto materiály budou postupem času vypracovány podle charakteru výroby a možnostech přírodních zdrojů v hospodářství. V poslední době je nutno zohlednit ekologické dopady na životní prostředí. Většinu odpadů z průmyslu lze zařadit mezi nebezpečné odpady. Můžou to být odpady, které ohrožují přírodní prostředí, nebo například takové, které vznikají ve výrobě. Například z nesprávně rozvržených dílů, zmetků, odřezků a jiných částí odpadů. Ty pak vznikají v takovém množství, že je nelze zanedbávat. Některé polymerní materiály lze regenerovat, nebo recyklovat, vznikají tak druhotné suroviny, které dále využít například na výrobu palet, částí plotů, nebo kanalizačních trubek.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 DĚLENÍ MATERIÁLU ŘEZÁNÍM

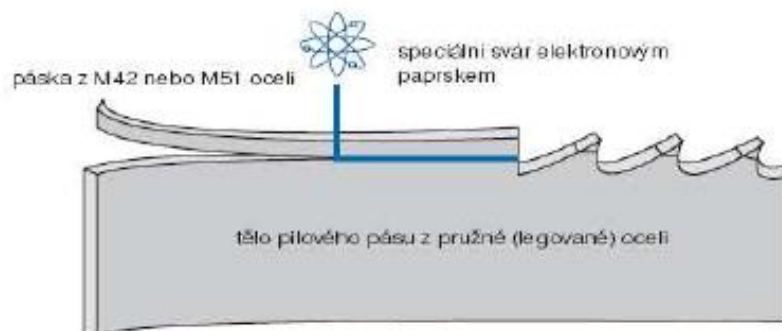
Dělení materiálu řezáním je nejčastějším způsobem dělení. Řadí se mezi konvenční způsoby dělení materiálu. K dělení materiálu se používají nástroje s definovanou geometrií. Jedná se od nejpoužívanější způsob dělení tyčového materiálu. Používají se rámové, kotoučové a pásové pily [14].

## 1.1 Řezání materiálu pilovým pásem

Pro ideální výkon bimetalových pásů je nutné zvolit pro řezaný průřez správné ozubení. Lze zvolit mezi kombinovaným zubem s nestejnou roztečí, nebo standartním zubem s konstantní roztečí. Kombinované zuby jsou používány pro snížení vibrací při řezání problematických kusů.

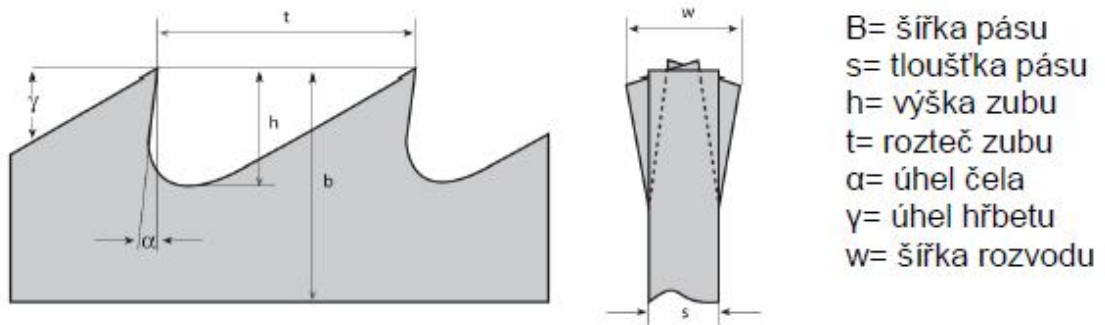
### 1.1.1 Bimetalické pilové pásy

Tělo bimetalového pásu je vyrobeno z ušlechtilé oceli speciálního složení. Je velmi pružné a má tvrdost cca 50 HRC. Je ideálním základem pro dlouhou životnost a vynikající výkon pásu. Špičky zubů jsou z ušlechtilé oceli HSS a mají tvrdost 67 HRC nebo 69 HRC. Oba materiály jsou neoddělitelně svařeny elektronovým paprskem [17].



Obr. 1 Bimetalový pilový pás [17].

### 1.1.1.1 Geometrie zubů pilových pásů



Obr. 2 Geometrie zubů pilových pásů [17].

### 1.1.1.2 Tvary zubů pilových pásů

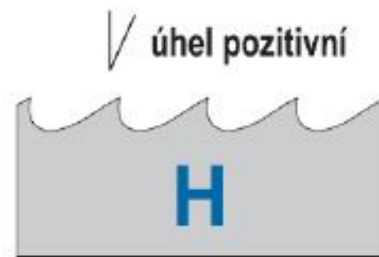
S nízkými vibracemi a efektivně řeže pilový pás se správným tvarem zubů. Rozlišují se čtyři základní typy zubů:

- Zuby standardní:
  - Úhel čela je nulový.
  - Mají 18 zubů / palec.
  - Vhodné pro materiály s krátkou třískou.
  - Tenkostěnné materiály.



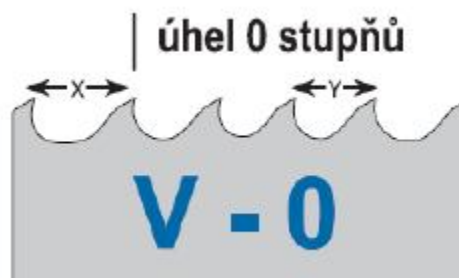
Obr. 3 Zuby standart [17].

- Zuby Hook:
  - Úhel čela je pozitivní.
  - Mají 6 zubů / palec.
  - Vhodné pro materiály s dlouhou třískou.
  - Houževnaté materiály.
  - Velké průměry.



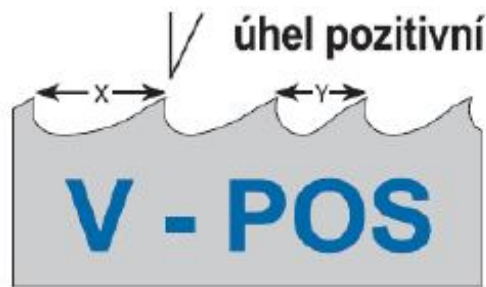
Obr. 4 Zuby Hook [17].

- Variabilní zuby:
  - Úhel čela  $0^\circ$ .
  - Variabilní rozteč zubů 3/4 do 10/14.
  - Vhodné pro řezání bez vibrace a profily.



Obr. 5 Variabilní zuby [17].

- Variabilní zuby s kladným úhlem čela:
  - Úhel čela je pozitivní.
  - Variabilní rozteč zubů od 0,75/ 1,25 do 4/6.
  - Vhodné pro řezání bez vibrací.
  - Plný materiál.



Obr. 6 Variabilní zuby s kladným úhlem čela [17].

### 1.1.1.3 Rozteč zubů

V praxi se rozlišují dvě základní rozteče zubů:

#### 1. Konstantní rozteč:

- Zuby jsou uspořádány v jednotném odstupu. Ozubení pilového pásu označuje počet zubů na palec (2,54 mm).

#### 2. Variabilní rozteč

- V rámci skupiny zubů se mění odstupy zubů. Variabilní ozubení pilového pásu se označuje podle největší a nejmenší rozteče zubů.



Obr. 7 Základní rozteče zubů [17].

### 1.1.1.4 Typy rozvodů zubů

Kromě tvaru a rozteče zubů je pro výkon pilového pásu rozhodující i přesný rozvod. Typ a šířka rozvodu jsou odpovídající typy řezu. Správa vůle pásu je dosažena specifickým rozvodem pro daný řez. Brání sevření pásu, což je velmi důležité zvláště u problematických řezacích prací.

**Standardní rozvod (S, SW)**

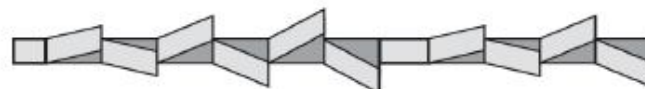
do 10 zubů na palec  
tvar zubu N, H

**Skupinový rozvod (G, GW)**

0,75/1,25 + 10/14 zubu na palec  
tvar zubu K

**Vlnovitý rozvod (W)**

do 14 zubů na palec  
tvar zubu N

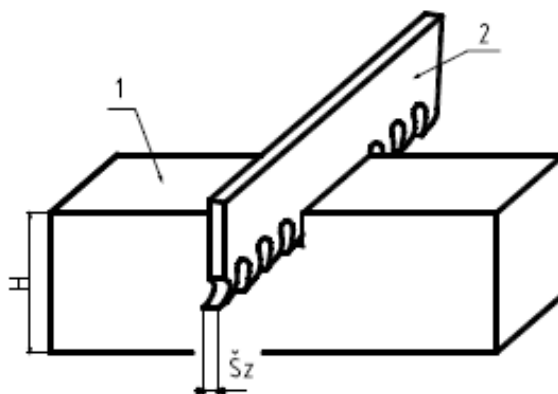
**Variabilní rozvod**

Obr. 8 Typy rozvodu zubů [17].

## 1.2 Řezání materiálu pilovým listem

Princip řezání materiálu pilovým listem spočívá ve vnikání břitu nástroje do materiálu obrobku, kdy nástroj, v tomto případě pilový list, koná přímočarý vratný pohyb. U rámových pil koná přísuv nástroj a obrobek je nehybný.

Na rozdíl od frézování je u řezání pilou maximální hloubka řezu  $H$  podstatně větší než šířka řezu  $\check{S}_z$ .  $H$  je maximální hloubka řezu,  $\check{S}_z$  je šířka řezu, 1 je obrobek a 2 je pilový list.



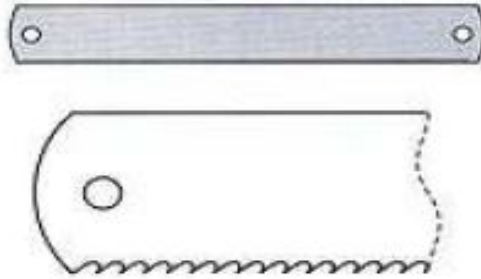
Obr. 9 Řezání pilovým listem [14].

### 1.2.1 Nástroje

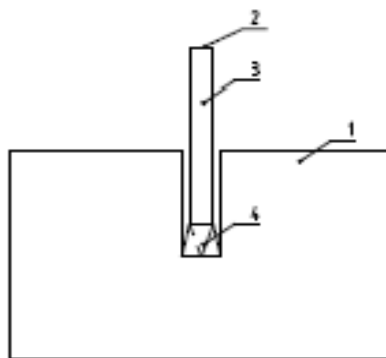
Pilové listy jsou ocelové pásy, které jsou opatřeny na jedné straně zuby. Jsou vyrobeny s rychlořezné oceli. Ve výrobě jsou běžné v délkách 300 až 700 mm. Šířka pilových listů je podle délky běžně 25 až 50 mm, tloušťka 1,25 až 2,5 mm, rozteč zubů 1,8 až 6,3 mm.



Zuby mají jednoduchý tvar a jsou rozvedené, aby tělo pilového listu nedřelo o stěny řezaného materiálu [15].



Obr. 10 Schéma pilového listu [16].

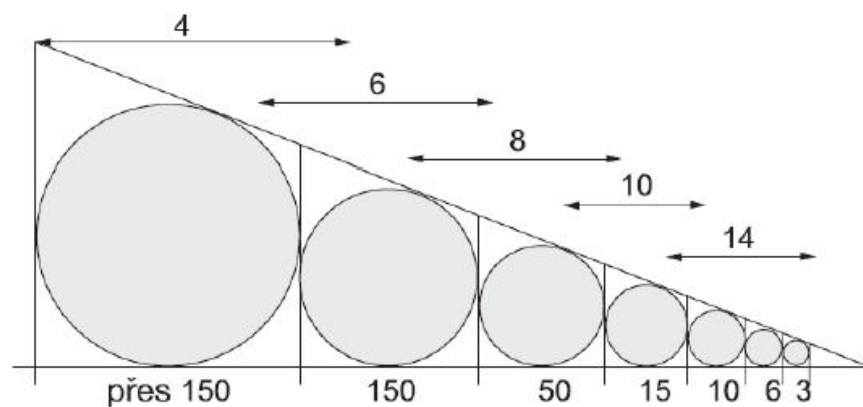


Obr. 11 Pilový list v řezu [14].

1- obrobek, 2- pilový list, 3- tělo pilového listu, 4- zuby pil. listu

### Volba správného druhu strojních pilových listů

Volba pilového listu se správným počtem zubů na 25 mm závisí na rozměrech a druhu řezaného materiálu [16].



Obr. 12 Volba počtu zubů pilového listu [16].

- Řezání tenkých materiálů všech druhů jako jsou trubky, profily a podobně. (14 zubů / 25 mm.
- Řezání malých a středních tloušťek všech druhů materiálu. 10 zubů / 25 mm.
- Řezání velkých tloušťek všech druhů materiálu. 10 zubů / 25 mm.
- Řezání velkých tloušťek měkkých materiálů. 4 zuby / 25 mm.


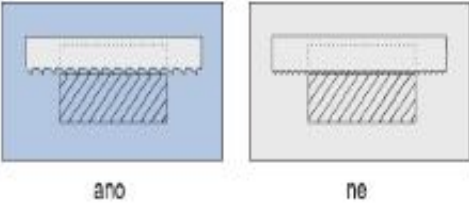

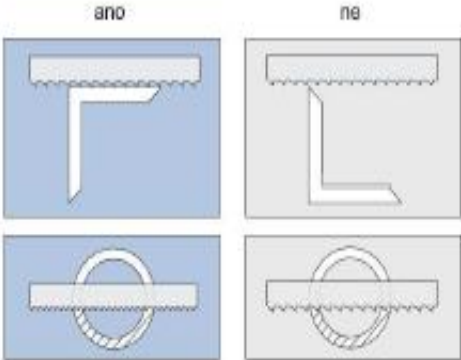


Tab. 1 Doporučený počet zubů pro jednotlivé materiály [17].

Doporučený počet zubů na 25 mm pro jednotlivé materiály			
Materiál	Průměr materiálu (mm)		
	10-30	30-100	100-250
Počet zubů na 25 mm			
Konstrukční ocel Stavební ocel Automatová ocel	14-8	8-6	6-4
Zušlechtěná ocel Nitridová ocel	14-8	8-6	6-4
Legovaná nástrojová ocel Nelegovaná nástrojová ocel	10-8	6-4	4
Pérová ocel	14-8	8-6	6-4
Nerezová ocel Žárupevná ocel	8-6	6-4	6-4
Temperovaná litina do 200HB Šedá litina přes 200 HB	8-6	6-4	4
Litina	10-8	8-6	6-4
Dural, Bronz, Hliník, Mosaz	6-4	6-4	6-4

### Závady pilových listů a jejich možné příčiny

Správnou volbou pilového listu pro určitý druh materiálu a jeho rozměry jakož i dodržováním uvedeného návodu na používání pilových listů docílíme hospodárného řezného výkonu.

Tab. 2 Závady pilových listů [17].

<p>1. Rychlé otupení</p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>• nesprávná volba počtu zubů</li> <li>• nepřesné upnutí pilového listu</li> <li>• velká rychlost - zvláště při řezání tvrdých materiálů</li> <li>• příliš velký tlak - rychlé otupení zubů</li> <li>• nedostatečný tlak - zuby třou a nezařezávají</li> <li>• nedostatečné chlazení</li> <li>• závada v mechanismu pro zpětný chod</li> </ul> 	<p>2. Vylamování zubů</p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>• příliš malý počet zubů na 25 mm při řezání slabých dílců</li> <li>• řezání ostrých hran nebo tenkých kusů tak, nejsou v záběru aspoň 4 za sebou jdoucí zuby</li> <li>• nesprávné upnutí materiálu</li> </ul> 
<p>3. Zlomení pilového listu</p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>• neodborné napnutí pilového listu v rámu stroje</li> <li>• nevhodně volený pilový list pro velký posuv</li> <li>• neopatrné spuštění rámu</li> <li>• nedokonale upnutý řezaný materiál</li> <li>• zavedení nového pilového listu do řezu vytvořeného opotřebovaným pilovým listem</li> <li>• vadná ložiska ve stroji nebo vadný zdvih</li> </ul>	<p>4. Křivý řez</p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>• špatné uchycení pilového listu ve stroji</li> <li>• nedostatečně upnutý pilový list</li> <li>• nedostatečně upnutý řezaný materiál</li> <li>• příliš velký tlak a nevhodný pilový list</li> <li>• tvrdá místa v řezaném materiálu</li> <li>• vadný stroj - opotřebování ložisek, posunutí rámu</li> </ul>

### 1.3 Řezání materiálu pilovým kotoučem

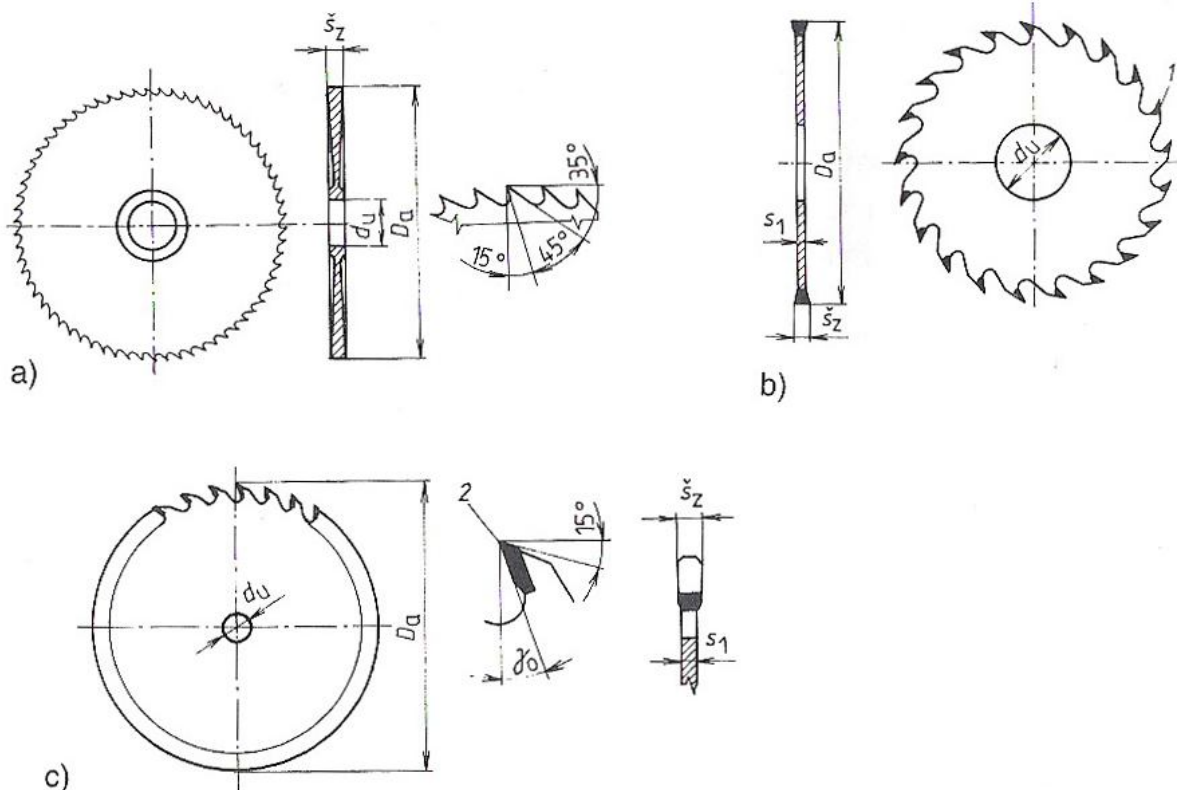
Nástrojem je ocelový kotouč, na jehož obvodu jsou vytvořeny zuby.

Pilové kotouče mohou být:

- S navařenými břity ze stelitu - mají průměry mezi 250 až 1000 mm, šířka břitu zubu 3,2 až 5,3 mm.
- Celistvé – jsou zhotoveny z rychlořezné, nebo nástrojové oceli.
- S připájenými břitovými destičkami ze slinutého karbidu – mají průměry mezi 100 až 600 mm, tloušťka těla kotouče 1,1 až 3,3 mm, šířka břitu zubu 1,8 až 4,5 mm.

Podle provedení těla a tvaru se pilové kotouče celistvé dělí na:

- Podbroušené - průměr 80 až 450 mm, tloušťka těla 2 až 6 mm.
- Ploché s rozvedenými zuby – průměr 50 až 1500 mm, tloušťka těla 0,6 až 5 mm.
- Jednostranně a dvoustranně sbíhavé – průměr 350 až 800 mm, šířka zubů 1 až 3,2 mm.
- Vyduté [14].

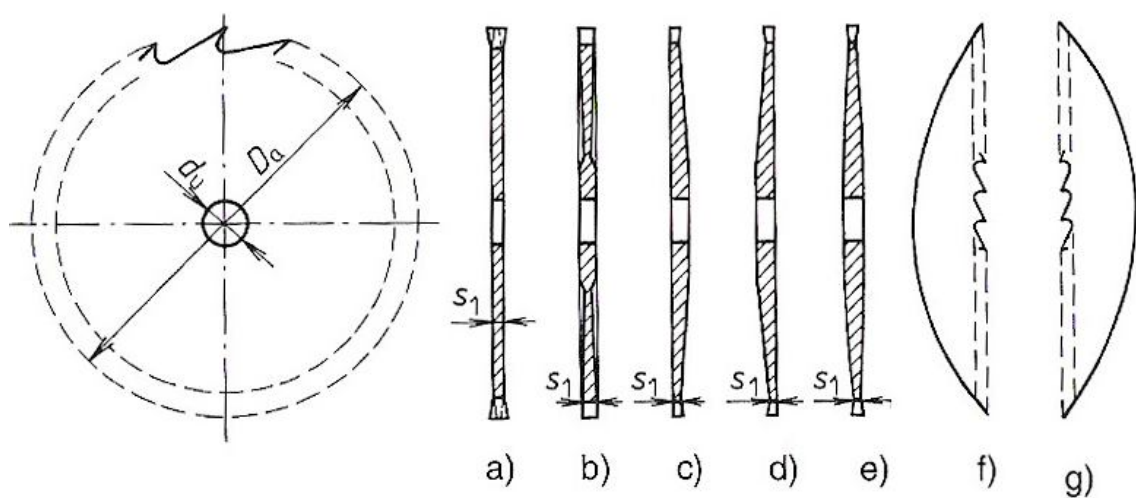


Obr. 13 Pilové kotouče podle provedení břitů [14].

a) celistvý, b) s navařenými břity ze stelitu, c) s připájenými břitovými destička ze slinutého karbidu.

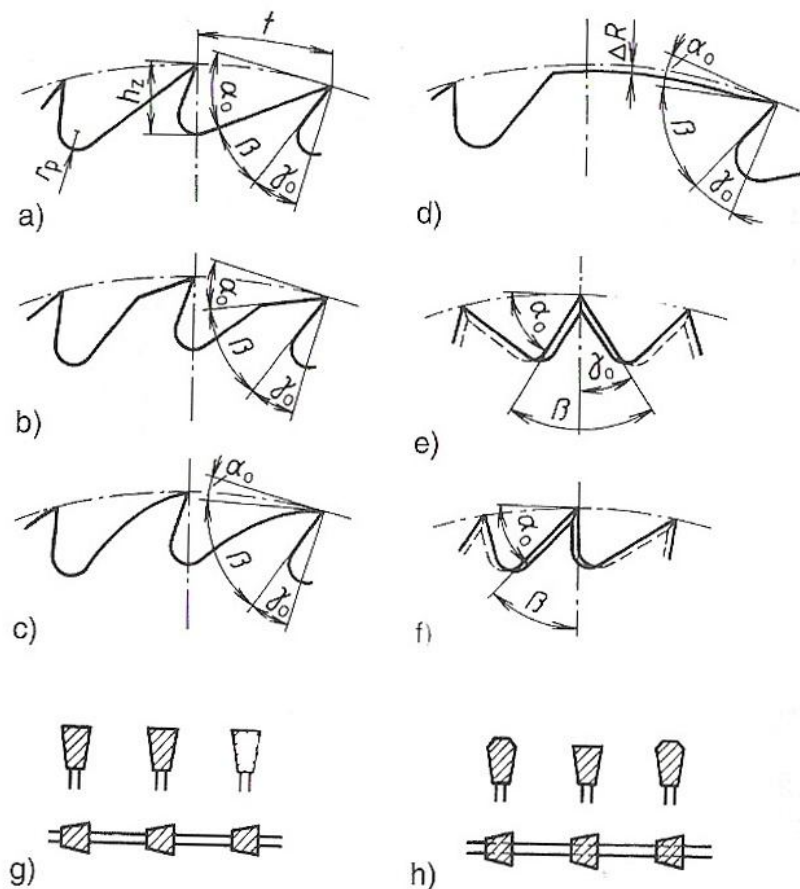
1 - stelit, 2 - břitová destička ze slinutého karbidu.

Zuby pilových kotoučů mají různý tvar, úhel čela  $\gamma^\circ = 20$  až  $40^\circ$ , úhel hřbetu  $\alpha^\circ = 10$  až  $40^\circ$ . Pilové kotouče se upínají za díru. Pro zvýšení tuhosti se pilové kotouče vypínají obdobně jako pilové listy válcováním nebo ručně vyklepáváním kladivem.



Obr. 14 Druhy pilových kotoučů [14].

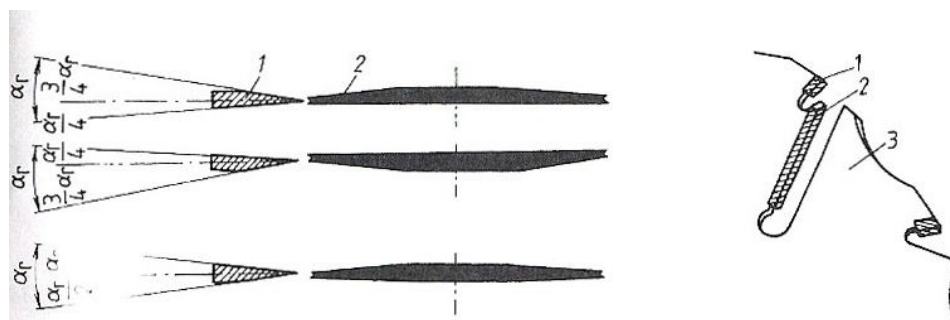
a) plochý, b) podbroušený, c), d) jednostranně sbíhavé, e) dvoustranně sbíhavý, f), g) vyduté.



Obr. 15 Tvary zubů pilových kotoučů [14].

a), b), c), d), celistvé pro podélné řezání, e), f) celistvé pro příčné řezání, g), h) s pájenými břitovými destičkami ze slinutého karbidu.

K odklonění odřezávané části dřeva od zubů kotouče jsou v některých případech použity rozpínací klíny.



Obr. 16 Tvary rozpínacích klínů [14].

1 - rozpínací klín, 2 - pilový kotouč.



## 2 CHARAKTERISTIKA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Kompozitní materiály se v současné technologii velmi často využívají díky pozitivním prvkům materiálů jako jsou například navrhování velmi lehké konstrukce, které mají vysoké hodnoty mechanických vlastností. Jsou to zejména parametry pružnosti, měrné pevnosti a odolnosti proti únavě. Únavová odolnost je podobná jako u slitin hliníku nebo titanu.

Kompozitní materiály jsou vytvořeny kombinací dvou i více fyzikálně a chemicky odlišných složek do jednoho celku. Pokud se spojí tyto složky vznikne nový materiál se zajímavými vlastnostmi. Pokud by jsme zkoušeli samostatnou složku, tak by nikdy nedosáhla těchto vlastností. Pevnější a tvrdší nespojitou složku kompozitu nazýváme výztuž a spojitou složku, většinou poddajnější, která má funkci pojiva výztuže, nazýváme matrice [7].

S kompozity se můžeme setkat u běžných věcí jako je například část lodě, tenisová raketa, rám cyklistického kola. Dále se kompozitní materiály využívají u zařízení vysílaných do kosmického prostoru, leteckých konstrukcí a mnoho dalších nekonvenčních využití.

Kompozitní materiály musí splňovat následující podmínky:

- Kompozitní materiál musí být připraven smícháním složek.
- Výztuž musí být v kompozitu zastoupena více než 5%,
- fyzikální, chemické i mechanické vlastnosti výztuže a matrice se musí lišit; výztuž je obvykle tužší a také významně pevnější v tahu než matrice.

Za nevýhodu u kompozitních materiálů lze považovat vysokou citlivost na technologickou kázeň při výrobě. Musí být dodržen přesný poměr u výztuže i matice. Orientace kladených vláken, pak následný postup při vytvrzování. Vlastnosti následného materiálu ovlivňuje vlhkost, teplota a výkyvy okolního prostředí při výrobě.

Mezi výhody materiálu z kompozitu patří:

- Dobrá rázová pevnost.
- Odolnost proti korozi.
- Pozvolný postup poruch.

- Nižší nároky na údržbu.
- Nízká hmotnost (4x lehčí než ocel).
- Nízká teplotní dilatace.
- Vysoká odolnost proti vibracím
- Zanedbatelné ztráty elektromagnetického záření (kryty radarových antén) [8].

Další výhodou kompozitů před kovovými konstrukcemi je ve výrobním procesu. Kompozity umožňují úspory a to díky jednoduché výrobě složitých tvarových dílů. Kladou se vrstvy a ty plynule mění tloušťku. Tím se výroba zjednodušuje. Tato vlastnost je též z jedním z hlavních výhod pro použití kompozitu namísto kovu.

Členění kompozitů lze zohledňovat podle různých aspektů. Podle druhu matrice se rozlišují kompozity s polymerní, keramickou, nebo kovovou matricí. Podle druhu zpevňující fáze jsou kompozity s uhlíkovou, skleněnou, přírodní, kovovou, keramickou a polymerní fází. Podle fáze zpevňující tvar jsou kompozity vláknové nebo částicové zpevňující fáze.

Při překročení hranice množství výztuže v kompozitu může docházet ke ztrátě mechanických vlastností [9, 10, 11, 12].

## 2.1 Výztuže

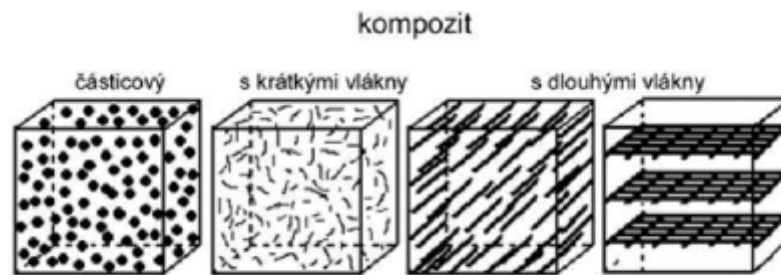
Výztuž je taková složka kompozitu, kvůli které byl kompozit vytvořen. Má některou vlastnost, kvůli které využijeme výsledný kompozit a využijeme ho, jelikož v elementární podobě výztuže to není možné.

Některé kompozity mohou obsahovat vyztužující fáze s různou velikostí. Nejmenší rozměry mají nanokompozity, u kterých se průměr nebo délka vlákna pohybuje v řádech 100 nm. Mikrokompozity, které mají největší příčný rozměr výztuže (v rozmezí 100- 102  $\mu\text{m}$ ). V průmyslu mají mikrokompozity největší význam. U makrokompozitů jsou největší rozměry vyztužující fáze. Velikost příčného rozměru je okolo 100mm. Jsou používány zejména ve stavebnictví (například železobeton).

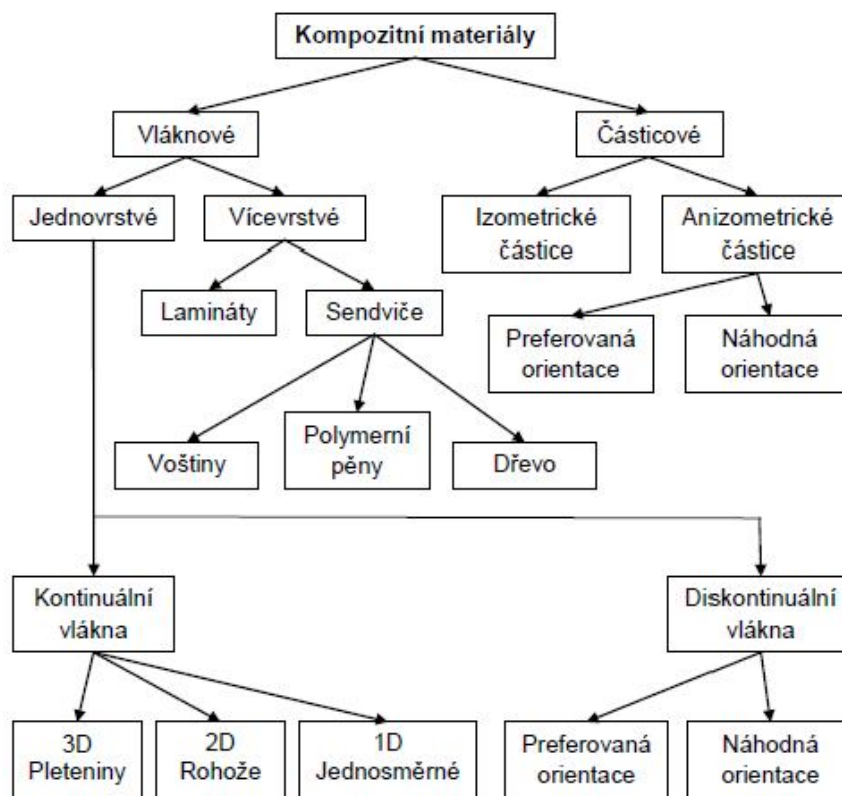
Výztuže se dají dělit podle tvaru (viz. obr. 1) a velikosti a podle použitého materiálu (viz. obr. 2).



Při rozdělení podle tvaru a velikosti se využívá štiřlostního poměru, který definujeme jako podíl největšího a nejmenšího rozměru výztuže.



Obr. 17 Dělení kompozitů podle tvaru a uspořádní výztuže [11].



Obr. 18 Rozdělení dle geometrie výztuže [11].

Využitím ve tvaru kulové částice je u kompozitu dosaženo nejnižšího vyztužení. Vyztužení dále roste přes destičkové částice výztuží. Nejvyšší hodnoty jsou u vláknových

výztuží. Z toho vyplývá, že se zvyšující se výztuží dochází ke zpevnění anizotropních částic.

### 2.1.1 Vláknové výztuže

Vlákna výztuže mají na starosti ohybovou a tvarovou pevnost kompozitu. Tyto vlastnosti ovlivňují materiály vláken. Jejich orientace a množství v materiálu. Orientací vláken jde nastavit tuhost a pevnost výsledného kusu. Dále také odolnost proti teplotě, únavě a vlhkosti. Jeden rozměr výztuže je vždy větší než dva zbývající. Pevnost a tuhost materiálu se mění podle směru uložení vláken. Nejvyšší pevnost je ve směru vláken a mimo orientaci je pevnost podstatně horší.

Vláknové výztuže mohou být krátké, dlouhé, nebo nepřerušené po celé délce výrobku. Uspořádání je možno využít chaoticky, v jednom směru nebo ve dvou směrech (viz obr. 3).



Obr. 19 Dělené vláknové výztuže [13].

Sdružením elementárních vláken vznikají prameny, které jsou poté zpracovány na polotovary typu:

- Tkaniny.
- Rovingy.
- Kabelová a jednoduchá příze (pro výrobu technických tkanin).
- Prameny bez zákrutů.
- Sekané prameny (křehká vlákna).
- Mletá vlákna (prameny mají určitou potřebnou délku).
- Rohože (vznik vkládáním nepravidelně orientovaných 50 mm dlouhých vláken).
- Prepregy (různě široké a obsahují tkaninu, rohože nebo rovingy v paralelním uspořádání).

Nejvíce používanými jsou tkaniny a rovingy. Rovingy jsou dodávány v cívkách s vnějším nebo vnitřním odtahem. Jinak také formou pásek o různé šířce obsahující vlákna převážně

v podélné orientaci. V příčném směru jsou vlákna vázána pouze za účelem dodržení konstantní šířky pásy. Tkaniny mají různou vazbu z textilu (viz. Obr. 4). Jsou zde požadavky na pevnost a tuhost kompozitu. Dále také tvarová členitost formy. Vzájemné uspořádání osnovy vytváří tři základní typy vazeb:

- Atlasová vazba (je nejméně pevnou, ale nejlépe tvarovatelnou vazbou).
- Keprová vazba (je ohebná, ale pouze při měkké povrchové úpravě vláken. Na tkanině je vytvářen diagonální vzor. I přes to má nejčastější využití. A to díky poměru ceny a tvarovatelnosti).
- Plátňová vazba (je nejpevnější a také nejméně poddajná při tvarování).



Obr. 20 Typy tkání [7].

Druhy materiálů vláken jde v tkaninách kombinovat i s jinými druhy vláken. Například ve směru kde je menší namáhání materiálu, lze vlákna nahradit levnějšími skelnými vlákny. Výsledek je označován jako hybridní tkaniny.

Vláknové výztuže se dají dělit podle použitého materiálu na:

### Polymerní vlákna

Využívají se nejvíce díky své malé hustotě. Vysoké pevnosti a tuhosti vlákna je dosaženo téměř dokonalou orientací tuhých lineárních makromolekul v podélném směru vlákna. Polymerní vlákna nejsou křehká, při kolmém působení tlakové síly na vlákno dojde k plastickému přetvoření.

### Skleněná vlákna

Předností skelných vláken je nízká cena a lepší houževnatost než uhlíkové vlákna.

Jsou vyrobeny tažením z taveniny a jsou amorfni. Nejčastěji se pohybují průměry od 3,5 do 20  $\mu\text{m}$ . Takových průměrů lze dostat dloužením proudu skla vytékajícího z platinových trysek. Vytažená vlákna z trysek se sbíhají do pramene, za horka jsou vlákna opatřeny tenkým ochranným povlakem, jelikož vlákna jsou hodně abrazivní a lámavá. Jako povlak se používá lubrikační vosk, nebo vazebné prostředky. Dále jsou ošetřená vlákna navíjena na buben.

### **Keramická vlákna**

Hlavní předností u keramických vláken spočívá ve výborné tepelné a chemické odolnosti. Kontinuální vlákna karbidu křemíku ( $\text{SiC}$ ) jsou relativně levná, protože výchozí suroviny jsou dostupné ve větším množství. Keramická vlákna jsou zatím používána pouze s kovovými, uhlíkovými, nebo keramickými matricemi obzvláště pro letecký průmysl a pro výrobky pracující za vysokých teplot. Kontinuální vlákna oxidu hlinitého ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) jsou využívány obdobně jako vlákna karbidu křemíku. Od vláken karbidu křemíku se však liší svou elektrickou nevodivostí, což umožňuje využití například v kompozitech pro kryty radarů. Vlákna  $\text{SiC}$  a  $\text{Al}_2\text{O}_3$  mají větší tuhost než polymerní a skleněná vlákna.

### **Bórová vlákna**

Tato vlákna mají oproti ostatním vláknům velký průměr (102  $\mu\text{m}$ ) a mají větší tvarovou stabilitu při tlakovém namáhání. Jejich pevnost v tlaku je větší než pevnost v tahu. Kompozit s bórovými vlákny je dražší než s vlákny uhlíku, ale má lepší mechanické vlastnosti. Hlavní oblast využití bórových vláken je aplikace zpevnění konců tlakem namáhaných dílů. A při výrobě prvků s velmi malou tepelnou roztažností.

### **Uhlíková vlákna**

Mají vysoký modul pružnosti, vysokou pevnost, tepelnou odolnost a vysokou únavovou pevnost současně s nízkou měrnou hmotností. Vlákna jsou krystalická, elektricky vodivá. Nevýhodou je malá odolnost proti nárazu. Ta je způsobena křehkostí uhlíkového vlákna a elektrochemická koroze při kontaktu s méně ušlechtilými kovy. Díky vysokému modulu pevnosti, relativní nízké hmotnosti a také vysoké ceně se uhlíková vlákna používají na špičkové aplikace pro loď, sportovní potřeby, letectví, kosmologické aplikace a automobilový průmysl. V současnosti se začínají čím dál více hybridní tkaniny vyrobené z

více druhů vláken. Například uhlík - kevlar. Používají se pro zkombinování vlastností obou druhů vláken.

### **Kovová vlákna**

Vyrábějí se z ušlechtilých materiálů, jako jsou například korozivzdorné a žáruvzdorné oceli a slitiny na bázi niklu. Použití kovových vláken je ve formě vodivých tkanin, filtrační média pro agresivní látky a vysoké teploty, tepelné štíty a k plnění elektricky vodivých plastů a kompozitů.

### **Přírodní vlákna**

Původ vláken je z obnovitelných zdrojů, hlavně na bázi celulózy - sisal, len, konopí, bavlna, juta nalézají uplatnění jako levnější alternativa skleněných vláken. V poslední době jsou stále více využívána při výrobě pevnostně méně náročných a zároveň lehkých dílců v interiérech automobilů a jiných dopravních prostředků. Při použití rostlinných vláken dochází k úspoře polymeru, odpad je možné recyklovat, mají povrchově přírodní vzhled a je možné zrychlit výrobní postup díky větší tepelné vodivosti. Používají se ve formě pramenců a nití, netkaných materiálů - rohoží nebo tkanin.

### **Čedičová vlákna**

Čedičová vlákna jsou výrazně podobná skleněným vláknům typu S. Výroba těchto vláken se více rozšířila teprve nedávno. Jedná se o nový typ technického vlákna. Tato vlákna mají vysokou pevnost a nízkou tažnost. Vlákna jsou nehořlavá, mají nízkou tepelnou vodivost, jsou nenasákavá, mají dobrou tepelnou odolnost, vysoký elektrický odpor. Výhodou je nízká cena. Je to asi 60% ceny skelných S vláken. Negativní vlastnosti čedičových vláken je jejich křehkost. Technologie na výrobu je obdobná jako na výrobu skleněných vláken. Využití je ve stavebnictví v podobě zvukově a tepelně izolačních desek na stropnice, příčky i sendvičového zdiva, podlah a různých technických výrobcích jako rozbrušovací kotouče, brzdové destičky, lamináty.

#### **2.1.2 Částicové výztuže**

Na druhu výrobního procesu částicových výztuží záleží na tvaru a velikosti částice. Jsou dva typy částicových výztuží. Částice minerálního původu, ty se zpracovávají prů-

myslově mechanickým mletím na určitý tvar a velikost. Nebo jsou vyráběna průmyslově při chemické změně z přírodních zdrojů.

Zvýšení tuhosti a zlepšení tvarové stálosti se dosahuje použitím anorganických částic. Elastomerní částice v kompozitu zlepšují jeho houževnatost. Částice sulfidu a grafitu zvyšují odolnost proti otěru a vylepšují kluzné vlastnosti.

Částicové výztuže se dále dají dělit na izometrické, které mají tvar koule nebo elipsoidu a anizometrické, které mají tvar destiček nebo jehlic. Částicové výztuže mají vlastnosti, které jsou nezávislé na směru [8, 19, 20].

## 2.2 Základní typy výroby kompozitních materiálů

Výroba kompozitních materiálů je především na impregnaci vláken, tkanin, slinutých materiálů a podobně. Infiltrací po ponoření do roztavené matrice, plazmovým nástřikem, lisováním, nanášení difuzí par a dalších. Aby se dosáhlo kvalitního kompozitu, je nutné zaručit rovnoměrné rozložení zpevňující fáze v objemu. U vláknových kompozitů možnost uložení jednotlivých vrstev s libovolnou orientací vlákna, dobré propojení matrice a zpevňující fáze. Dále možnost změny objemového množství zpevňující fáze, možnost tepelného zpracování po výrobě a jednoduchost s hospodárností výroby.

Vedle dvou základních složek, pojiva a pryskyřičné matrice, se při výrobě kompozitních materiálů používají také jiné přísady - například stabilizátory, retardanty proti působení UV záření, barevné pigmenty a jiné. Písady jsou dány taky, aby byly dosaženy určité fyzické a mechanické vlastnosti materiálu.

Při výrobě kompozitních materiálů je třeba, aby bylo zajištěno:

- možnost tepelného zpracování po výrobě,
- dobré spojení výztuže a matrice,
- hospodárnost a jednoduchost výroby,
- u vláknových kompozitů možnost uložení vrstev s libovolnou orientací jejich vláken,
- rovnoměrné rozložení vyztužujících vláken v celém objemu [18].

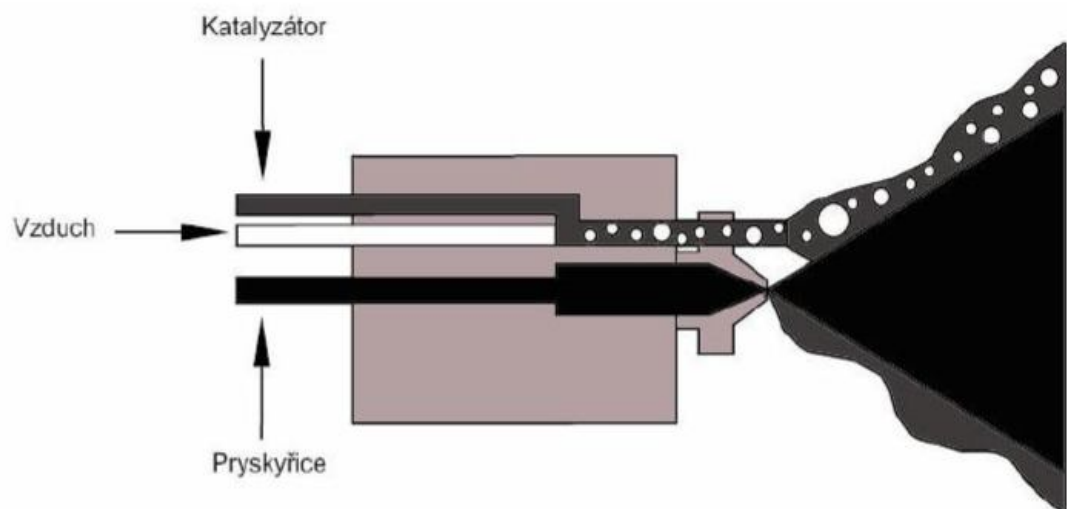
### 2.2.1 Stříkání

Kompozitní materiál je nanášen do formy pomocí stříkací pistole. Je to metoda, která patří do technologie výroby s otevřenou formou. Z pistole je stříkána katalyzovaná směs krátkých skleněných vláken a matrice, které jsou poté lisovány a vytvrzovány. Výhodou stříkání je především přesnost, relativně nízká cena zařízení a produktivita než u ručního nanášení. Jelikož lze stříkací pistol ovládat robotem. Nevýhoda je složitější dosahování přesných tolerancí [18].

**Výrobu stříkáním lze rozdělit do tří typů:**

- **vzduchový systém s vnějším mícháním katalyzátoru a matrice.**

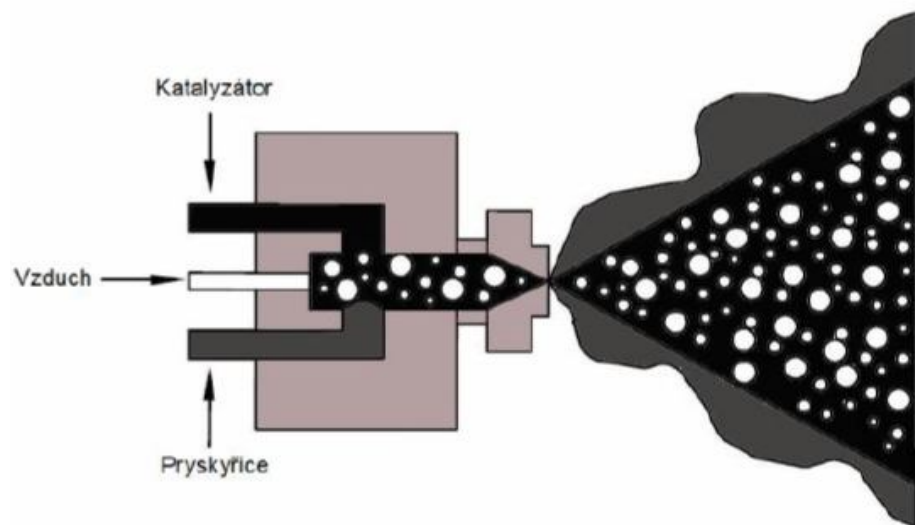
System s vnějším mícháním vytváří kapky katalyzátoru a pryskyřice. Je zde obtížnější, aby bylo dosaženo přesné dodržení úhlu paprsku ze stříkací pistole [19].



*Obr. 21 Vzduchový systém s vnějším mícháním [23].*

- **vzduchový systém s vnitřním mícháním katalyzátoru a matrice.**

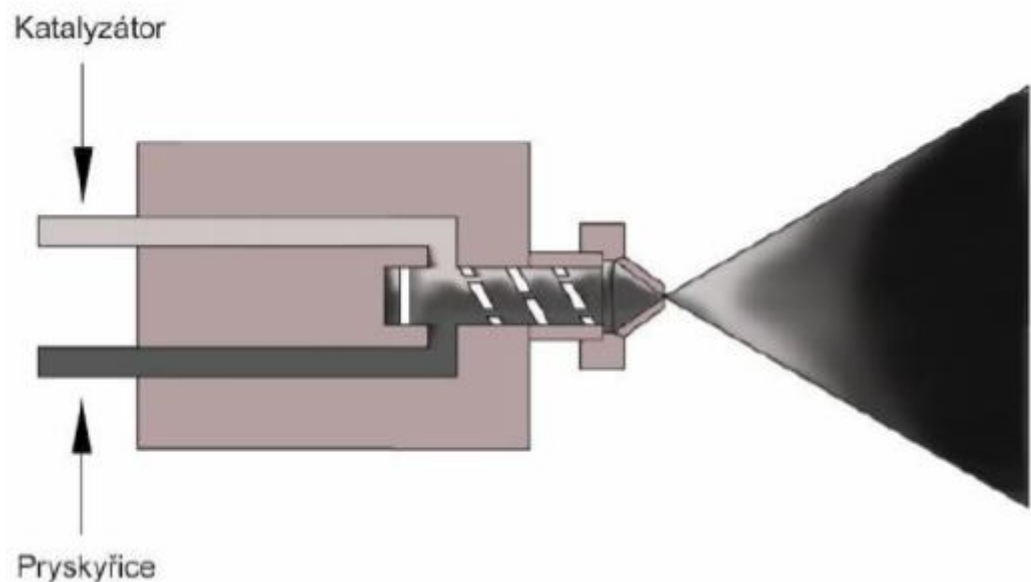
Uvedený systém zrychluje posuv vyztužujících vláken v pistoli a lze tak vyrobít laminát s lepšími vlastnostmi. Dále také zajišťuje pokrytí formy rovnoměrnou vrstvou díky turbulenci vhněného vzduchu.



Obr. 22 Vzduchový systém s vnitřním mícháním katalyzátoru a matrice [23].

- **Vnitřní míchání bez použitého tlakového vzduchu.**

System snižuje množství odpadu a zaručuje dokonalé promíchání katalyzátoru a matrice. Tím zlepšuje mechanickou pevnost dílu.



Obr. 23 Vnitřní systém míchání bez tlakového vzduchu [23].



### 2.2.2 Ruční kladení

Je to metoda, která se používá nejdéle. Pryskyřice a výztuž je nanášena ručně. Nanáší se na povrch negativní nebo pozitivní formy. Podle toho, na který povrch jsou komponenty nanášeny, je dosaženo kvality povrchu vytvrzeného kompozitního dílce. Je to nevýhoda ručního kladení. Kvalitní povrch kompozitu je pouze z jedné strany. Jakmile je položena výztuž, je kompozit ponechán k vytvrzení. Výhodou ručního kladení je možnost vyrobit velkorozměrné výrobky, dalšími výhodami jsou jednoduchá technologie, minimální náklady na nástroje a téměř neomezená volba tvarů a velikostí. Výztuže jsou v podobě rohoží a tkanin. Pryskyřice při teplotě musí téci. Výrobky této technologie jsou například bazény, sila a lodě [4].



Obr. 24 Schéma ručního kladení [21].

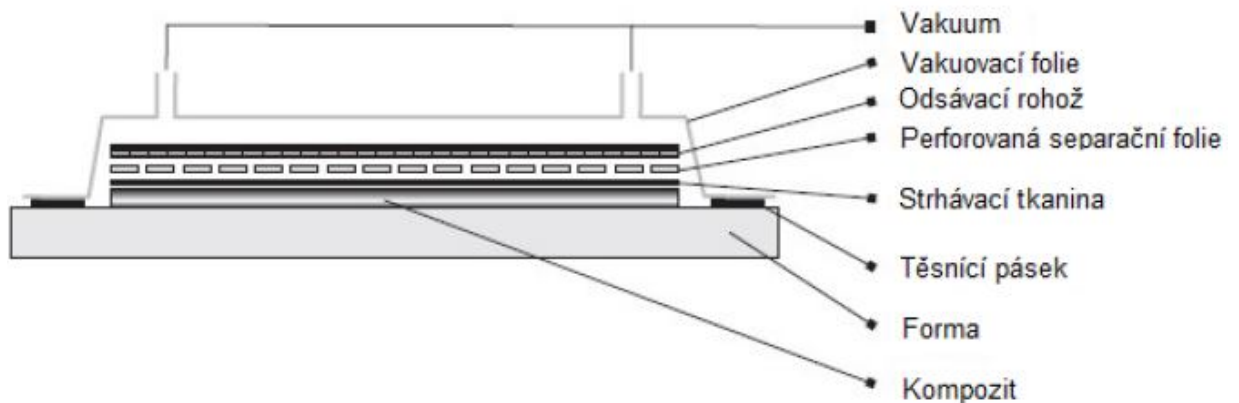
### 2.2.3 Lisování

Technologie je rozdělena na lisování pomocí vakua, lisování za studena, v autoklávu a na použití tlaku a tepla. Lisování je relativně levné a provádí se na nízkého tlaku a teploty v nevyhříváných dvoudílných formách, díky kterým má výlisek hladký pohledový povrch z obou stran.

Využití vakua je na odstranění přebytečné pryskyřice. Je to z důvodu zvýšení mechanických vlastností. Výlisky jsou hladké, mají dobré mechanické vlastnosti, jsou z obou stran hladké s vysokým obsahem výztuže.

Lisování v autoklávu je nejsložitější a nejnákladnější. Vyžadují vytvrzování za vyšších teplot. Využívá se v kosmickém, leteckém a automobilovém průmyslu.

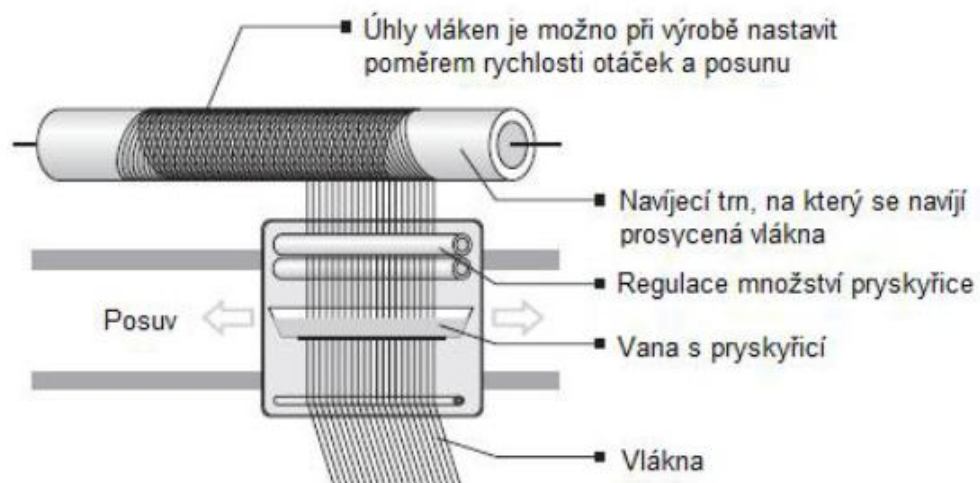
U lisování za použití tlaku a tepla je technologie nejvíce produktivní metodou při velkých sériích u středně velkých a malých dílů. Za nevýhodu je zmiňována vysoká pořizovací cena forem a lisů. Je využíváno dvou nebo vícedílných kovových vyhřívaných forem, které jsou upevněny s hydraulických lisech a důkladně vyleštěny.



Obr. 25 Schéma technologie lisování pomocí vakua [21].

#### 2.2.4 Navíjení

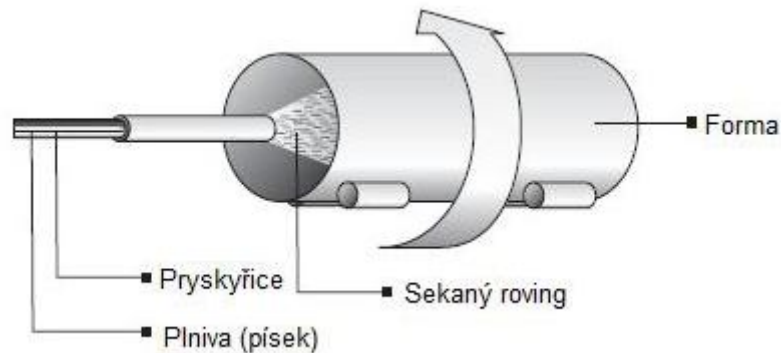
U technologie navíjením se navíjí výztuž, která je tvořena nejčastěji uhlíkovými, skleněnými nebo aramidovými vlákny, které jsou naimpregnovány pojivem. Tímto způsobem jsou vyráběny různé nádrže, trubky, kolena, nádoby a jiná dutá tělesa. Výrobky mají kvalitní povrch a fyzikální vlastnosti a linka může být zcela automatizována. Nevýhodami jsou ve vysoké ceny zařízení a obtížné odstranění vnitřní formy.



Obr. 26 Schéma technologie navíjení [21].

### 2.2.5 Odstředivé lití

V rotující dutině formy se v ose formy pohybuje tryska zařízené, které nanáší směs krátkých nasekaných vláken pryskyřice s plnivem. Využívá se pro výrobu dutých těles rotačního tvaru, zejména silnostěnné potrubí.

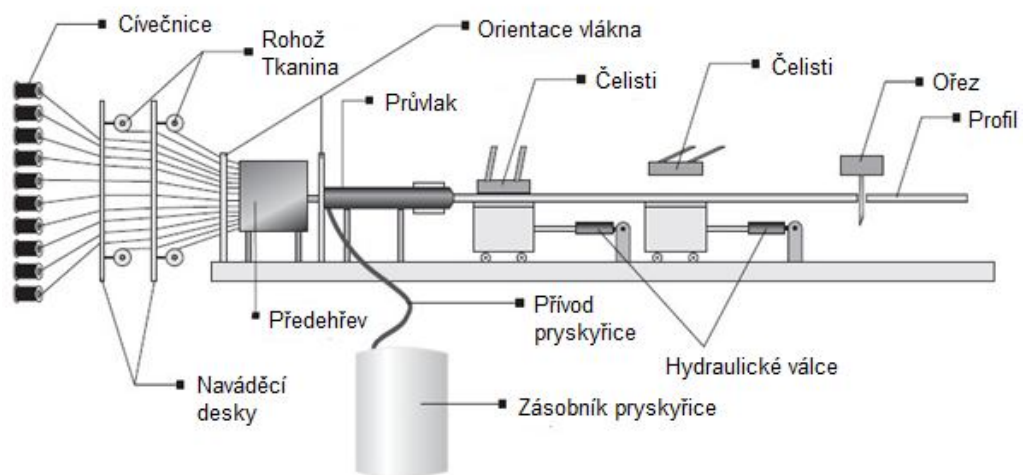


Obr. 27 Schéma odstředivého lití [21].

### 2.2.6 Tažení

Tažením lze vyrábět duté, plné i tvarové výrobky s procentuálním obsahem výztuže až do 80%. Do výztuže se nejvíce využívá skleněný roving a zřídka uhlíkové pramence.

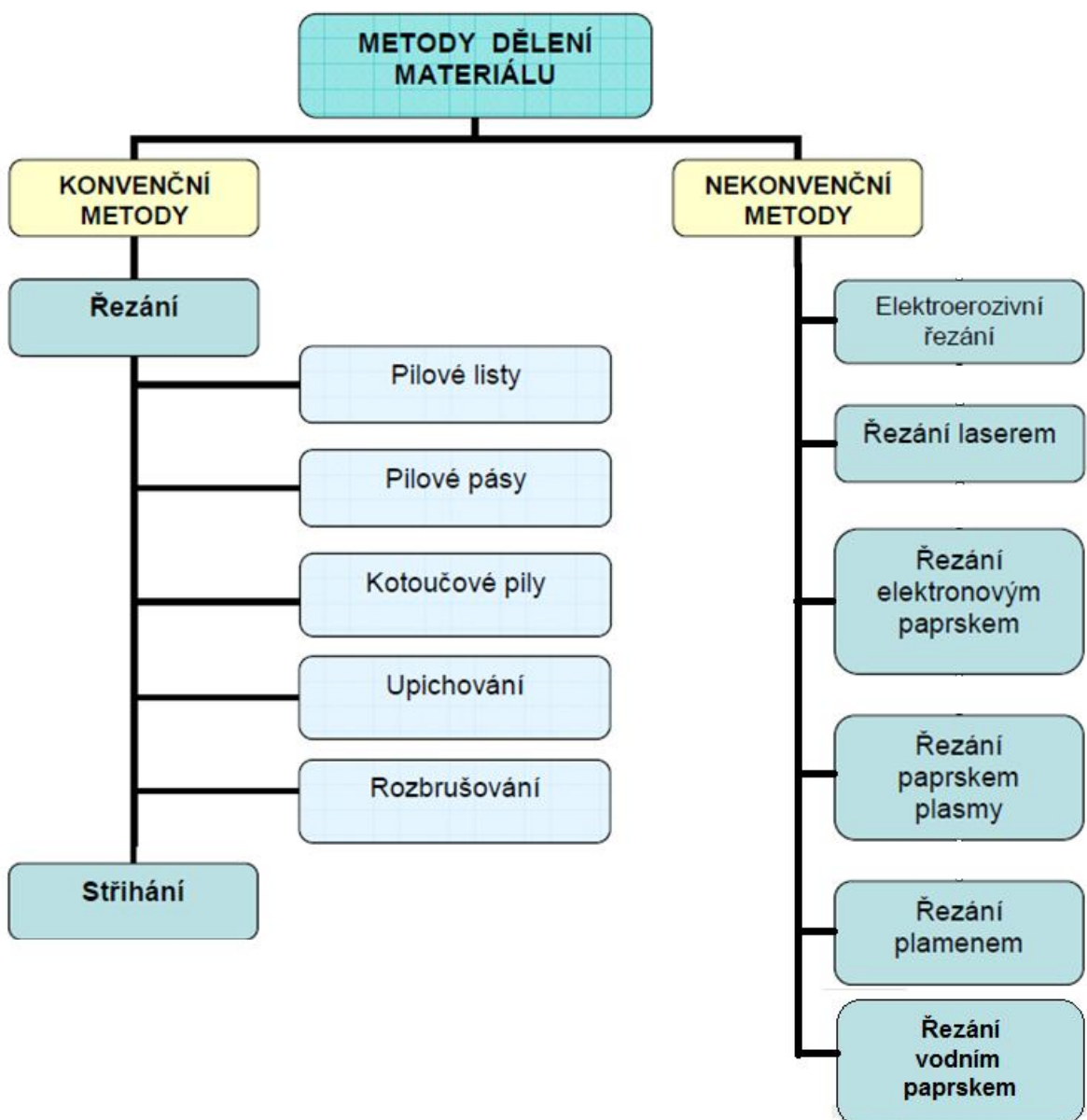
Vlákna jsou pomalu tažena skrz zahřátou průtažnici, kde se vytvoří konstantní průřez. Tažení je z cenového hlediska levnější než ruční kladení, vyžaduje jen malé investice, ale není použitelné pro složitější tvary výrobků.



Obr. 28 Schéma technologie tažením [21].

### 3 METODY DĚLENÍ MATERIÁLU

Existují různé metody dělení materiálů. Rozdělují se na konvenční metody, což znamená, že nástroj je charakterizován geometrií. A dále nekonvenční metody, kde nástroj chybí a odděluje se účinkem paprsku vody, světla, plasmy, elektronů, působením tepelné energie plamenem a pod. Viz obr. 29.



Obr. 29 Dělení materiálu[14].

## 4 OBRÁBĚNÍ KOMPOZITŮ

Matricové kompozitní materiály na bázi polymeru nebo pryskyřice jsou obtížně obrobitelné a tak musíme volit co nejvhodněji řezné nástroje. To vyžaduje velkou pečlivost a vybraný postup. K vůbec nejvíce rozšířeným operacím u zpracování kompozitů je soustružení, frézování, řezání(dělení) a vrtání (výroba děr např. pro spojovací součásti) [5].

Často obráběné jsou kompozity, které obsahují skelná, aramidová, nebo uhlíková vlákna. Jsou to vlákna, které jsou vázána pryskyřicí na bázi fenolu, epoxidovou pryskyřicí, nebo organickým polymerem. Vzájemná kombinace matric, nebo vyztužujících vláken způsobí rozdílné mechanické vlastnosti látky, u níž je nutné zohlednit volbu a rychlost řezného nástroje. Například kompozitní materiály zpevněné uhlíkovými vlákny, vyztuženými aramidovou tkaninou jsou velmi náročné především na geometrii břitu, protože se lehce poddají tlaku nástroje a jsou měkké. Pro tyto materiály byly vyvinuty nástroje, které nejprve předeprnou vlákno a následně oddělí a odstraní z pracovního prostoru.

Hlavní vliv na kvalitu obrábění kompozitních materiálů mají také řezné podmínky. Záleží na správně zvolených otáčkách, správném posuvu a zajištění zamezení tření nástroje o povrch obrobku. Pokud neřeže nástroj správně, tak dochází k lomu vláken nebo delaminaci materiálu [6].

### 4.1 Problémy při obrábění kompozitních materiálů

Při obrábění kompozitů dochází k různým poškozením materiálu, která jsou mechanismy vzniku a vzhledem podstatně jiná než jak to bývá u kovových materiálů. Největší komplikace tvoří vlákna materiálu. Kompozitní díly, které je možné obrábět, jsou ve většině vyztužené skelnými vlákny. Sklo má však na Mohsově stupnici tvrdost stejnou jako karbidy křemíku, boru a slinuté karbidy (SK). Vyšší tvrdost mají pouze nástroje z polykrystalického diamantu (PKD). Zbytek materiálů používaných na výrobu řezných nástrojů podléhá intenzivnímu opotřebení. Čím více je značné opotřebení břitu nástroje, tím dochá-

zí ke zhoršení odřezávání materiálu. To má za důsledek delaminaci nebo lom vlákn. Plnivo (vlákna) je různě orientováno, tudíž je obrobek silně anizotropní [1].

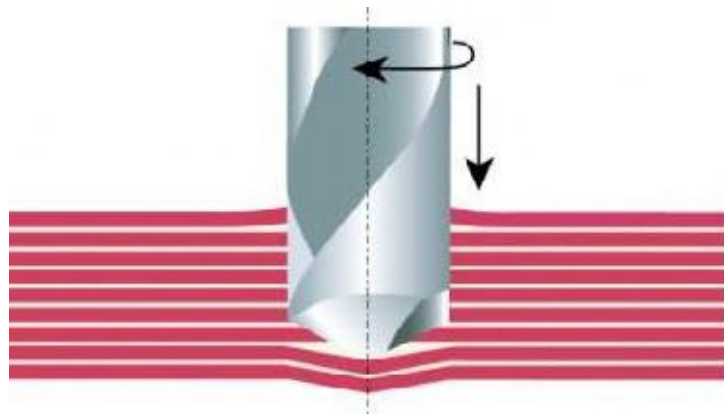
Problémy nejsou jen plniva, ale také pojivo (matrice). Má za následek horší odvod tepla z místa řezu kompozitního materiálu. U kovových materiálů v třísece odchází většina tepla pryč, ale u kompozitů tříseka vstupuje do řezného nástroje. Další problém je, že kompozity mají nízkou tepelnou odolnost a při teplotách (100-300°C) nejsou stálé. Pokud je překročena tzv. kritická teplota materiálu, na povrchu se začnou objevovat spálené oblasti, proto teplota tání pojiva často určuje jakou řeznou rychlostí a posuvem budeme obrábět [1, 6].

Aby se teplota kompozitu snížila, lze použít procesní kapalinu. Ta má chladicí účinek a snižuje vliv abraze skelných vláken na nástroji. Procesní kapalinu nelze použít u všech materiálů a to kvůli nasákavosti kompozitů [3, 6].

Vyztužené kompozity při obrábění tvoří částičky drobné třísky (hlavně u skelných vláken), které se šíří do prostoru. Pro člověka jsou velmi škodlivé a při vdechnutí se drží i několik desítek let. Proto je potřebné mít odsávací systémy v pracovním prostoru stroje, nebo použít procesní kapaliny, pak jsou malé částičky třísky odplavovány pryč.

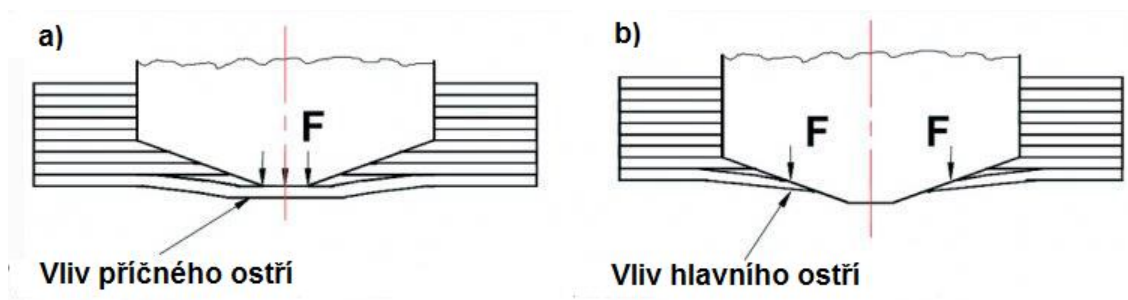
## 4.2 Delaminace

Typickým defektem při obrábění kompozitního materiálu je delaminace. Nejčastěji vzniká u frézování a vrtání vrstvených kompozitů. K delaminaci dochází na vstupu nástroje do materiálu (odlupuje se povrchová vrstva), tak i na výstupu nástroje z kompozitu (odlupují se neobrobené vrstvy pod nástrojem).



Obr. 30 Delaminace [6].

Vznik delaminace při vrtání šroubovým vrtákem je rozdělen na dvě fáze. (fáze působení příčné ostří vrtáku a fáze působení hlavního ostří vrtáku). První fáze je síla  $F$  od příčné ostří působí na neobrobenou vrstvu materiálu, dosáhne tak kritické hodnoty a končí poté, co příčné ostří pronikne ven (obr. 27). Při deformaci se vytvoří nejdříve malé vydutí v okolí místa osy vrtání a pak se dále šíří ve směru vláken v povrchové vrstvě materiálu. Jakmile vyboulení dosáhne mezní hodnoty, povrchová vrstva se rozevře, příčné ostří vrtáku pronikne ven a začne druhá fáze. V důsledku tlaku a otáčení vrtáku, se iniciovaná delaminace dále zvětšuje (obr. 27). Příčné ostří materiál obrobku řeže s velkým negativním úhlem a tvoří více než 50% posuvné síly. Jakmile příčné ostří prostoupí na povrch, delaminace z velké části ustane [1, 6].



Obr. 31 Fáze vzniku delaminace [6].



## 4.3 Stroje pro řezání pilovými pásy

### 4.3.1 Pásová pila

Pásové pily se rozdělují podle typu konstrukce na svislé pásové pily, nebo se sklopným, případně pevným vodorovným ramenem. Pásové pily mají dva kotouče, jeden hnací, přes něhož je napnutý nekonečný pilový pás a jeden hnací kotouč. Kotouče mají rozměry podle velikosti pily. Běžně jsou použity průměry 600 až 1200 mm. V blízkosti místa řezání je pilový pás veden čtyřmi kladkami [14].

- Svislé pásové pily mají kotouče umístěny nad sebou a jejich využití je především pro tvarové vyřezávání součástí z plechů nebo desek.
- Vodorovné pásové pily mají kotouče umístěny za sebou a jsou mírně skloněny k vodorovné rovině. Pilový pás je širší než u svislých pásových pil. Jejich využití je výhradně na dělení materiálů, mohou pracovat na automatickém cyklu [14].

## 5 SHRNU TÍ TEORETICKÉ ČÁSTI A CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI PRÁCE

Hlavní náplní teoretické části práce bylo popsáno řezání materiálů pomocí pilových listů, pásů a kotoučů. Seznámení se základním rozdělením materiálů, dále rozdělení kompozitních materiálů, jejich hlavní typy výroby a dělení. Jsou zde popsány i problémy při obrábění kompozitů, jelikož fakta teoretické části budou použita v praktické části bakalářské práce.

Hlavní cíle praktické části se zabývají:

- příprava experimentu při dělení kompozitů
- dělení kompozitů pomocí pilových kotoučů a pásů
- hodnocení jakosti dělené plochy
- hodnocení velikosti prořezu
- hodnocení rozměrové přesnosti a opotřebení pilového nástroje
- vyhodnocení naměřených údajů.

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 6 CHARAKTERISTIKA PILOVÝCH STROJŮ

Při výběru pásových strojů jsem si zvolil stolní kotoučovou pilu a pásovou pilu na kov.

### 6.1 Pásová pila na kov

Pásová pila je určena pro řezání veškerých běžně používaných materiálů. Od hliníku, jeho slitin, neželezných kovů, ale i oceli vysoké pevnosti. Pila má malé rozměry, velký výkon a tuhou konstrukci. Řezat lze pod úhlem díky otočnému svěráku nebo natočením ramene pily. U pily je možné použít chladicí systém [24].



Obr. 32 Pásová Pila na kov.

Tab. 3 Parametry pásové pily.

Příkon	750W
Napětí	400W
Řezná rychlost	22/33/45/65m/min.
Max. řezaný průměr	(90°) 180, (45°) 110 mm
Max. řezaný materiál (š x v) při 90°	180 x 300 mm
Max. řezaný materiál (š x v) při 45°	180 x 110 mm
Rozměry pásu	2360 x 19 x 0,9 mm

Řezání pod úhlem	90°, 45°
Chlazení	Ano
Hmotnost	130 kg
Krytí motoru	IP 54
Rok výroby	2004
Zvolená řezná rychlost	640 mm/min

## 6.2 Stolní kotoučová pila

Stroj je kombinací dvou jinak samostatných strojů. Hoblovačky a stolní kotoučové pily. Používá se k podélnému řezání, příčnému řezání, zkracování, dorovnávání hran a ploch z různých typů dřeva a plastů. Stroj je vybaven adaptérem k odsávání prachu.



Obr. 33 Univerzální dřevoobráběcí stroj.

Tab. 4 Parametry stolní kotoučové pily.

Příkon	1600 W
Vstupní napětí	230 V/ 50 Hz
Otáčky	4500 / min
Rychlost posuvu	5 m/min
Maximální průchodová výška	6-110 mm

## 7 CHARAKTERISTIKA MĚŘICÍCH ZAŘÍZENÍ

Ke měření drsnosti povrchu řezů byl použit drsnoměr Mitutoyo SURFTEST SJ-301, dále bylo používáno posuvné měřidlo Mitutoyo model 500-161-30 a číselníkový úchylkoměr SOMET 60/0,001 ČSN 251816.

### 7.1 Drsnoměr

Je to vysoce výkonný drsnoměr s vestavěnou tiskárnou, který má velký dotykový display.



Obr. 34 Drsnoměr Mitutoyo SJ-301 [25].

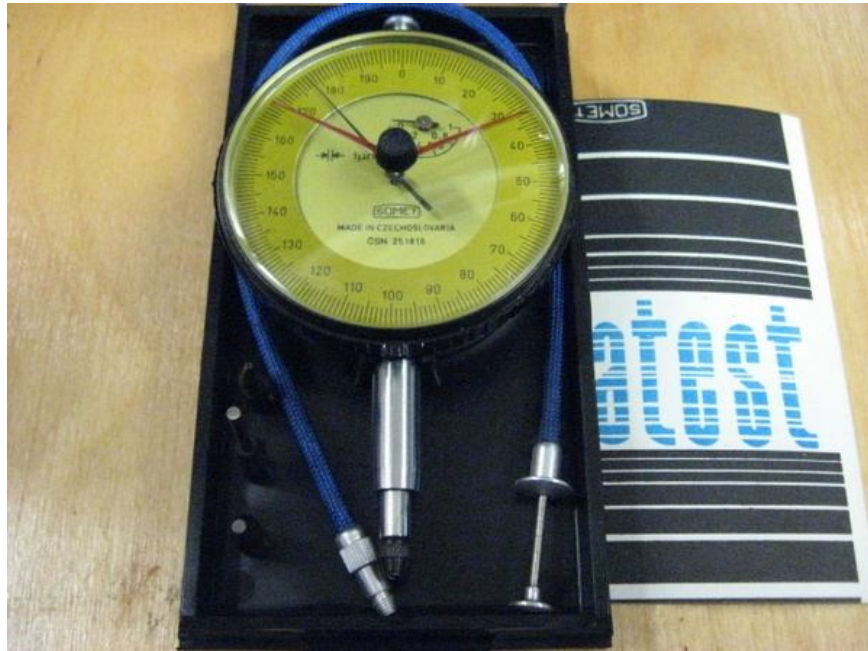
Tab. 5 Parametry drsnoměru [25].

Grafická analýza	BAC1, BAC2, ADC
Pracovní rozsah	Ra 0,01 - 75 $\mu\text{m}$ , Ry / Rz 0,02 - 300 $\mu\text{m}$
Délka posuvu	0,08; 0,25; 0,8; 2,5 a 8 mm
Vzorkování	x1, x3, x5; digitální filtr a zvětšení
Statistika	Minimální hodnota, maximální hodnota, směrodatná odchylka, rozložení frekvence, pass ratio



## 7.2 Úchylkoměr

Číselníkový úchylkoměr s měřicím rozsahem 0-1 a hodnotou dílku 0,001 mm. Úchylkoměr byl použit na měření házivosti pilových kotoučů a pásů.



Obr. 35 Úchylkoměr SOMET [26].

## 7.3 Posuvné měřidlo

Posuvné měřidlo bylo použito při měření šířky vzorků materiálu, měření šířky pilových kotoučů a pásů a k měření šířky drážky v řezaném materiálu.



Obr. 36 Posuvné měřidlo Mitutoyo CD - 15 CXR [25].

Tab. 6 Parametry posuvného měřidla.

Rozlišitelnost přístroje	0,01 mm
Největší dovolená chyba	$\pm 0,02$ mm
Rozsah měření	150mm

## 7.4 Univerzální zkušební stroj

Univerzální stroj ZWICK 1456 je používán k měření mechanických vlastností. Je využíván pro zkoušky tahem, ohybem a tlakem. Je určen k testování různých kompozitních materiálů a polymerů. Stroj je též vybaven možností zkoušek při snížené nebo zvýšené teplotě než je teplota okolí.



Obr. 37 Univerzální stroj ZWICK 1456 [27].

Tab. 7 Technické údaje stroje.

Maximální posuv příčnicku	800 mm/min
Snímače síly	2,5 a 20 kN
Teplotní komora	-80 / +250 °C
Test	Tah / Ohyb / Tlak



## 8 TYPY PILOVÝCH KOTOUČŮ A PÁSŮ

Pro experiment byly použity tři typy pilových kotoučů od firmy DudrTools a tři typy pilových pásů od firmy Simonds. Rozměry byly zvoleny záměrně totožné, pouze s odlišným počtem zubů, kvůli vyhodnocení řezivosti.

### 8.1 Pilové kotouče

V tabulce jsou uvedeny naměřené hodnoty maximální házivosti kotouče, jak zleva tak také zprava přímo na pile pomocí úchylkoměru SOMET.

*Tab. 8 Charakteristika pilového kotouče č. 1.*

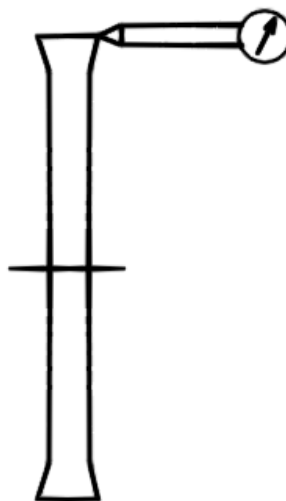
Průměr kotouče	180 mm
Průměr upínacího otvoru	25 mm
Počet zubů	18
Tloušťka těla	1,6 mm
Šířka zubu	2,2 mm
Skutečně naměřená šířka zubu	2,19 mm
Průměrná házivost(zleva)	0,041 mm
Průměrná házivost(zprava)	0,009 mm

*Tab. 9 Charakteristika pilového kotouče č. 2.*

Průměr kotouče	180 mm
Průměr upínacího otvoru	25mm
Počet zubů	24
Tloušťka těla	1,6 mm
Šířka zubu	2,2 mm
Skutečně naměřená šířka zubu	2,2 mm
Průměrná házivost (zleva)	0,018 mm
Průměrná házivost (zprava)	0,032 mm

*Tab. 10 Charakteristika pilového kotouče č. 3.*

Průměr kotouče	180 mm
Průměr upínacího otvoru	25 mm
Počet zubů	36
Tloušťka těla	1,6 mm
Šířka zubu	2,2 mm
Skutečně naměřená šířka zubu	2,2 mm
Průměrná házivost (zleva)	0,049 mm
Průměrná házivost (zprava)	0,041 mm



Obr. 38 Náčrt schématu  
háživosti pilového kotouče.

## 8.2 Pilové pásy

Jsou vhodné pro širokou škálu materiálů jako je například chromová ocel, uhlíková ocel, nástrojařská ocel, nerezová ocel, niklová ocel a jiné. Jsou používány k tvarovému řezání a k řezání menších objemů. Břit těchto pásů má vyšší odolnost vůči opotřebení. V tomto experimentu je stejně jako pilové kotouče použijí pro dělení kompozitů.

Tab. 11 Charakteristika prvního pilového pásu.

Šířka pásu	19 mm
Tloušťka pásu	0,9 mm
Délka pásu	2360 mm
Počet zubů na palec	6/10
Průměrná házivost (zleva)	0,035 mm
Průměrná házivost (zprava)	0,047mm

Tab. 12 Charakteristika druhého pilového pásu.

Šířka pásu	19 mm
Tloušťka pásu	0,9 mm
Délka pásu	2360 mm
Počet zubů na palec	5/8
Průměrná házivost (zleva)	0,194 mm
Průměrná házivost (zprava)	0,043 mm

*Tab. 13 Charakteristika třetího pilového pásu.*

Šířka pásu	19 mm
Tloušťka pásu	0,9 mm
Délka pásu	2360 mm
Počet zubů na palec	4/6
Průměrná házivost (zleva)	0,046 mm
Průměrná házivost (zprava)	0,003 mm

## 9 POUŽITÉ MATERIÁLY

Byla změřena tloušťka zkušební vzorku V a provedena tahová zkouška. Vzhledem k rozdílným tloušťkám nebylo u některých materiálů možné upnout do čelistí zkušební vzorek, proto nebyla provedena ani tahová zkouška.

*Tab. 14 Charakteristika použitých materiálů.*

Materiál	Tloušťka materiálu V [mm]	Mez pevnosti v tahu [MPa]	Modul pružnosti v tahu [MPa]
Smrkové dřevo	8,95±0,05	103	84
Dubové dřevo	8,07±0,09	132	108
Skelný prepreg+ voština	9,05±0,07	496	8,07
Juta + korek	11,24±0,04	48-62	3300- 5600
Hybridní tkanina	1,87±0,03	29250	307,5
CFRP uhlíková vlákna	1,42±0,01	17500	176,5
(UP_GF 25%) skel- ný prepreg	19,91±0,09	-	12500

Skelný prepreg + voština. Jádro materiálu tvoří voština. Matricí je skelný prepreg.



*Obr. 39 Skelný prepreg, voština.*

Juta+ korek. Juta je použita jako výztuž, matrice je epoxidová pryskyřice. V jádru materiálu je použitý korek.



*Obr. 40 Juta, korek.*

Hybridní tkanina, která má použítu výztuž karbon a aramid, které jsou v epoxidové pryskyřici.



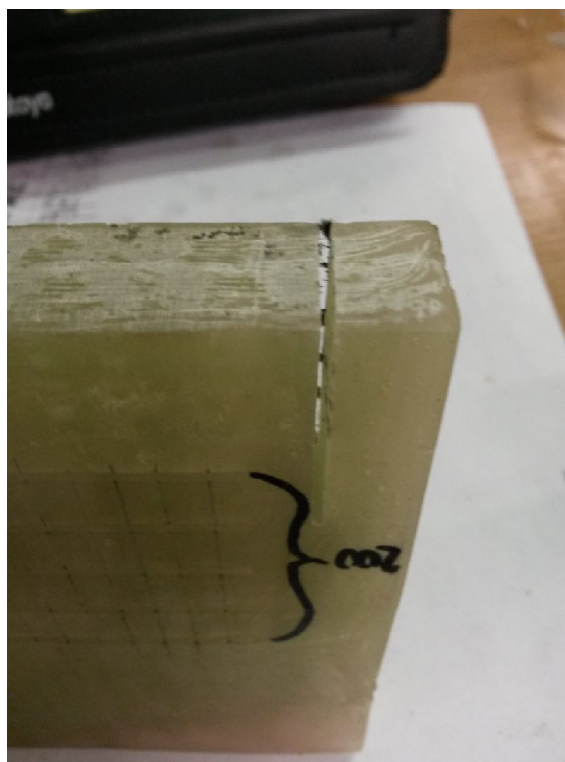
*Obr. 41 Hybridní tkanina.*

CFRP - uhlíková vlákna. Je to kompozit plněný uhlíkem.



*Obr. 42 Kompozit plněný uhlíkem.*

Sklolaminátový vodící pás SMC (UP GF 25) - vyztuženo 25% skelných vláken nenasycených polyesterových lisovacích směsí.



*Obr. 43 Kompozit plněný sklem.*

*Tab. 15 Charakteristika kompozitu plněného sklem.*

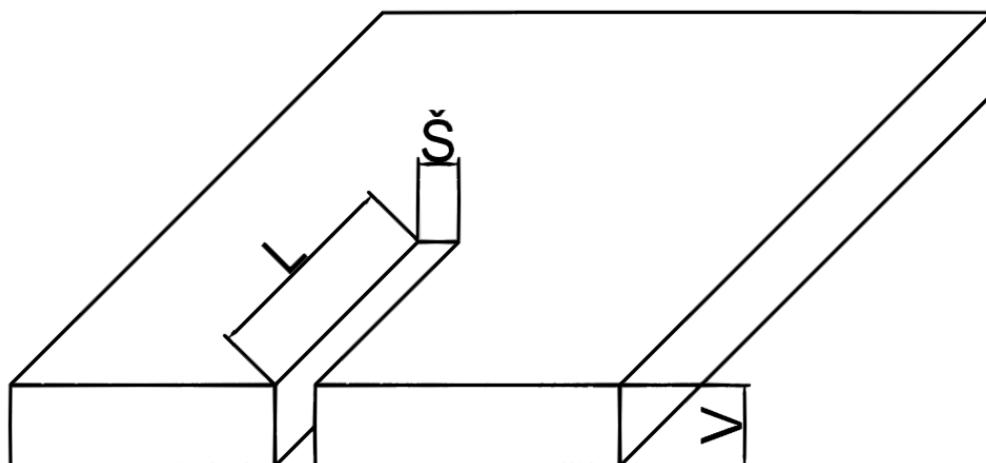
Modul pružnosti v tahu [MPa]	12 500
Pevnost v ohybu [MPa]	200
Rázová houževnatost [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	90
Hustota [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	2000
Tepelná roztažnost [ $\text{K}^{-1}$ ]	$18\cdot 10^{-6}$
Tloušťka materiálu V [mm]	$19,91\pm 0,09$



## 10 ŘEZÁNÍ A VYHODNOCOVÁNÍ VÝSLEDKŮ

Hlavním úkolem bylo řezat kompozitní materiály a sledovat opotřebení pilového nástroje. Jako zkušební vzorky k porovnání s kompozity bylo vybráno měkké smrkové dřevo a tvrdý vzorek z dubového dřeva.

Hodnotila se šířka řezané drážky  $\check{S}$ , materiál byl prořezán do délky  $L$ , která byla stanovena na 80 mm, jakmile se kotouč nebo pás prořezal do téhle hloubky, tak byla pila zastavena a posuvným měřidlem změřena šířka drážky  $\check{S}$ . Šířka drážky byla vyhodnocena z deseti měření. Výška  $V$  materiálu byla vyhodnocena z deseti měření posuvným měřidlem. Dále byla měřena střední aritmetická úchylka povrchu ( $R_a$ ) a výška nerovnosti profilu ( $R_z$ ). Na závěr se pak hodnotila vizuálně kvalita řezu a pro zpřesnění i kvalita řezu pod mikroskopem, při 30ti násobném zvětšení.



Obr. 44 Náčrt schématu řezané drážky do materiálu.

Písmeno  $L$  na obrázku znázorňuje délku řezu pilového nástroje, která byla stanovena na 80 mm. Písmeno  $\check{S}$  znázorňuje měřenou šířku drážky, která je měřena posuvným měřidlem. A písmeno  $V$  znázorňuje výšku vzorku materiálu.



Tab. 16 Hodnocení řezivosti kotouče č. 1.

Materiál	Šířka řezané drážky Š [cm]	Ra[ $\mu\text{m}$ ]	Rz[ $\mu\text{m}$ ]	Hodnocení kvality řezu
Smrkové dřevo	2,68 $\pm$ 0,01	5,38 $\pm$ 0,70	29,74 $\pm$ 3,82	Kvalitní řez, okraje s méně znatelnými otřepy, mírně spálená místa
Dubové dřevo	2,70 $\pm$ 0,02	/neměřitelné/	/neměřitelné/	Kvalitní řez, otřep jen ze spodního okraje, velká drsnost v řezu
Skelný prepreg+ voština	3,28 $\pm$ 1,5	/neměřitelné/	/neměřitelné/	Otřep v celé šířce řezu, na voštině i skelném prepregu
Juta + korek	2,80 $\pm$ 0,01	17,85 $\pm$ 8,15	101,27 $\pm$ 39,97	V řezu juty je znatelný otřep, v místě korku kvalitní řez, velká drsnost
Hybridní tkanina	2,90 $\pm$ 0,02	/neměřitelné/	/neměřitelné/	Pryskyřice se netavila, vlákna značně otřepeny
CFRP uhlíková vlákna	3,01 $\pm$ 0,01	4,82 $\pm$ 3,95	25,44 $\pm$ 12,33	Kvalitní čistý řez bez značných poškození

Tab. 17 Hodnocení řezivosti kotouče č. 2.

Materiál	Šířka řezané drážky Š [cm]	Ra[ $\mu\text{m}$ ]	Rz[ $\mu\text{m}$ ]	Hodnocení kvality řezu
Smrkové dřevo	2,54 $\pm$ 0,01	4,16 $\pm$ 1,35	25,41 $\pm$ 8,78	Velmi kvalitní řez, bez spálených míst, kvalitnější než u prvního kotouče
Dubové dřevo	2,53 $\pm$ 0,01	12,27 $\pm$ 5,53	61,2 $\pm$ 14,51	Řez kvalitní, čistý, bez otřepů, na spodní straně viditelný mírný odštěp, velká drsnost
Skelný prepreg+ voština	2,55 $\pm$ 0,01	/neměřitelné/	/neměřitelné/	Otřepy v celé šířce, řez je kvalitnější než u prvního kotouče.
Juta + korek	2,43 $\pm$ 0,01	5,85 $\pm$ 2,32	31,66 $\pm$ 12,40	Čistý řez bez poškození, korek není vytrhán, pod mikroskopem pozorovatelný otřep juty
Hybridní tkanina	2,58 $\pm$ 0,10	4,96 $\pm$ 3,11	31,02 $\pm$ 18,33	Pryskyřice bez tavení, otřep znatelný, kvalita znatelně lepší než u prvního kotouče

CFRP uhlíková vlákna	2,61±0,02	3,83±3,64	22,38±19,25	Kvalitní řez, mírné odštípnutí na vstupu a výstupu kotouče z materiálu
----------------------	-----------	-----------	-------------	--

Tab. 18 Hodnocení řezivosti kotouče č. 3.

Materiál	Šířka řezané drážky Š [cm]	Ra[μm]	Rz[μm]	Hodnocení kvality řezu
Smrkové dřevo	2,90±0,01	3,47±0,84	19,28±5,00	Nejkvalitnější čistý řez v porovnání s ostatními kotouči, pod mikroskopem viditelné otřepy
Dubové dřevo	3,16±0,01	3,22±1,01	25,92±7,75	Nejkvalitnější řez, čistý, bez otřepů
Skelný prepreg+ voština	3,05±0,02	/neměřitelné/	/neměřitelné/	Otřepy jen na voštině, skelný prepreg má mírné místně otřepy, nejvíce kvalitní řez v porovnání s ostatními kotouči
Juta + korek	2,69±0,02	5,03±3,76	26,89±19,11	Žádný otřep ani na jutě ani na korku, řez v porovnání s ostatními kotouči je nejkvalitnější
Hybridní tkanina	2,79±0,01	3,54±1,53	21,27±9,74	Tkanina je otřepena jen na spodní části, horní část řezu je kvalitní a bez otřepu
CFRP uhlíková vlákna	2,91±0,01	3,17±2,73	20,44±18,27	Kvalitní, čistý řez. Delaminace v určitém místě je způsobena nekvalitní výrobou vzorku

Tab. 19 Hodnocení řezivosti pásu č. 1.

Materiál	Šířka řezané drážky Š [cm]	Ra[μm]	Rz[μm]	Hodnocení kvality řezu
Smrkové dřevo	1,34±0,02	15,65±4,97	76,22±24,86	Nekvalitní řez, značné otřepy, velká drsnost
Dubové dřevo	1,36±0,01	5,57±2,77	29,39±15,87	Řez s viditelnými otřepy ze spodní strany
Skelný prepreg+ voština	1,44±0,01	10,82±1,07	55,83±13,18	Viditelné otřepy skelného prepregu i voštiny, řez nekvalitní

Juta + korek	1,39±0,01	/neměřitelné/	/neměřitelné/	Jasně otřepy juty, velká drsnost, vytrhaný korek
Hybridní tkanina	1,30±0,01	/neměřitelné/	/neměřitelné/	Značně viditelné otřepy, vytrhaná tkanina, nekvalitní řez
CFRP uhlíková vlákna	1,41±0,03	7,80±2,84	38,09±14,64	Čistý řez bez větších poškození, bez známky delaminace ani jiného poškození
(UP_GF 25%) skelný prepreg	1,39±0,01	5,66±1,74	32,20±7,60	Viditelný otřep skelných vláken z jedné strany, řez kvalitní bez dalšího poškození

Tab. 20 Hodnocení řezivosti pásu č. 2.

Materiál	Šířka řezané drážky Š [cm]	Ra[μm]	Rz[μm]	Hodnocení kvality řezu
Smrkové dřevo	1,45±0,02	23,05±5,74	106,61±22,36	Značné otřepy, zvláště z pravé strany, nečistý řez, velká drsnost
Dubové dřevo	1,45±0,01	17,84±4,28	89,41±16,61	Řez s malými otřepy z pravé strany, méně kvalitní řez než u prvního pásu
Skelný prepreg+ voština	1,46±0,01	/neměřitelné/	/neměřitelné/	Nekvalitní řez, velké otřepy skelného prepregu i voštiny
Juta + korek	1,41±0,01	/neměřitelné/	/neměřitelné/	Korek vytrhaný, velká drsnost povrchu, juta vytrhaná
Hybridní tkanina	1,33±0,01	12,68±5,25	62,70±20,68	Viditelné otřepy z pravé strany, řez kvalitnější než u prvního pásu
CFRP uhlíková vlákna	1,42±0,02	9,06±3,12	50,86±16,10	Otřep viditelný jen pod mikroskopem, čistý řez, žádné jiné poškození
(UP_GF 25%) skelný prepreg	1,40±0	4,66±1,16	24,36±5,56	Otřep minimální, velmi kvalitní řez bez dalšího poškození

Tab. 21 Hodnocení řezivosti pásu č. 3.

Materiál	Šířka řezané drážky Š [cm]	Ra[ $\mu\text{m}$ ]	Rz[ $\mu\text{m}$ ]	Hodnocení kvality řezu
Smrkové dřevo	1,55±0,03	20,63±5,75	104,90±28,32	Značné otřepy, zvláště z pravé strany, nečistý řez, velká drsnost
Dubové dřevo	1,57±0,02	/neměřitelné/	/neměřitelné/	Malé otřepy, nekvalitní řez, velká drsnost
Skelný pre-preg+ voština	1,56±0,01	/neměřitelné/	/neměřitelné/	Velké otřepy skelného prepregu i voštiny, nekvalitní řez
Juta + korek	1,48±0,01	/neměřitelné/	/neměřitelné/	Velké otřepy juty, velká drsnost, kotek vytrhán, v porovnání s pásy je zde nejhorší kvalita řezu
Hybridní tkanina	1,39±0,01	14,12±6,92	77,40±39,15	Jasně viditelné otřepy, méně kvalitní řez
CFRP uhlíková vlákna	1,43±0,02	9,79±2,63	50,53±14,09	Pod mikroskopem viditelný otřep, známky delaminace, která je způsobena špatně zvolenou technologií výroby
(UP_GF 25%) skelný prepeg	1,6±0,01	4,66±1,16	24,36±5,56	Otřep skelných vláken z pravé strany řezu je velký, velká delaminace,

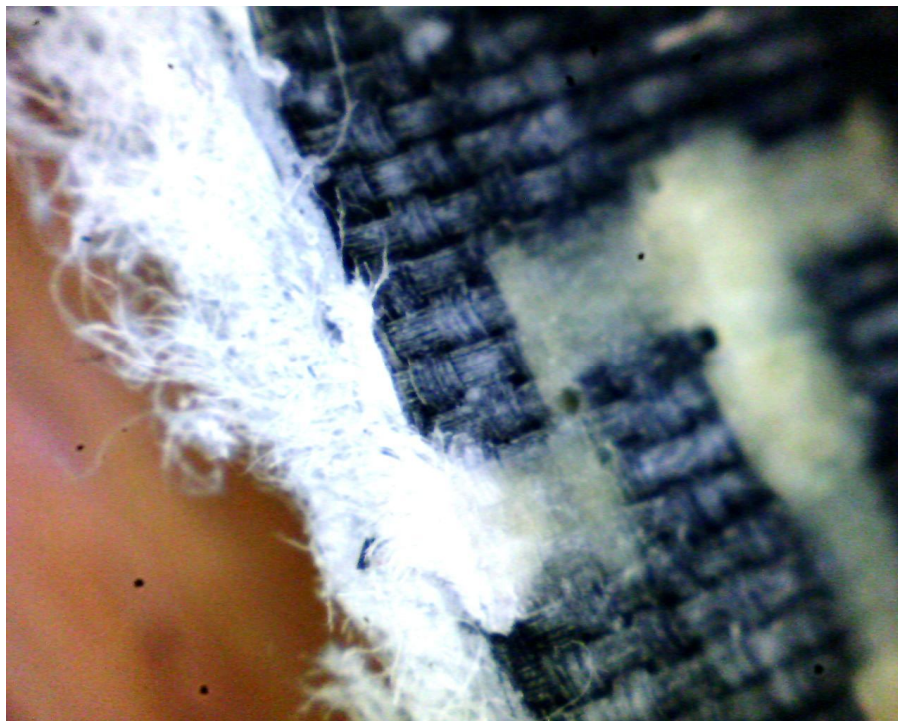
## 11 VÝSLEDKY EXPERIMENTU

Při řezání kotouči nebylo znát ani u jednoho kotouče žádné znehodnocení nebo znečištění povrchu. Při podrobném zkoumání opotřebení pod mikroskopem nebyly také znát známky poškození.

K hodnocení kvality řezu byl první pilový kotouč s 18ti zuby vyhodnocen za nejméně vhodný, k řezání kompozitních materiálů, všechny řezy měly největší drsnost povrchu ve srovnání s jinými pilovými kotouči. Na materiálech byla znát delaminace, místní spálená místa a velké otřepy.

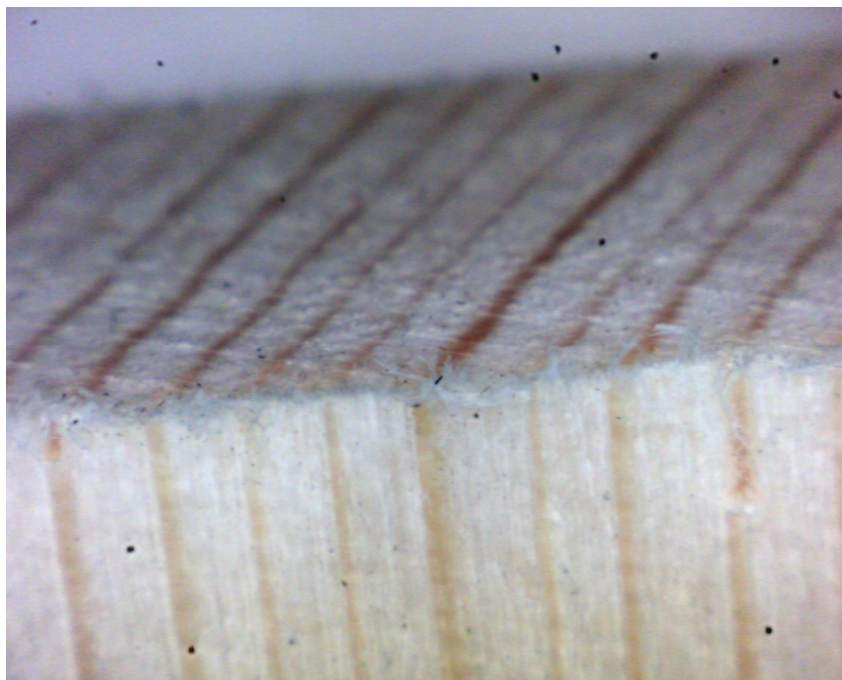


*Obr. 45 Spálená místa ve zkušebním smrkovém vzorku, řez prvního kotouče.*

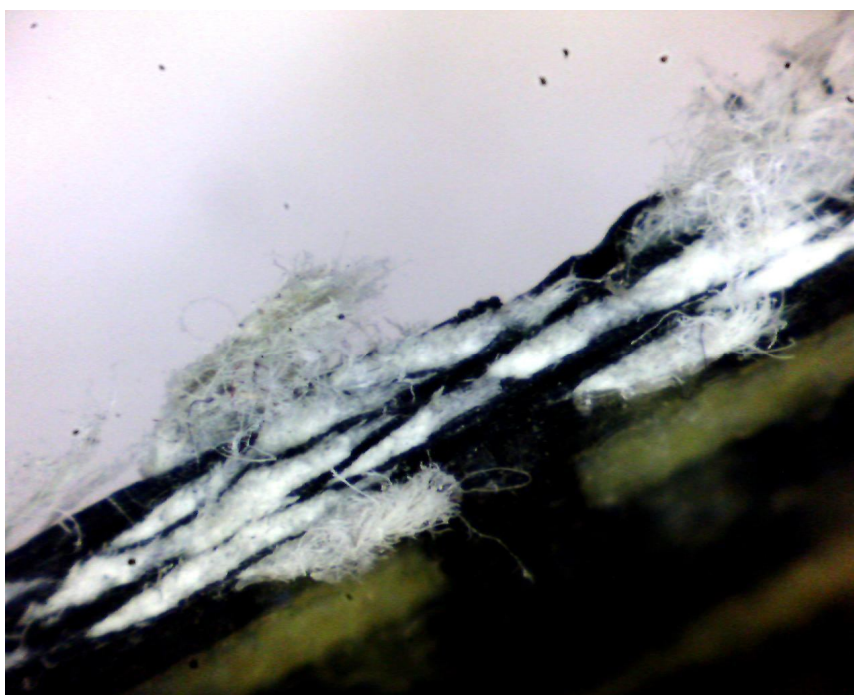


*Obr. 46 Vytrhaná vlákna hybridní tkaniny v celé šířce řezu,  
řez prvního kotouče.*

Třetí pilový kotouč s 36ti zuby byl jasně vyhodnocen za nejvhodnější variantu při řezání všech typů kompozitních materiálů. Všechny řezané vzorky měly minimální známky delaminace, nejmenší drsnosti povrchu a při optickém hodnocení nejkvalitnější povrch řezu.



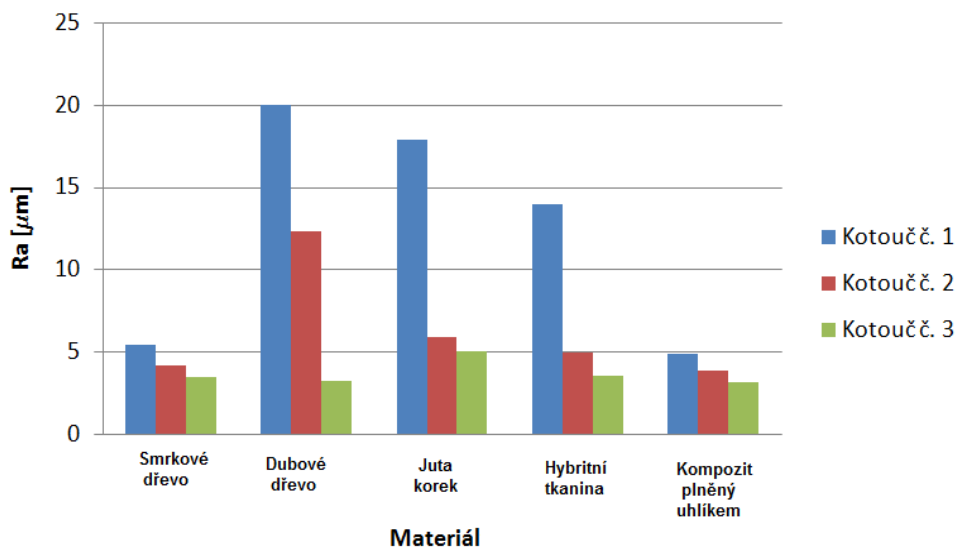
*Obr. 47 Čistý řez kotoučem s 36ti zuby u zkušebního smrkového vzorku.*



*Obr. 48 Místní vytrhání hybridní tkaniny.*

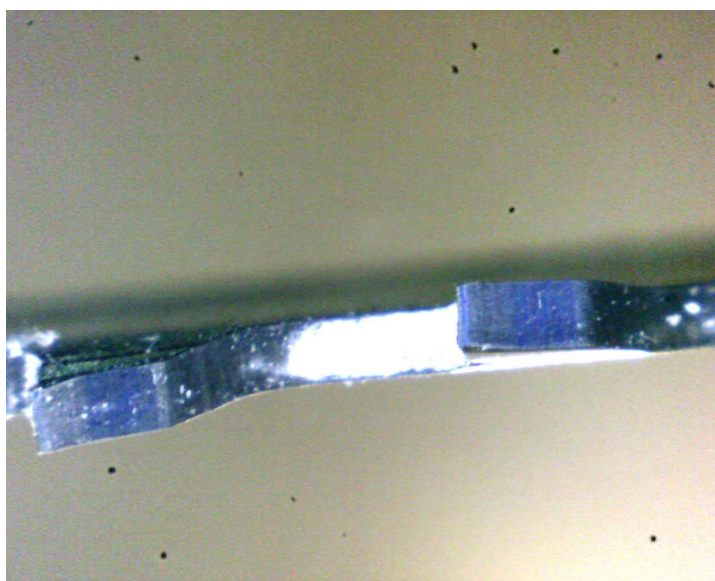


### Závislost drsnosti povrchu na typu materiálu řezaných pilovými kotouči

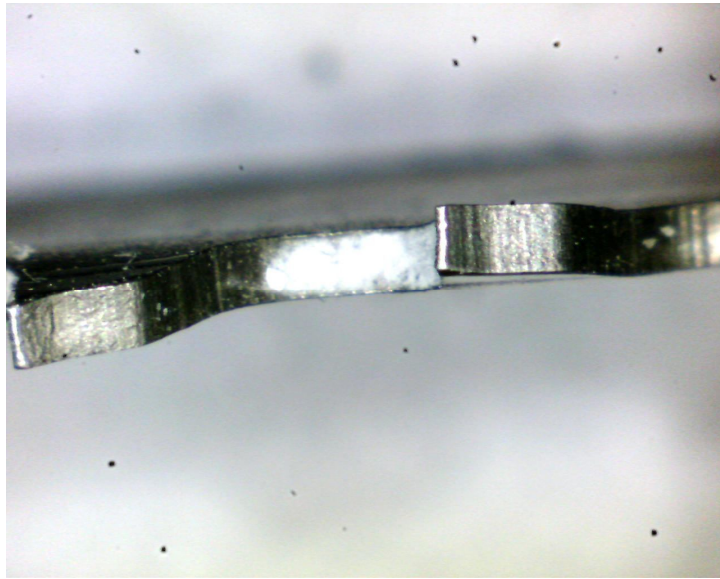


Obr. 49 Závislost drsnosti povrchu na typu materiálu řezaných pilovými kotouči.

Při řezání pilovými pásy není znát poškození ostří zubů nebo nějaké jiné poškození nástroje. Až při opakovaném řezání kompozitu plněného sklem lze pod mikroskopem sledovat otupení ostří řezného nástroje. Poškození ostří lze sledovat na každém pilovém pásu pod 30ti násobným zvětšením.

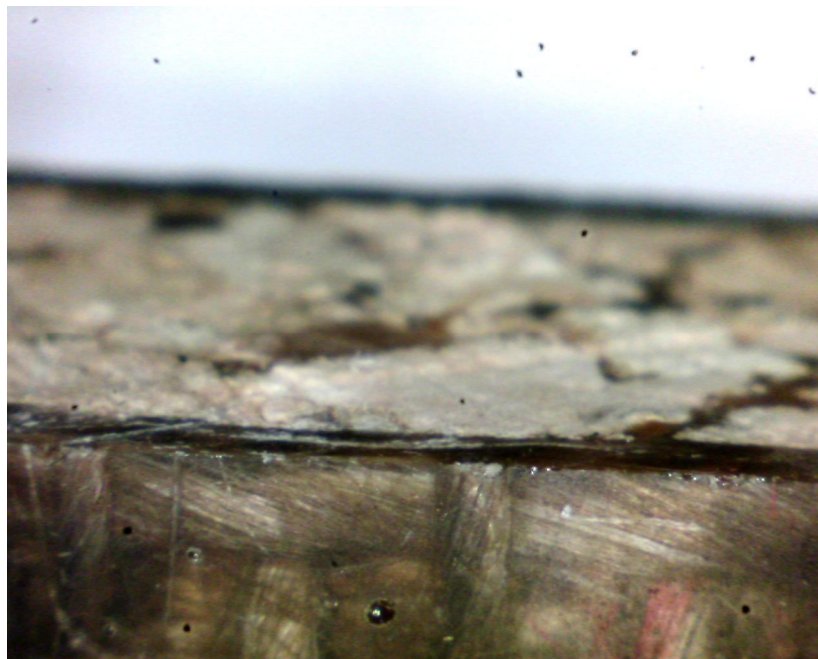


Obr. 50 Zuby pilového pásu před řezáním.



*Obr. 51 Otupené ostří pilového pásu po opakovaných řezech kompozitů.*

U pilových pásů byl k řezání dřevěných zkušebních vzorků ze smrkového a dubového dřeva nejvíce vhodný první pilový pás se 6/10 zuby na palec. U kompozitních vzorků byl druhý pilový pás se 5/8 zuby na palec více vhodný. Lze tak uvést, že na kompozity je vhodnější druhý pilový pás s 5/8 zuby na palec, ale k všestrannějšímu použití by se více hodil první pilový pás.



*Obr. 52 Čistý řez prvního pilového pásu na materiálu*

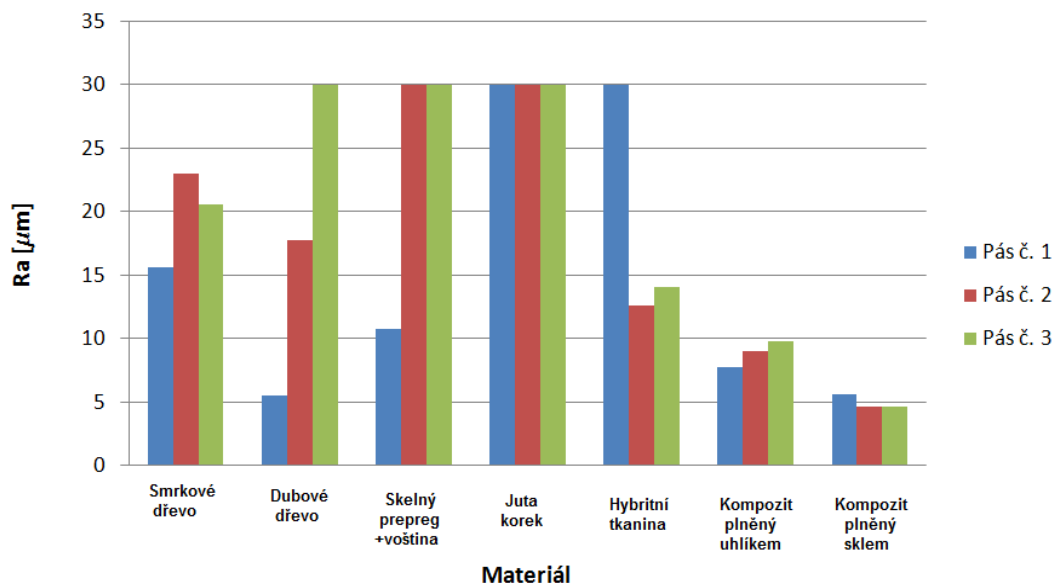


*juta- korek.*



*Obr. 53 Řez třetího pilového pásu na materiálu juta korek.*

### Závislost drsnosti povrchu na typu materiálu řezaných pilovými pásy



*Obr. 54 Závislost drsnosti povrchu na typu materiálu řezaných pilovými pásy.*

## ZÁVĚR

V této bakalářské práci se hodnotila řezivost pilových kotoučů a pásů na kompozitních materiálech. Práce se dělí na dvě části. V úvodu je to teoretická část a následuje praktická část. V teoretické části bylo popsáno obecné dělení materiálu řezáním. Byly popsány typy a druhy obráběcích nástrojů, rozteče zubů a tvary. Dále byla podrobně charakterizována výroba kompozitních materiálů. Již z teoretické části bylo zřejmé, že obrábění různých druhů kompozitů pilovými kotouči a pásy bude problematické z hlediska kvality řezu.

V praktické části byly popsány pilové stroje, jako je stolní kotoučová pila a pásová pila na kov. A na nich použité druhy pilových pásů a kotoučů. Charakterizovaly se další měřicí stroje a nástroje jako je drsnoměr, posuvné měřidlo, úchylkoměr a univerzální zkušební stroj, na kterém byla provedena tahová zkouška. Ta byla omezena tahovou silou zkušebního stroje, a také problémem upnutí kompozitního vzorku do upínacích kleští, vzhledem k různým šířkám vzorků. U řezacích nástrojů byla měřena házivost a šířka samotného nástroje. Toho bylo využito při měření šířky drážky v řezaném materiálu. Samotné řezání se provedlo se třemi typy pilových kotoučů a třemi typy pilových pásů. Typy nástrojů byly zvoleny tak, aby se lišily jen různými počty zubů. Tak šlo nejlépe hodnotit kvalitu řezu a porovnat který nástroj je nejvíce vhodný.

Srovnáním tří pilových kotoučů byl vyhodnocen třetí nástroj s 36ti zuby jako nejvhodnější k řezání všech typů kompozitních materiálů. Nejméně vhodným pak byl první kotouč s 18ti zuby. Mezi pilovými pásy byl nejlépe vyhodnocen první pilový pás s 6/10 zuby na palec k řezání dřevěných vzorků a některých kompozitů. Druhý pilový pás s 5/8 zuby na palec je vhodnější pouze na kompozitní materiály. Dá se tak říct, že k všestrannějšímu použití je vhodnější první pilový pás. Při porovnání řezů mezi pásy a kotouči jsou jednoznačně kvalitnější řezy s kotouči. Proto je nejvýhodnější řezání kompozitů na stolní kotoučové pile.

Vyhodnocení řezivosti nástroje bude sloužit k výběru ideálního řezného nástroje pro řezání určitého typu kompozitního materiálu.

Závěrem lze hodnotit, že celý proces proběhl bez větších komplikací. Jen při výměně řezných nástrojů bylo nutné odborné pomoci.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] HUMÁR, A. *Obrábění vláknově vyztužených kompozitů: Machining fiberein forced-composites*: teze přednášky k profesorskému jmenovacímu řízení v oboru strojírenská technologie. Brno: VUTIUM, 2004. 26 s. ISBN 80\_214-2740-x.
- [2] EHRENSTEIN, GOTTFRIED W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [3] RICHARD, A. BAREŠ, *Kompozitní materiály*. SNTL Praha: NAKLADATELSTVÍ TECHNICKÉ LITERATURY, N. P. 1988. 328s. Typové číslo: L17-B3-IV-31/72231
- [4] 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
- [5] SEDLÁČEK, J. *Nástroje pro obrábění kompozitních materiálů* [online]. [cit. 2015-10-12]. Dostupné z <http://www.mmspektrum.com/clanek/nastroje-pro-obrabeni-kompozitnich-materialu.html>
- [6] SEDLÁČEK, J. *Problémy při obrábění kompozitních materiálů* [online]. [cit. 2015-10-14]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/problemy-pri-obrabeni-kompozitnich-materialu.html>
- [7] *Všeobecný a základní popis materiálů používaných při výrobě kompozitů*. [online]. [cit. 2015-10-18]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/74-Vseobecny-a-zakladni-popis-materialu-pouzivanych-pri-vyrobe-kompozitu.html>
- [8] KOŘÍNEK, ZDENĚK. *Kompozity: Historie*. [online]. [cit. 2015-11-18]. Dostupné z: <http://www.volny.cz/zkorinek/historie.pdf>
- [9] JANOVEC, J. - CEJP, J. - STEIDL, J.: *Perspektivní materiály*, Praha, Vydavatelství ČVUT, 2001
- [10] PTÁČEK, LUDĚK. *Nauka o materiálu. II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. 392 s. ISBN 80-7204-568-3
- [11] KRATOCHVÍL, B.; ŠVORČÍK, V.; VOJTĚCH, D.. *Úvod do studia materiálů*. Praha: VSCHT, 2005. 190 s. ISBN 80-7080-568-4

- [12] CHUNG, DEBOAH D. L. *Composite materials: functional materials for modern technologies*. London: Springer, 2003. 289 s. ISBN 185233665X
- [13] LAŠ, V.: *Mechanika kompozitních materiálů*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2004. ISBN 80-7043-273 - X.
- [14] ŘASA, J., GABRIEL, V.: *Strojírenská technologie 3*, 1. díl. SCIENTIA Pedagogické nakladatelství, Praha 2002. ISBN 80-7183-337-1
- [15] Technologie plošného tváření [online]. Technická univerzita Liberec, fakulta strojní. [cit.2015-11-19]. Dostupné z:  
[www.ksp.vslib.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tk/sekce/06.htm](http://www.ksp.vslib.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tk/sekce/06.htm)
- [16] Technické informace k pilovým listům [online]. 2003 [cit. 2015-11-19]. Dostupné z:  
[www.pilana.cz/cz/technicke-informace-k-pilovym-listum](http://www.pilana.cz/cz/technicke-informace-k-pilovym-listum)
- [17] Řezné nástroje na kov [online]. 2006 [cit. 2015-11-19]. Dostupné z:  
[www.pilana.cz/download=cz/pilana\\_rezne\\_nastroje\\_kov.pdf](http://www.pilana.cz/download=cz/pilana_rezne_nastroje_kov.pdf)
- [18] MÍŠEK, BOHUMIL. *Polymery, keramika, kompozity*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1993, 155 s. ISBN 80-214-0521-x.
- [19] Glassfiber. In: Wikipedia: the free encyklopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2015-12-06]. Dostupné z:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Glass\\_fiber](http://en.wikipedia.org/wiki/Glass_fiber).
- [20] GRÉGR, JAN. Povrchové vlastnosti uhlíkových vláken [online]. Říjen 2004, [cit. 2015-12-06]. Dostupné z:  
[http://centrum.tul.cz/centrum/centrum/3Aplikace/3.1\\_zaverecne\\_zpravy%5B3.1.09%5D.pdf](http://centrum.tul.cz/centrum/centrum/3Aplikace/3.1_zaverecne_zpravy%5B3.1.09%5D.pdf).
- [21] HAVEL COMPOSITES CZ s.r.o. Technologie výroby kompozitů. [online]. [vid 2015-12-08]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/76-Technologie-jejich-popis-a-schema.html>.
- [22] HUMÁR, A., PÍŠKA, M., JÁNSKÝ, M., PODRÁBSKÝ, T., ČECH, V. *Technologie zpracování nových kompozitních materiálů tuzemské výroby. Závěrečná zpráva grantového projektu GAČR č. 101/98/0855*. BRNO: Vysoké učení technické v Brně, Ústav strojírenské technologie, 2000. 154 s.
- [23] MURPHY, J.: *The Reinforced Plastics Handbook*. Elsevier Science Ltd. Oxford, United Kingdom, Second Edition, 1998.674 p. ISBN 1 85617 348 8.

[24] PROMA [online]. 2016. Dostupné z: <http://www.promacz.cz/ppk-175t-pasova-pilana-kov.html>

[25] MITUTOYO [online]. 2016. Dostupné z:  
[http://gps.fme.vutbr.cz/STAH\\_INFO/2609\\_Mitutoyo\\_Drsnomery.pdf](http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2609_Mitutoyo_Drsnomery.pdf)

[26] LUTOMA [online]. 2016. Dostupné z: <http://eshop.lutoma.cz/ciselnikovy-uchylko-mer-600001-csn-251816>

[27]UTB UVI\_VYBAVENI\_2015 [online]. 2016. Dostupné z:  
[www.utb.cz/file/40095\\_1\\_1/](http://www.utb.cz/file/40095_1_1/)

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

HRC	Tvrlost podle Rockwella.
HB	Tvrlost podle Brinella
HSS	Vysocevýkonné rychlořezné oceli ( High Speed Steel Cobalt).
H	Výška řezaného materiálu [mm].
Š <sub>z</sub>	Průřez třísky odebírané jedním zubem [mm <sup>2</sup> ].
Ra	Střední aritmetická úchylka.
Rz	Výška nerovnosti profilu.

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

<i>Obr. 1 Bimetalový pilový pás [17].</i>	12
<i>Obr. 2 Geometrie zubů pilových pásů [17].</i>	13
<i>Obr. 3 Zuby standart [17].</i>	13
<i>Obr. 4 Zuby Hook [17].</i>	14
<i>Obr. 5 Variabilní zuby [17].</i>	14
<i>Obr. 6 Variabilní zuby s kladným</i>	15
<i>Obr. 7 Základní rozteče zubů [17].</i>	15
<i>Obr. 8 Typy rozvodu zubů [17].</i>	16
<i>Obr. 9 Řezání pilovým listem [14].</i>	16
<i>Obr. 10 Schéma pilového listu [16].</i>	17
<i>Obr. 11 Pilový list v řezu [14].</i>	17
<i>Obr. 12 Volba počtu zubů pilového listu [16].</i>	17
<i>Obr. 13 Pilové kotouče podle provedení břitů [14].</i>	20
<i>Obr. 14 Druhy pilových kotoučů [14].</i>	21
<i>Obr. 15 Tvary zubů pilových kotoučů [14].</i>	22
<i>Obr. 16 Tvary rozpínacích klínů [14].</i>	22
<i>Obr. 17 Dělení kompozitů podle tvaru a uspořádání výztuže [11].</i>	25
<i>Obr. 18 Rozdělení dle geometrie výztuže [11].</i>	25
<i>Obr. 19 Dělené vláknové výztuže [13].</i>	26
<i>Obr. 20 Typy tkaní [7].</i>	27
<i>Obr. 21 Vzduchový systém s vnějším mícháním [23].</i>	31
<i>Obr. 22 Vzduchový systém s vnitřním mícháním</i>	32
<i>Obr. 23 Vnitřní systém míchání bez tlakového vzduchu [23].</i>	32
<i>Obr. 24 Schéma ručního kladení [21].</i>	33
<i>Obr. 25 Schéma technologie lisování pomocí vakua [21].</i>	34
<i>Obr. 26 Schéma technologie navíjení [21].</i>	34
<i>Obr. 27 Schéma odstředivého lití [21].</i>	35
<i>Obr. 28 Schéma technologie tažením [21].</i>	36
<i>Obr. 29 Dělení materiálu [14].</i>	37
<i>Obr. 30 Delaminace [6].</i>	40
<i>Obr. 31 Fáze vzniku delaminace [6].</i>	40
<i>Obr. 32 Pásová Pila na kov.</i>	44

<i>Obr. 33 Univerzální dřevoobráběcí stroj</i> .....	45
<i>Obr. 34 Drsnoměr Mitutoyo SJ-301 [25]</i> .....	46
<i>Obr. 35 Úchylkoměr SOMET [26]</i> .....	47
<i>Obr. 36 Posuvné měřidlo Mitutoyo CD - 15 CXR [25]</i> .....	47
<i>Obr. 37 Univerzální stroj ZWICK 1456 [27]</i> .....	48
<i>Obr. 38 Náčrt schématu</i> .....	50
<i>Obr. 39 Skelný prepreg, voština</i> .....	52
<i>Obr. 40 Juta, korek</i> .....	53
<i>Obr. 41 Hybridní tkanina</i> .....	53
<i>Obr. 42 Kompozit plněný uhlíkem</i> .....	54
<i>Obr. 43 Kompozit plněný sklem</i> .....	54
<i>Obr. 44 Náčrt schématu řezané drážky do materiálu</i> .....	56
<i>Obr. 45 Spálená místa ve zkušebním smrkovém vzorku, řez prvního kotouče</i> .....	61
<i>Obr. 46 Vytrhaná vlákna hybridní tkaniny v celé šířce řezu</i> , .....	61
<i>Obr. 47 Čistý řez kotoučem s 36ti zuby u zkušebního smrkového</i> .....	62
<i>Obr. 48 Místní vytrhání hybridní tkaniny</i> .....	62
<i>Obr. 49 Závislost drsnosti povrchu na typu materiálu řezaných</i> .....	63
<i>Obr. 50 Zuby pilového pásu před řezáním</i> .....	63
<i>Obr. 51 Otupené ostří pilového pásu po opakovaných řezech</i> .....	64
<i>Obr. 52 Čistý řez prvního pilového pásu na materiálu</i> .....	64
<i>Obr. 53 Řez třetího pilového pásu na materiálu juta korek</i> .....	65
<i>Obr. 54 Závislost drsnosti povrchu na typu materiálu řezaných</i> .....	65



**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1 Doporučený počet zubů pro jednotlivé materiály [17].</i>	18
<i>Tab. 2 Závady pilových listů [17].</i>	19
<i>Tab. 3 Parametry pásové pily.</i>	44
<i>Tab. 4 Parametry stolní kotoučové pily.</i>	45
<i>Tab. 5 Parametry drsnoměru [25].</i>	46
<i>Tab. 6 Parametry posuvného měřidla.</i>	47
<i>Tab. 7 Technické údaje stroje.</i>	48
<i>Tab. 8 Charakteristika pilového kotouče č. 1.</i>	49
<i>Tab. 9 Charakteristika pilového kotouče č. 2.</i>	49
<i>Tab. 10 Charakteristika pilového kotouče č. 3.</i>	49
<i>Tab. 11 Charakteristika prvního pilového pásu.</i>	50
<i>Tab. 12 Charakteristika druhého pilového pásu.</i>	50
<i>Tab. 13 Charakteristika třetího pilového pásu.</i>	51
<i>Tab. 14 Charakteristika použitých materiálů.</i>	52
<i>Tab. 15 Charakteristika kompozitu plněného sklem.</i>	55
<i>Tab. 17 Hodnocení řezivosti kotouče č. 1.</i>	57
<i>Tab. 18 Hodnocení řezivosti kotouče č. 2.</i>	57
<i>Tab. 19 Hodnocení řezivosti kotouče č. 3.</i>	58
<i>Tab. 20 Hodnocení řezivosti pásu č. 1.</i>	58
<i>Tab. 21 Hodnocení řezivosti pásu č. 2.</i>	59
<i>Tab. 22 Hodnocení řezivosti pásu č. 3.</i>	60