

# **Vliv technologických parametrů na jakost obrobene- né plochy při CNC frézování kompozitů**

Bc. Vojtěch Novotný

---

Diplomová práce  
2016



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2015/2016

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Vojtěch Novotný**

Osobní číslo: **T14312**

Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Výrobní inženýrství**

Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Vliv technologických parametrů na jakost obrobených ploch při CNC frézování kompozitů**

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte teoretickou studii na dané téma
2. Připravte experiment a part programy pro CNC frézku
3. Obrobte kompozitní materiály frézami různých typů
4. Proveďte statistické vyhodnocení jakosti obrobených povrchů a výsledky diskutujte



Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. GROOVER, Mikell P. Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems. 5th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2013, XV, 1101 s. ISBN 978-1-118-23146-3.
2. KOCMAN, Karel. Technologické procesy obrábění. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 330 s. ISBN 978-80-7204-722-2.
3. SMID, P. CNC Programming Handbook: a Comprehensive Guide to Practical CNC programming. Industrial Press Inc. New York, 2003, 508 p., ISBN 0-8311-3158-6.
4. BÍLEK, Ondřej a Imrich LUKOVICS. Výrobní inženýrství a technologie. 1. vyd. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2014, 173 s. ISBN 978-80-7454-471-2.
5. THOMAS, Sabu. Polymer composites. Weinheim: Wiley-VCH, 2012, ISBN 978-3-527-64521-3.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Ondřej Bílek, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

8. ledna 2016

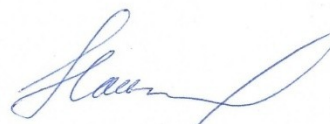
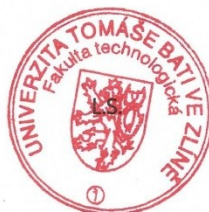
Termín odevzdání diplomové práce:

13. května 2016

Ve Zlíně dne 27. ledna 2016



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



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

Příjmení a jméno: Novotný Vojtěch

Obor: Výrobní inženýrství

## 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, považují 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 10. 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 nahlázení 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 výdělku jím 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 přihlídně k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Práce je zaměřena na testování nástrojů pro tři různé kompozitní materiály. Nejprve je stručně vysvětleno složení kompozitních materiálů, jejich výroba a použití. Plynule na to navazuje problematika obrábění těchto materiálů a teorie hodnocení struktury povrchu po frézování. Praktická část je členěna do třech základních testů, kdy se každý materiál hodnotí jako samostatný celek. Je vyhodnocena jakost povrchu, šířka drážky a v neposlední řadě delaminační faktor.

Klíčová slova:

kompozitní materiál, frézování, řezné podmínky, jakost povrchu

## **ABSTRACT**

Thesis is focused on testing tools for three different composite materials. At first there is brief description of the composition of the composite materials, their manufacture and use. Attention smoothly is continuing on the issue of machining these materials and theory evaluation of surface texture after milling. The practical section is divided into three basic tests, where each material is evaluated as a separate entity. There is evaluating quality of the surface, the groove width and factor of delamination.

Keywords:

composite materials, milling, cutting date, surface quality

Rád bych poděkoval panu Ing. Ondřeji Bílkovi Ph. D. za odborné vedení, trpělivost a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování diplomové práce věnoval.

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

# OBSAH

|  |           |
|--|-----------|
| <b>ÚVOD.....</b>   | <b>10</b> |
| <b>I TEORETICKÁ ČÁST.....</b>                                      | <b>12</b> |
| <b>1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY .....</b>                                | <b>13</b> |
| 1.1 KLASIFIKACE KOMPOZITŮ .....                                    | 14        |
| 1.2 VYZTUŽUJÍCÍ ČÁSTICE .....                                      | 15        |
| 1.2.1 Partikulové kompozity .....                                  | 15        |
| 1.2.2 Vláknové kompozity .....                                     | 16        |
| 1.2.3 Krátkovláknové kompozity .....                               | 17        |
| 1.2.4 Hybridní kompozity .....                                     | 18        |
| 1.2.5 Typ vláken pro polymerní kompozity .....                     | 18        |
| 1.3 MATRICE .....  | 21        |
| 1.3.1 Polymerní matrice .....                                      | 21        |
| 1.3.2 Silikátové matrice.....                                      | 22        |
| 1.3.3 Kovová matrice .....   | 23        |
| 1.3.4 Keramické matrice .....                                      | 23        |
| 1.3.5 Kompozity uhlík – uhlík .....                                | 24        |
| 1.4 VÝROBA KOMPOZITŮ .....   | 24        |
| <b>2 OBRÁBĚNÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ.....</b>                      | <b>28</b> |
| 2.1 VZNIK TŘÍSKY .....   | 29        |
| 2.2 CHLAZENÍ .....   | 32        |
| 2.3 ŘEZNÉ MATERIÁLY .....  | 32        |
| 2.4 TEPLO PŘI FRÉZOVÁNÍ KOMPOZITŮ.....                             | 34        |
| 2.5 DELAMINACE .....   | 34        |
| 2.6 OPOTŘEBENÍ ŘEZNÉHO NÁSTROJE .....                              | 35        |
| 2.6.1 Mechanismus opotřebení .....                                 | 35        |
| 2.6.2 Typy opotřebení .....  | 36        |
| <b>3 HODNOCENÍ STRUKTURY POVRCHU PO OBRÁBĚNÍ.....</b>              | <b>39</b> |
| 3.1 ZÁKLADNÍ POJMY .....   | 39        |
| 3.2 DEFINICE PARAMETRŮ STRUKTURY POVRCHU.....                      | 40        |
| 3.2.1 Výškové parametry .....                                      | 41        |
| 3.2.2 Délkové parametry .....                                      | 42        |
| 3.2.3 Tvarový parametr .....                                       | 42        |
| 3.3 PRAVIDLA HODNOCENÍ STRUKTURY POVRCHU .....                     | 43        |
| 3.3.1 Pravidlo 16%.....  | 43        |
| 3.3.2 Pravidlo maxima .....  | 43        |
| 3.4 HODNOCENÍ PARAMETRŮ .....                                      | 44        |
| <b>4 SHRUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI A CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI PRÁCE.....</b> | <b>47</b> |
| <b>II PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>                                     | <b>48</b> |
| <b>5 TESTOVANÝ MATERIÁL .....</b>                                  | <b>49</b> |



|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 5.1      | UHLÍKOVÝ KOMPOZIT .....                        | 49        |
| 5.2      | KOMPOZIT PLNĚNÝ SKLEM .....                    | 50        |
| 5.3      | SENDVIČOVÝ KOMPOZIT S KORKOVÝM JÁDREM .....    | 52        |
| <b>6</b> | <b>TESTOVANÉ NÁSTROJE .....</b>                | <b>53</b> |
| 6.1      | NÁSTROJ JS 522 (T1) .....                      | 53        |
| 6.2      | NÁSTROJ JC 880 (T2).....                       | 54        |
| 6.3      | NÁSTROJ JC 840 (T3).....                       | 55        |
| 6.4      | NÁSTROJ JC 860 (T4).....                       | 55        |
| 6.5      | NÁSTROJ JC 870 (T5).....                       | 56        |
| 6.6      | KONTROLA PRŮMĚRU NÁSTROJŮ .....                | 56        |
| <b>7</b> | <b>FRÉZOVÁNÍ VZORKŮ .....</b>                  | <b>57</b> |
| 7.1      | CNC FRÉZKA.....                                | 58        |
| 7.2      | NC PROGRAM.....                                | 59        |
| 7.3      | VOLBA ŘEZNÝCH PODMÍNEK .....                   | 59        |
| <b>8</b> | <b>VYHODNOCENÍ.....</b>                        | <b>61</b> |
| 8.1      | VYHODNOCENÍ CFRP .....                         | 62        |
| 8.2      | VYHODNOCENÍ GFRP .....                         | 66        |
| 8.3      | VYHODNOCENÍ CORECORK NL10 .....                | 69        |
| 8.4      | VYHODNOCENÍ OPOTŘEBENÍ NÁSTROJŮ .....          | 70        |
| 8.5      | VYHODNOCENÍ ŠÍŘKY DRÁŽEK .....                 | 71        |
| 8.6      | VYHODNOCENÍ DELAMINAČNÍHO FAKTORU .....        | 72        |
| <b>9</b> | <b>CELKOVÉ VYHODNOCENÍ.....</b>                | <b>74</b> |
|          | <b>ZÁVĚR .....</b>                             | <b>78</b> |
|          | <b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>          | <b>80</b> |
|          | <b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b> | <b>83</b> |
|          | <b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>                    | <b>85</b> |
|          | <b>SEZNAM TABULEK.....</b>                     | <b>87</b> |
|          | <b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>                      | <b>88</b> |

## ÚVOD

Materiál, jako komodita, je již od dávných dob jedním z nejdůležitějších faktorů ovlivňující komplexní pokrok. Tento fakt přetrvává i do současnosti a prakticky zasahuje do všech odvětví. Nové technologie vyžadují nové materiály, které budou splňovat náročné požadavky. Původní využití kompozitních materiálů bylo ve vojenském průmyslu, kde byly používány především na výrobu lodí. Postupem času se rozvinuly i do dalších částí průmyslu jako je automobilový, letecký, sportovní, elektrotechnický a jiný. Tento průnik do dalších průmyslových odvětví je zapříčiněn zejména díky svým unikátním vlastnostem. I proto jsou kompozitní materiály neustále vyvíjeny a mají obrovský potenciál díky nesčetnému množství kombinací. Díky tomu se kompozitní materiál řadí mezi velmi perspektivní materiály.

Kompozitním materiálem je myšlen materiál skládající se ze dvou, či více odlišných částí. Kompozitní materiál je ve většině případů brán jako polymerní matrice vyztužená vlákny. Přitom nejběžnější kompozitní materiál, který je takřka všude využíván, je železobeton. A to díky spojením dvou různých částí, jako je betonová matrice a železná výztuž. Toto spojení vytvořilo technologický převrat ve stavebním průmyslu, a to nejen díky jednoduchosti, ale i díky perfektním vlastnostem. Dalším převratným objevem byl sklolaminát, nebo linoleum.

Mechanické vlastnosti dnešních kompozitních materiálů jsou na velmi vysoké úrovni. Jejich chování se dá ovlivňovat pouhou změnou orientace, nebo jejich počtem vláken v matrici kompozitu. Vlákna lze orientovat pouze tak, jak bude výsledný výrobek zatěžován, popřípadě může být určitá část pružná a druhá pevná a tvrdá, bez nutnosti rozdělení výrobku. Kompozity nejsou jen materiály s vynikajícími vlastnostmi, ale lze je i designově upravovat tak, aby odolali i největší kritice z pohledu spotřebitele.

Z pohledu zpracovatelského je většina výrobků z kompozitních materiálů vyráběna technologiemi přímo do konečného tvaru. Avšak při vzrůstajících požadavcích na přesnost, funkčnost a jakost povrchu je nutné využít konvenčního obrábění. V této oblasti nastává určitá bariéra, neboť obrábění těchto materiálů vyžaduje naprosto odlišný přístup, než běžně známé přístupy a teorie. Publikací na toto téma stále přibývá, nicméně problémem je ve velkém množství různých variant matrice a vyztužujících vláken. Každá kombinace přináší určitou změnu v pohledu na obrábění a nutnost tak přizpůsobit technologické parametry. S tím souvisí i vývoj nových řezných materiálů.

V první části se práce zaměřuje na pochopení a stručné rozdělení kompozitních materiálů. Jasně vymezuje základní typy matric, nejen polymerních, a jejich vyztužujících vláken. Popisuje rozdíly mezi jednotlivými typy vláken, které mohou být částicová, krátkovláknitá nebo vláknová, popřípadě hybridní. Dalším bodem je rozbor technologie obrábění kompozitních materiálů. Tato část vysvětluje zvláštnosti při obrábění kompozitů jako je tvorba třísky, obtížnost použití chladicího média, nebo například tepelnou bilanci mezi nástrojem, obrobkem a třískou. Ukazuje na možnosti použití různých rezných materiálů a jejich opotřebení. V neposlední řadě vysvětluje základy pro hodnocení jakosti povrchu, které jsou potřeba pro praktickou část práce.

V praktické části jsou testovány vzorky kompozitních materiálů při obrábění stopkovou frézou. Hodnocena je jakost povrchu, přesněji řečeno, je testováno za jakých podmínek nástroj dokáže vyrobít lepší povrch. Test je prováděn u třech typů kompozitních materiálů, u materiálu s uhlíkovým vláknem, u materiálu se skleněným vláknem a u sendvičového materiálu s korkovým jádrem.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

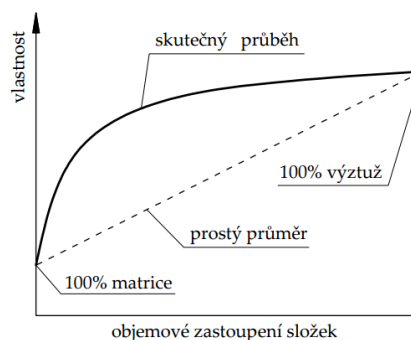
Slovem kompozit je myšlen materiál skládající se ze dvou či více fází. Takto složený materiál se nazývá kompozitní jen v tom případě, že fáze, z níž se skládá, mají fyzikálně, chemicky a mechanicky výrazně odlišné vlastnosti. Tedy i vlastnosti složeného materiálu jsou odlišné od vlastností jeho fází. Jednotlivé fáze mají různé funkce. Funkci výstužnou plní plniva, které mají vysokou tvrdost, pevnost, tuhost apod. Tato fáze je většinou nespojitá a zalita do spojité fáze, tedy matrice. [1]

Aby se složený materiál mohl nazývat kompozit, musí splňovat daná kritéria: [2] [2]

- Podíl výztuže musí být větší než 5%,
- mechanické, chemické a fyzikální vlastnosti matrice a vláken musí být výrazně odlišné,
- kompozitní materiál musí být připraven smícháním složek.

Většina takto složených materiálů, je vyráběna pro zlepšení některých vlastností, jako je tuhost, pevnost, tažnost nebo vysokoteplotní odolnost, popřípadě jejich kombinaci. Vlastnosti materiálů jsou silně závislé na geometrii výztuže. Velkou výhodou kompozitů je výrazné zvýšení vlastností při velmi nízkém energetickém vkladu. Výsledné vlastnosti závisí na rozložení a vzájemné interakci mezi matricí a vláknem. Dalším důležitým ukazatelem je koncentrace výztuže. Koncentrace výztuže je udávána v objemovém, nebo hmotnostním podílu. V závislosti na koncentraci je velmi důležitá homogenita systému. Nerovnoměrný systém by neměl být přípustěn, neboť výrazně zhoršuje ty vlastnosti, které jsou řízeny nejslabším článkem. Dále se uvažuje o orientaci a tvaru jednotlivých částic. [3][3]

Velkou výhodou těchto materiálů je synergický efekt. Ten způsobuje, že vlastnosti jednotlivých složek jsou horší, než vlastnosti těchto složek ve vzájemné spolupráci. Synergický efekt je znázorněn na obrázku číslo 1. [3]

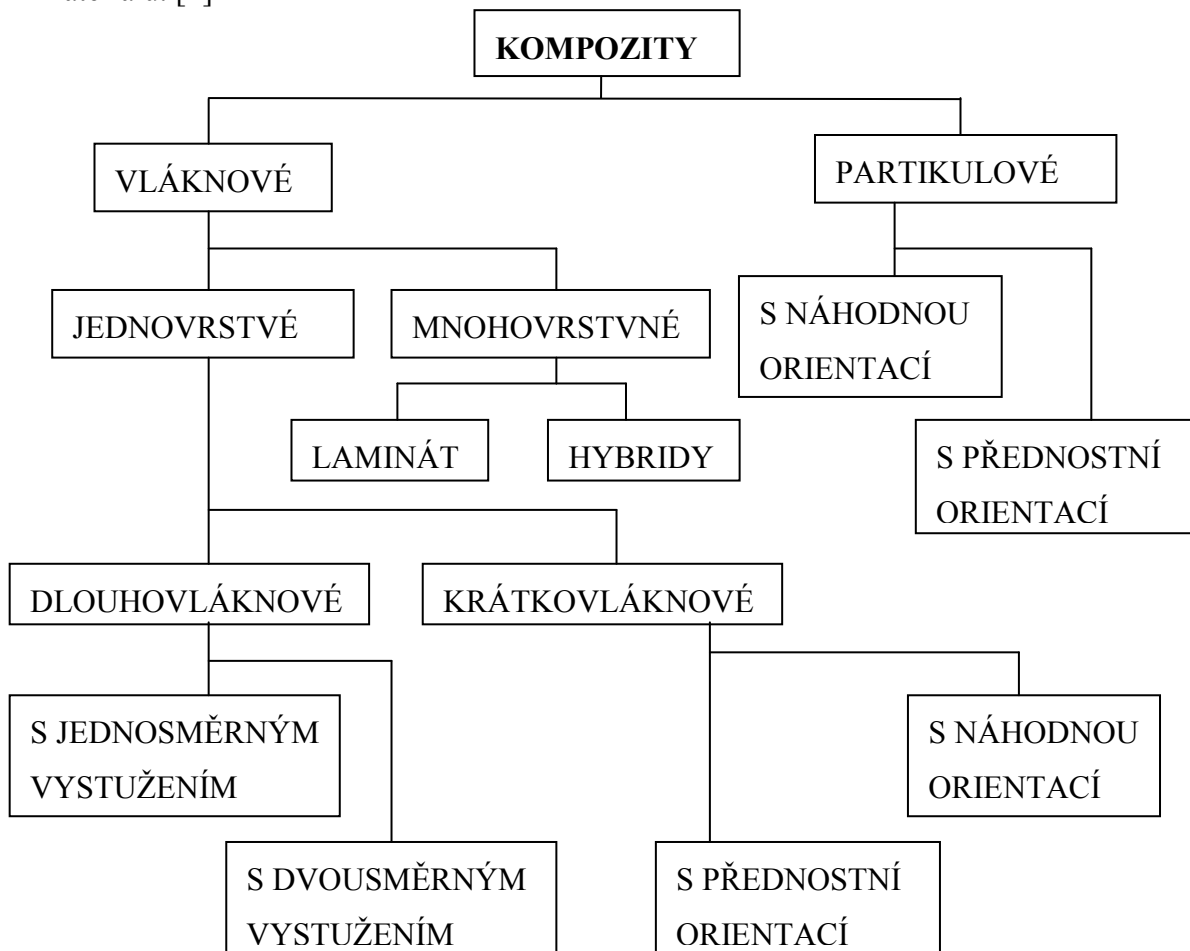


Obr. 1. Synergický efekt.

## 1.1 Klasifikace kompozitů

Klasifikaci kompozitních materiálů lze rozdělit podle vlastností matrice a vláken, nebo také podle tvaru, velikosti a orientací vyztužujících částí.

Jedno z důležitých rozdělení mezi těmito materiály je, zda jsou vláknová, či nikoli. Vlákná mohou mít tvar kulový, krychlový, čtyřstěnný, destičkový, nebo jiný pravidelný či nepravidelný tvar. Vlákná jsou charakterizována svou délkou. Délka vlákna je mnohokrát větší, než průřez. Na obrázku číslo 2 je znázorněno jednoduché schéma rozdělení kompozitních materiálů. [4]



Obr. 2. Klasifikace kompozitních materiálů [5]

Velkou skupinu tvoří kompozity vytvořené pomocí tkaných nebo splétaných vláken. Takto vyztužené kompozity podporují materiál ve dvou směrech. Tkaná vlákna zvyšují houževnatost a zabraňují postupování trhlin. Jsou vhodně používány při neznámém směru zatěžování. Aplikace těchto vláken zajišťují ortotropní vlastnosti v rovině. Pokud jsou vlákna orientována náhodně, získává materiál izotropní vlastnosti, tedy stejné vlastnosti ve všech směrech. [4]

## 1.2 Vyztužující částice

Typ vyztužujících částic udává podstatné informace o možnostech využití kompozitních materiálů. Je tedy nutné pochopit jednotlivé typy vyztužujících částic a tím důkladněji určit jejich užití v technické praxi.

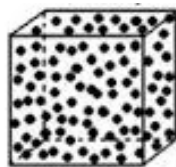
### 1.2.1 Partikulové kompozity

Takto vyztužené kompozity jsou nevláknité. Nedosahují žádných závratných délek, mimo destiček. Na obrázku číslo 3 je znázorněno schéma částicových kompozitů. Takto vyztužený materiál hůře odolává lomu. Oproti tomu zvyšují houževnatost, tvrdost, pevnost a omezují rozvoj plastické deformace.

Materiál částic i matrice může být z kovových i nekovových materiálů. Volba finální kombinace je závislá na požadovaných vlastnostech konečného materiálu. Kompozity s částicemi wolframu, molybdenu a dalších karbidů ve spojení se stříbrnou či měděnou matricí jsou využívány pro elektrické kontakty. V této kombinaci je dosahováno elektrické a tepelné vodivosti, vysokého bodu tání a nízkým třecím charakteristikám. [6][5]

Dalším reprezentantem mezi částicovými kompozity jsou cermety. Jedná se o kompozitní materiál s matricí keramickou či kovovou. Dělí se na oxidové a karbidové. Kompozity na oxidové bázi se běžně používají na HSC obrábění, termočlánky, vývody pecí a kotlů. Cermety na karbidové bázi většinou obsahují wolfram, chrom a titan. Nejznámější typy cermetů na karbidové bázi jsou karbidy wolframu v kobaltové matrici, karbidy chromu v kobaltové matrici a karbidy titanu v niklové matrici. Takto složené materiály dosahují velmi vysokých pevností, tvrdostí, popřípadě zvyšují otěruvzdornost nebo korozivzdornost.

Pro zvýšení povrchové tvrdosti, redukci smrštení, snížení hořlavosti nebo zlepšené elektrické vodivosti lze velmi vhodně využít kompozitní materiály s anorganickým plnivem. Nejen tyto vlastnosti jsou charakteristické pro anorganické plnivo, jedním z nejdůležitějších ukazatelů je vysoká redukce nákladů. Běžně komerčně užívané elastomery jsou plněny černými sazemí nebo křemennou moučkou. [7]



Obr. 3. Schéma kompozitu vyztuženého částicemi

### 1.2.2 Vláknové kompozity

Většina známých a používaných materiálů má o několik řádů nižší hodnotu pevnosti než je jejich teoretická hodnota. Tento fakt je připisován vnitřním vadám a nedokonalostem v materiálu. Jednou z mnoha vad je snížení pevnosti díky příčným trhlinám ležících kolmo na směr působícího zatížení. Díky tomuto faktu je jasné, že při minimalizování příčného průřezu vlákna lze minimalizovat nečistoty a tím zvýšit jeho pevnost. U polymerních vláken je pevnost a tuhost dána orientací molekulární struktury. V tabulce číslo 1 je vyobrazeno několik základních materiálů používaných na vyztužování kompozitních materiálů s jejich vlastnostmi. [1]

Tab. 1. Vlastnosti vláken s porovnáním konvenčních materiálů [1]

| MATERIÁL                   | MODUL PRUŽNOSTI V TAHU E (GPa) | MEZ PEVNOSTI V TAHU $\sigma_p$ (GPa) | HUSTOTA $\rho$ (g.cm <sup>-3</sup> ) | MĚRNÝ MODUL E/ $\rho$ | MĚRNÁ PEVNOST $\sigma_p/\rho$ |
|----------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| E-sklo                     | 72,4                           | 3,5                                  | 2,54                                 | 28,5                  | 1,38                          |
| S-sklo                     | 85,5                           | 4,6                                  | 2,48                                 | 34,5                  | 1,85                          |
| Grafit                     | 390,0                          | 2,1                                  | 1,90                                 | 205,0                 | 1,1                           |
| Bór                        | 385,0                          | 2,8                                  | 2,63                                 | 146,0                 | 1,1                           |
| Křemík                     | 72,4                           | 5,8                                  | 2,19                                 | 33,0                  | 2,65                          |
| Wolfram                    | 414,0                          | 4,2                                  | 19,30                                | 21,0                  | 0,22                          |
| Berylium                   | 240,0                          | 1,3                                  | 1,83                                 | 131,0                 | 0,71                          |
| Kevlar 49                  | 130,0                          | 2,8                                  | 1,50                                 | 87,0                  | 1,87                          |
| <b>Konvenční materiály</b> |                                |                                      |                                      |                       |                               |
| Ocel                       | 210,0                          | 0,34 – 2,1                           | 7,8                                  | 26,9                  | 0,043 – 0,27                  |
| Hliníkové                  | 70,0                           | 0,12 – 0,62                          | 2,7                                  | 25,9                  | 0,052 – 0,23                  |
| Sklo                       | 70,0                           | 0,7 – 2,1                            | 2,5                                  | 28,0                  | 0,28 – 0,84                   |
| Wolfram                    | 350,0                          | 1,1 – 4,1                            | 19,30                                | 18,1                  | 0,057 – 0,21                  |
| Berylium                   | 300,0                          | 0,7                                  | 1,83                                 | 164,0                 | 0,38                          |



Díky malému průřezu se nemohou vlákna používat samostatně, proto se vkládají do maticového základu. Tímto spojením vznikne vláknový kompozitní materiál. Matrice nejen spojuje vlákna dohromady, ale také je chrání před mechanickým poškozením.

Takto vyrobené kompozity mohou být jednovrstvé či mnohovrstvé. Jednovrstvé kompozity mohou být zhotoveny z více vrstev, avšak každá z nich má stejnou orientaci a stejné mechanické vlastnosti. Takto vytvořený laminát se uvažuje jako jednovrstvý kompozit. Takéž v případě užití netkané textilie se jedná o jednovrstvý kompozit. V praxi jsou běžněji užívány vícevrstvé kompozitní materiály. Takto vyráběné lamináty se skládají z jednovrstvých kompozitů a jejich orientace se převážně střídá. [1][3]

### 1.2.3 Krátkovláknové kompozity

Na rozdíl od klasických vláken, kde je zatížení přenášeno přímo pomocí orientovaných vláken, u krátkovláknitých kompozitů se musí zajistit vysoká koncentrace vysokomodulových vláken. V takovém případě pak matrice pozbývá nosného účinku, a pouze je pojí a chrání před poškozením. [1] [2]

Při výrobě krátkovláknitých kompozitů se předpokládá náhodné rozložení vláken. Avšak jsou závislé na technologii výroby. Při určitých technologiích, jako je například vstříkování, se může objevit místo, kde budou vlákna orientována po směru tečení pryskyřice. Nebo se přímo vyrábějí tenké předvýrobky či rohože. Ve většině používaných zpracovatelských technologiích lze předpokládat náhodně rozmístěná vlákna v rovinách rovnoběžných s povrchem. Vlastnosti takto vyrobených kompozitů mohou být izotropní (po tloušťce desky nejsou závislé na směru). [1][3]

Při cyklickém namáhání jsou mnohem méně odolné proti únavovým poškozením. Tyto poškození vznikají díky velkému namáhání matrice a následné ztráty adheze mezi matricí a vláknem. Oproti tomu mají velmi dobrou odolnost proti stárnutí, nízký creep a dobrou rozměrovou stabilitu.[3]

### 1.2.4 Hybridní kompozity

Jedná se o kompozitní materiál obsahující dvě či více sekundárních fází vložených do matrice, nebo směsi matic. Nejčastěji vznikají spojením vláken a částic. Takto vytvořené materiály dokážou kombinovat vlastnosti podle mechanických potřeb. Díky širokému spektru vlastností výrazně rozšiřuje oblast použití. Zvýšením pevnosti, lomové houževnatosti a tuhosti současně s redukcí hmotnosti a nízkou cenou jsou tyto materiály perspektivní v mnoha průmyslových odvětvích. Matrice může být tvořena termoplasty i termosety. [3][7]

Dále lze do hybridních kompozitů zařadit kompozity s vláknovou výztuží zároveň s matricí plněnou částicemi. Nebo pouze kompozity tvořené vláknovou výztuží, která je složena z uhlíkových a kevlarových, nebo skleněných vláken. [7]

### 1.2.5 Typ vláken pro polymerní kompozity

- Skleněná vlákna

Vlastnosti skleněných vláken jsou dány jejich chemickým složením. Základní vlákna se vyrábějí z E-skla (borosilikátové sklo). Mají dobrou kombinaci mechanických a elektrických vlastností. Většinou se používají v kombinaci s nenasycenými polyestery. Nevýhodou E-skla, obsahující alkalické oxidy, je absorpce vody a nízká korozivzdornost proti vodním roztokům kyselin a zásad. Perspektivnějším materiálem jsou bezalkalická S-vlákna, jedná se o vlákna s lepší pevností i modulem pružnosti, menší hustotou a lepší korozní odolností. Oproti E-sklu, který ztrácí svoji pevnost při teplotách nad 200<sup>0</sup>C, S-sklo si udržuje pevnost až do 250<sup>0</sup>C. Jejich vyšší teplota tavení a vyšší cena brání jejich úplnému zavedení do technické praxe. Použití S-vláken je určeno výhradně pro kompozity s epoxidovou matricí. Celkově mají skleněná vlákna nižší modul pružnosti ve srovnání s uhlíkovými a aramidovými vlákny. [7]

Skleněná vlákna mají převážně pravidelný kruhový průřez a skládají se z oxidu křemičitého, oxidu hlinitého, oxidu vápenatého, oxidu hořečnatého a oxidu boritého. Vyrábí se tažením z roztavené skloviny a prudkým ochlazením. Při přehřátí dochází ke krystalizaci, což způsobuje výrazně nižší pevnost. [8]

- Polyesterová vlákna (PES)

Polyesterová vlákna jsou termoplastická a mají relativně velkou pevnost. Také velmi dobře odolávají minerálním kyselinám, bělicím roztokům a oxidačním činidlům. Mají dobrou odolnost proti stárnutí, obrušování a plísním. Špatně odolávají UV záření. Vyrábějí se polykondenzací. [9]

Úspěšně se užívají v technické praxi ve filtračních médiích, jako například ve vysavačích, nebo automobilových vzduchových filtrech. [9]

- Polyethylenová vlákna (PE)

Vyznačují se velkou měrnou pevností, mají vysokou elasticitu, voděodolnost a korozi-vzdornost. Zaručují odolnost proti chemikáliím, mimo silně oxidačních roztoků. Na rozdíl od PES odolává UV záření. V houževnatosti a ošetrivzdornosti jsou srovnatelné s kevlarovým vláknem. Velkou nevýhodou je jejich malá tepelná odolnost. [2]

- Polypropylenová vlákna (PP)

Dlouhodobě odolávají proti převážné části kyselin a alkálií. Také velmi dobře odolávají biologickému působení. Nemají nasákavost a vodivost elektrického proudu. Mezi velké nevýhody patří jejich nízká tepelná stabilita a odolnost proti oxidačnímu prostředí. [8]

- Aramidová vlákna (aramidi, APA)

Po chemické struktuře se jedná o aromatické polyamidy. Mezi nejznámější aramidové vlákno patří kevlar. Patent vlastní firma DuPont a byl vynalezen v roce 1965 Stephanií Kwolekovou. V současné době se vyrábí několik druhů lišících se jak chemickou strukturou, tak mechanickými vlastnostmi. Po stavební stránce se jedná o makromolekulární řetězce, které jsou orientovány do směru vlákna, mezi vlákny pak působí sekundární mezimolekulární síla na bázi vodíkových můstků. Díky této struktuře mají vlákna velmi dobré mechanické vlastnosti, avšak mají velmi silné anizotropní mechanické a fyzikální vlastnosti. [2]

Aramidová vlákna mají vynikající odolnost proti účinku rozpouštědel, paliv a slané vodě. Též mají vysokou pevnost v tahu a jsou odolné proti abrazi. Při zatížení kolmo na vlákna

se však plasticky deformují a mez kluzu v tlaku je srovnatelná s běžnými polymery. Další výhodou je relativně nízká hustota ( $1440 \text{ kg/m}^3$ ). Také UV záření nemá žádný vliv na vlastnosti. Krátká vlákna se s výhodou používají jako výztuž termoplastů pro aplikace, kde jsou vyžadovány dobré kluzné vlastnosti a vysoká odolnost proti opotřebením. [2][7]

- Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna mají nejširší spektrum mechanických vlastností. Vyrábějí se z viskózních vláken, polyakrylonitrilových vláken (PAN), vláken novoloidu, vláken fenolu nebo aldehydových (Kynol) vláken. Vynikající mechanické vlastnosti těchto vláken vyplývají z vysoce anizotropní hexagonální struktury, která je známá u grafitu. V bazální hexagonální rovině jsou uhlíky vázány silnou kovalentní vazbou a jednotlivé roviny působí slabé Van der Waalsovy síly. Teoretická pevnost grafitu ve směru rovnoběžném s hexagonální mřížkou je 100 GPa a modul pružnosti v tahu 1000 GPa. Vlastnosti uhlíkových vláken jsou silně závislé na míře orientace hexagonálních mřížek mezi sebou. Struktura a tedy i vlastnosti jsou dány technologií výroby vláken. Nejtužší komerčně vyrobená uhlíková vlákna dosahují modulu pružnosti v tahu až 965 GPa. [2][7]

Mají vysokou pevnost, modul pružnosti, dobrou tepelnou odolnost a nízkou měrnou hmotnost. Oproti tomu se vyznačují velkými anizotropními mechanickými vlastnostmi (ve směru kolmo na osu vlákna). Křehkost přetržení je nižší než u skelného vlákna. Záporný koeficient teplotní roztažnosti (při ohřevu se vlákno zkracuje). V podélném směru mají mírný elektrický odpor. [2]

- Bórová vlákna

Jedná se o jednu z nejdražších variant, zejména kvůli náročnosti zpracování. Technologie výroby vyžaduje zpracovávat vlákna metodou chemické depozice v plynné fázi (CVD) na substrát z wolframového vlákna. Díky tomu, že Bor chemicky reaguje s kovy, musí se povlakovat keramickými materiály (v případě, že se používá s kovovou maticí). Nejčastější využití je u vojenské letecké techniky.[2]

### 1.3 Matrice

Spojité složka, která zastává funkci pojiva výztuže a chrání většinou křehká vlákna, se nazývá matrice. Polymerní matrice je výrazně poddajnější než vlákna, pevnost v tahu je u všech matric menší než pevnost v tahu vláken. [2]

Tak jako lze kompozitní materiály dělit podle typu vláken, lze je dělit i podle matrice. Reologické vlastnosti matrice mají přímý vliv na způsob homogenizace. Schopnost dotvarování mají hlavně silikonové a polymerní matrice. Silikátové matrice oproti polymerním podléhají stárí, což významně snižuje jejich potenciál pro technickou praxi. Polymerní matrice jsou viskoelastické a mají určité materiálové parametry, které je řadí do popředí z hlediska navrhování a vývoje. Pro specifické vlastnosti konečného materiálu se hojně využívají i matrice kovové, keramické a kompozity uhlík – uhlík. [2][5][7]

#### 1.3.1 Polymerní matrice

Kompozitní materiály s polymerní matricí jsou nejpoužívanější, buď reaktoplastické nebo termoplastické. Nejpoužívanější jsou nasycené polyestery (PU), vinylestery (VE) a epoxidy (EP). Z termoplastických polymerů to jsou polypropyleny (PP) a polyamidy (PA). Reaktoplasty a aromatické polymery se převážně používají ve vojenském průmyslu, a to z důvodu jejich vysoké tepelné stálosti a vysoké ceně.

- Nasycené polyestery (PU)

Jedny z nejpoužívanějších pryskyřic. Jsou připraveny reakcí dvoufunkčních složek (Polypropylenglykolu a kyseliny ftalové, kumaronové nebo maleinové). Vyroběný předpolymer je následně rozpuštěn v reaktivním rozpouštědle (většinou styren). Volbou vytvrzovacího systému lze dosáhnout široké pásmy doby gelace a doby vytvrzení. Díky tomu je lze zpracovávat všemi technologiemi. Viskozitu určuje podíl reaktivního rozpouštědla. Pro nízkou viskozitu se volí podíl rozpouštědel vyšší, avšak za cenu nižší pevnosti a tepelné odolnosti. Nemodifikované nasycené polyestery se vyznačují velkým smrštěním při vytvrzování (7 až 8 %). Jsou křehké a snadno se v nich tvoří mikrotrhliny. Elektrické vlastnosti mají dobré a dobře odolávají proti ultrafialovému záření. [2]

- Vinylesterové pryskyřice (VE)

Jedná se o nenasyčené estery epoxidových pryskyřic. Jejich výroba se uskutečňuje buď z bisfenolu a nebo jako novolakové vinylesterové pryskyřice. Obvykle obsahují reaktivní rozpouštědlo styren. Oproti UP mají nižší stupeň zasítní, což vede k větší ohybnosti a větší odolnosti proti tvorbě mikrotrhlin. Ve srovnání s UP mají větší teplotu skelného přechodu, lepší odolnost proti korozi, vyšší cenu a pomalejší reakci při vytvrzování. [2][7]

- Epoxidové pryskyřice (EP)

Nejvšestranější reaktoplasty pro konstrukční použití. Mají velmi dobrou odolnost proti únavě a tečení, vynikající chemickou odolnost a nízké smrštění při vytvrzování. Vyznačují se velkou adhezí ke kovům a v poslední době i k PP a PE. Díky modifikaci, vytvrzovacím činidlům a plnivu, lze vlastnosti epoxidových materiálů výrazně zlepšit. Jednou z nevýhod je jejich navlhavost, která značně zhoršuje teplotní odolnost a teplotu skelného přechodu.

Velkou snahou je zlepšit mechanické a tepelné vlastnosti epoxidů pomocí nanočástic. Nanočástice zvětšují současně tvrdost a modul pružnosti. Tyto dvě veličiny jsou u polymerů ve vzájemné interakci. Díky dosaženému zvýšení těchto veličin lze předpokládat rozšíření působnosti tohoto typu kompozitního materiálu. K modifikaci jsou nejpoužívanější nanočástice na bázi jílu (montmorillonit). Výsledné vlastnosti jsou především závislé na dokonalosti dispergace nanodestiček v epoxidové matici. Také se lze setkat s nanočásticemi z oxidu křemičitého, zirkoničitého titaničitého nebo diamantovými nanočásticemi. [7]

### 1.3.2 Silikátové matrice

Jedná se o materiál na bázi sádry a cementové pasty. Cementové matrice jsou silně alkalické, což zapříčiňuje korozi většiny skleněných vláken. Vlákná se mohou buď chránit, nebo se používají speciální alkalicko-odolných skel. V sádrové matici jsou skleněná vlákna pokryta polyvinylacetátovým povlakem, který zvyšuje soudržnost matrice. Smykové napětí se pak pohybuje mezi 1 – 7 MPa. Nejběžnější kompozitní materiál se silikátovou maticí je vláknobeton. [2][7]

### 1.3.3 Kovová matrice

Pro kompozity vyztužené kontinuálními vlákny jsou nejvhodnější, neboť mají velmi dobrou měrnou pevnost a tuhost. Pro aplikace anizotropní geometrií, kde je vyžadována vysoká tuhost je vhodnější využít matrice s vyztužující fází keramické whiskery (karbidy nebo nitridy křemíku). Vlákna z karbidu křemíku vykazují nejslibnější vlastnosti. Vyztužení kovu dlouhými vlákny vede k celkovému zlepšení mechanických vlastností.[7]

Kompozitní díly vyztužené kontinuálními vlákny se připravují infiltrací roztaveného kovu do vytvořeného vláknového skeletu, nebo se vytvoří difúzním spojením kovových prepregů za vysoké teploty a tlaku. Příprava infiltrací je považována za jedinou ekonomicky i technologicky přijatelnou.

Nejběžnější kovové matrice jsou v současné době tři. Jedná se o hliníkové slitiny (pro teploty 300 až 400 °C), titanové slitiny (pro teploty 500 až 600 °C) a superslitiny na bázi niklu, železa a kobaltu (pro teploty 1000 až 1150 °C). Velmi vhodnou výztuží pro superslitiny jsou wolframová vlákna, která dodají dostatečnou pevnost při vysokých teplotách. Jako perspektivní materiály se dobře jeví hořčíkové slitiny, měď a bronz, vyztužené SiC vlákny (pro teploty až 1380 °C). Také mají vysokou elektrickou a tepelnou vodivost s korozní odolností. [7]

### 1.3.4 Keramické matrice

Díky vláknům, lze keramické materiály využívat v mnoha technických oblastech. Samotné keramické materiály vykazují křehké chování a nízkou hodnotu lomové houževnatosti. Pro keramické materiály jsou nejvhodnější vlákna z karbidu křemíku a vlákna uhlíková. Při přípravě kompozitních materiálů s uhlíkovými vlákny se musí vlákna opatřit povlakem z karbidu křemíku, neboť by mohlo dojít k oxidaci. Jestliže je keramická matrice vyztužena dlouhými vlákny, mohou vznikat mikrotrhliny v celém průřezu matrice a k porušení vláken dochází postupně, aniž by došlo k okamžitému lomu. To za předpokladu, že je lomová houževnatost vláken vyšší než u matrice (u polymerních a kovových kompozitů je to naopak). Díky dlouhým vláknům lze zvýšit lomovou houževnatost až na 30 MPa.

Keramické kompozity nelze připravit běžnými slinovacími metodami, neboť vlákna při vysokých tlacích praskají. Proto je nutné vytvořit vláknový skelet ve tvaru výrobku a samotná matrice vznikne chemickou reakcí nebo pyrolýzou prekurzorů. [7]

### 1.3.5 Kompozity uhlík – uhlík

Kompozitní materiál se systémem uhlíková matrice – uhlíkové vlákno se jeví jako perspektivní materiál díky svým mimořádným vlastnostem. Příprava je založena na podobných principech jako keramické kompozity. Jednou z metod je vytvoření skeletu z uhlíkového vlákna v reakční komoře za působení plynného uhlovodíku, který je při vysoké teplotě rozkládán za vzniku uhlíku. Druhou technologií je infiltrace tekutých polymerních pryskyřic nebo smoly.

Uhlíkové kompozity vykazují excelentní souhrn vlastností:

- odolnost proti vysokým teplotám,
- nízký koeficient lineární teplotní roztažnosti,
- tepelnou vodivost lze řídit,
- pevnost roste s teplotou,
- vysoká odolnost proti cyklickému namáhání,
- koeficient tření se nemění s rostoucí teplotou,
- nízká hustota,
- velmi dobrá chemická odolnost,
- odolnost proti ionizujícímu záření,
- biokompatibilita.

Nevýhodou těchto kompozitů je malá odolnost proti oxidaci při teplotách nad 500 °C. Pokud je nutno používat je v oxidačním prostředí při těchto teplotách, musí být do struktury zabudována antioxidační aditiva nebo jiná ochrana povrchu pomocí povlaku. [7]

## 1.4 Výroba kompozitů

Výrobu kompozitních materiálů lze zařadit do dvou skupin. Do první skupiny spadají technologie s otevřenou formou, neboli jednodílné, do druhé skupiny technologie s uzavřenou formou. Typ formy určuje způsob odpařování reaktivního ředidla. Další rozdělení lze uvažovat podle typu skupenství matrice při nanášení na výztuž. Lze nanášet matrice v tuhém stavu nebo ve stavu tekutém, například ve formě taveniny nebo roztoku.

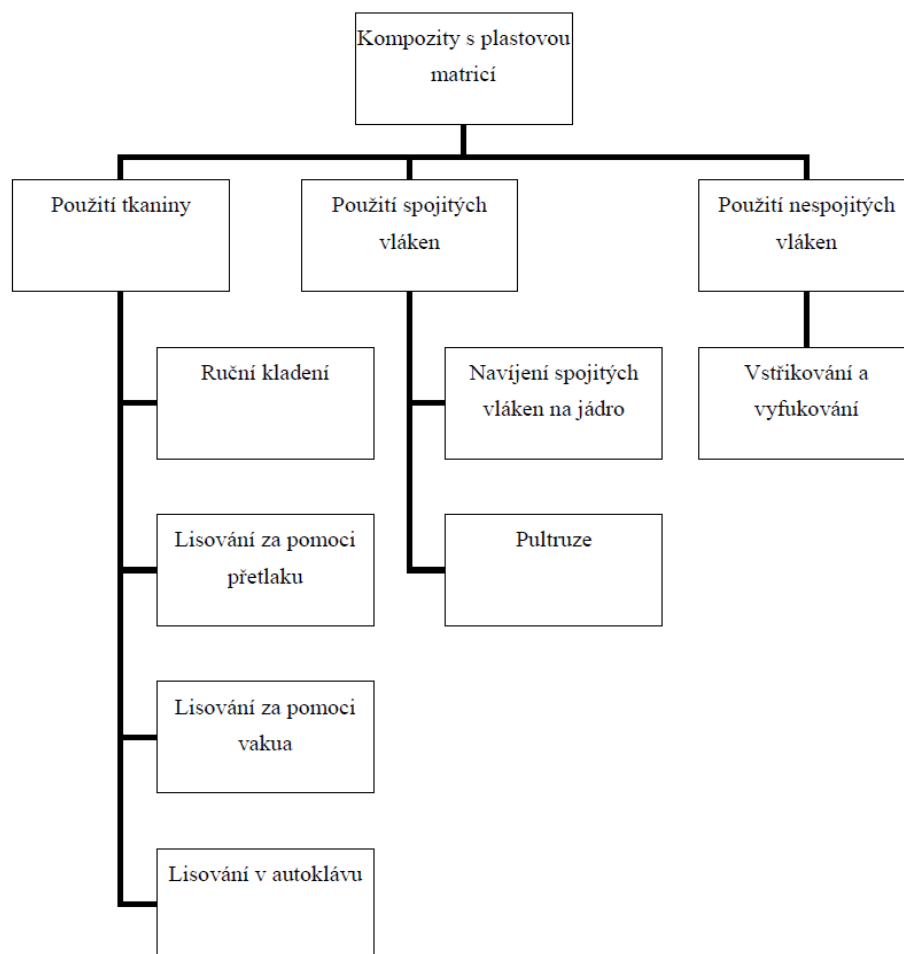
V současnosti existuje mnoho různých technologií pro výrobu kompozitů, avšak je nutné zajistit několik důležitých faktorů:

- Vyztužující vlákna musí být rovnoměrně rozložena.



- Matrice a výztuž musí být dobře spojena.
- Možnost uložení jednotlivých vrstev v libovolné orientaci vláken.
- Hospodárná výroba.
- Možnost následného tepelného zpracování.
- Jednoduchá výroba. [6]

Dalším rozdělením technologií pro výrobu kompozitních materiálů je podle toho, zda je výztuž ve formě krátkých, nebo spojitých vláken, či ve formě tkaniny. Jednotlivé technologie jsou zaznačeny na obrázku číslo 4.



Obr. 4. Rozdělení technologií dle typu výztuže

- *Ruční kladení*

Technologie řadí se do skupiny metod s otevřenou formou. Nejstarší a nepoužívanější metoda. Princip spočívá v nanesení a částečném vytvrzení ochranné vrstvi gelcoatu a následném nanášení vrstev výztuže. Jednotlivé vrstvy výztuže se prosycují pryskyřicí. Ruční kladení umožňuje vytvářet rozmanité tvary za relativně nízkých nákladů. Nevýhodou je vyšší technologická znalost a zručnost obsluhy, relativně vysoký podíl odpadu, nízká

reprodukovatelnost a pouze jedna pohledová strana výrobku. Na obrázku číslo 5 je znázorněna technologie ručního kladení.

- *Lisování se vstřikem matrice (RTM)*

Princip spočívá ve vložení suché výztuže do formy a zakrytím vrchní částí. Následně je vstříknuta pryskyřice pod tlakem 0,2 až 0,35 MPa. Po naplnění se forma uzavře a pryskyřice se nechá vytvrdnout. Oproti ručnímu kladení se u této technologie dosahuje kvalitního povrchu na obou stranách. K nevýhodám lze zařadit nutnost těžkých kovových forem.

- *Lisování ve formě*

Technologie, při které jsou veškeré komponenty obsáhlé ve formě, ta se pouze uzavře a pod tlakem materiál teče a vyplňuje ji. Základními materiály jsou BMC (bulk moulding compound) a SMC (sheet moulding compound).

- *Lisování prepregu*

Prepreg je název pro předimpregnovanou vyztužující tkaninu. Prepreg je již naimpregnován pryží dle přesného poměru a jeho síla je cca 0,1 – 0,5 mm. Jednotlivé vrstvy se kladou do formy dle požadavku finálního výrobku. Následně se všechny vrstvy slisují pomocí vakuové fólie. Po slisování se forma přesune do pece nebo autoklávu. Velkou výhodou této technologie jsou velmi vysoké izotropní vlastnosti hotového dílce.

- *Pultruze*

Nekonečná vlákna jsou kontinuálně impregnována pryskyřicí a následně vtahována do tvarovací a vytvrzovací hlavy. Po dosažení požadovaného tvaru se profil řeže na požadovanou délku. Novější technologie vstřikuje pryskyřici do tvarovací hlavy RIP (Resin Injection Pultrusion) což způsobí lepší prosycení a odstraní páry reaktivního rozpouštědla. Velkou výhodou pultruze je vytvoření kompozitního materiálu s dobrými mechanickými vlastnostmi, teoreticky neomezenou variabilitou tvaru, libovolné délky profilu a kontinuální produkce. Oproti tomu je náročný rozjezd výrobní linky a omezení pouze v profily tažené přes tvarovací hlavu. [7][19]

- *Navíjení*

Nekonečné vlákno je navíjeno na kruhovou smrštiteľnou formu. Vlákno je buď protahováno lázní, kde se dostatečně naimpregnuje, nebo se provlhčí až po navinutí. Vlastnosti kompozitu se dosahují pomocí přesného uspořádání vláken na formu. Po navinutí se vloží navinuté vlákno i s formou do pece a nechá se vytvrdit. Po vytvrzení se forma vyjme. Velmi produktivní forma výroby potrubí, kolen či zásobníků na palivo. Nutná vysoká produkce, neboť pořizovací cena navíjecích strojů je velmi vysoká.

- *Stříkání*

Technologie s otevřenou formou. Pomocí stříkací pistole je nanášena jak matrice, tak vyztuž. Technologie umožňuje vyztužovat pouze krátkými skleněnými vlákny. Po nástřiku je vše slinováno a vytvrzeno. Tak jako u ručního kladení, je tato technologie relativně levná a umožňuje výrobu rozmanitých tvarů. Avšak díky automatizaci lze ovládat stříkací pistoly pomocí robota, a tím výrazně zvýšit produktivitu. [7][19]

## 2 OBRÁBĚNÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

I když velké množství výrobků z kompozitních materiálů je vyráběno do konečného tvaru bez nutnosti dalšího zpracování, stále častěji se objevují vysoké požadavky na jakost, rozměrovou přesnost nebo vzhled výrobků. Aby bylo dosaženo takovýchto požadavků, je nutné sáhnout po obráběcích technologiích. Při konvenčním obrábění kompozitů vznikají velmi odlišné podmínky, než při obrábění běžných materiálů. Jednou z nejpodstatnější změny je značné zvýšení abrazivního opotřebování. A to díky mechanickým vlastnostem výztuže. Jelikož jsou nejčastěji obráběny materiály s obsahem uhlíkových vláken, skelných vláken nebo aramidových vláken, je patrné, že materiál nástroje musí při obrábění odolávat mnohem vyšší tvrdosti a ořezuvzdornosti. Proto jsou materiály z rychlořezné oceli takřka nepoužitelné. Doporučené materiály na obrábění takovýchto materiálů jsou slinuté karbidy, cermety, řezné keramiky a hlavně polykrystalický diamant a polykrystalický nitrid bóru. Dalším velmi podstatným problémem je odvod tepla z místa řezu. Zde se podepisuje na zhoršení běžných podmínek při odvodu tepla matrice kompozitního materiálu. Matrice velice špatně vede teplo a to se velmi neblaze podepisuje na nástroji, neboť z velké části přestupuje do nástroje. Nadměrné tepelné zatížení způsobuje intenzivnější opotřebování. V tabulce číslo 2 jsou znázorněny procentuální odvody teplot u jednotlivých základních materiálů. Také je nutné brát v potaz, že při vyšších teplotách může materiál matrice degradovat (100 – 300 °C). [10][12]

Tab. 2. Odvod tepla z místa řezu při obrábění. [10]

| Odvod tepla | Ocel                           | Termoplast | Reaktoplast | FRP     |
|-------------|--------------------------------|------------|-------------|---------|
| Tříska      | 75                             | 50 – 57    | 2 – 3       | 5 – 10  |
| Obrobek     | 20 – 22                        | 15 – 25    | 5 – 8       | 5 – 15  |
| Nástroj     | 3 – 5                          | 20 – 25    | 80 - 90     | 70 - 80 |
| Prostředí   | (3 - 5) % při suchém prostředí |            |             |         |

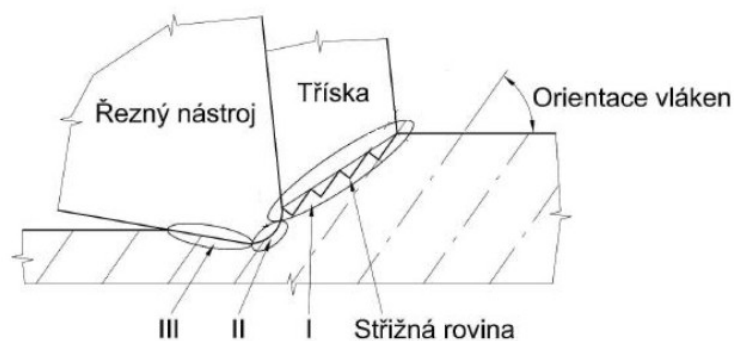
Další velkou odlišností od běžného obrábění je nehomogenní a anizotropní chování, což výrazně stěžuje určení trvanlivosti nástroje a jakost povrchu daného obrobku. Také nevzniká běžná tříska, ale materiál se odlamuje. To velmi výrazně zhoršuje pracovní podmínky, neboť vzniká velké množství prachových částic, které je nutno odstranit nejen z místa řezu, ale z celého pracoviště. Problém také může vznikat při chlazení pomocí řezné kapaliny, protože kompozitní materiály mohou být nasákavé. Z těchto důvodů je velký důraz kladen na geometrii břitu a odolnost proti opotřebování. A na konec je hlavní podstatou návrhu těchto nástrojů ekonomická bilance.

Při opotřebení břitu nástroje vzniká u složených materiálu delaminace, což je odlamování celých vláken. Aby nástroj měl co největší životnost, tedy aby vydržel co možná nejdéle dostatečně ostrý, je nutné pečlivě zvolit řezné podmínky. Závislost vhodně zvoleného posuvu současně s otáčkami jsou základní předpoklady k dosažení co nejnižšího tření nástroje s povrchem obrobku. Je nutné pohlížet na kompozitní materiály odlišně oproti běžným materiálům. [12]

## 2.1 Vznik třísky

Jeden z podstatných problémů při obrábění kompozitních materiálů je tvorba třísky. U běžného obrábění jsou známy mechanismy tvorby třísky a lze tak vycházet i ze zkušeností při volbě řezných podmínek. U kompozitních materiálů jsou tyto zkušenosti na počátku. Faktická neexistence obsáhlých vlastností jednotlivých konvenčních materiálů i s doporučenými řeznými podmínkami, vede firmy k testování a vytváření vlastních postupů a tím vznik jejich duševního vlastnictví, které nejsou vždy běžně dostupné.

Základní mechanismus tvorby třísky je zjišťován při ortogonálním řezu. Mechanismus tvorby třísky je znázorněn na obrázku číslo 5.



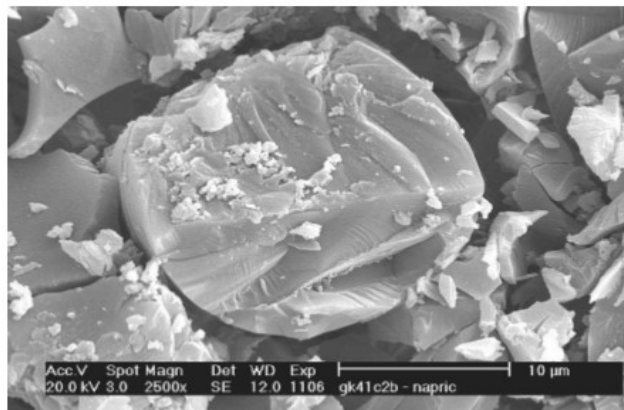
Obr. 5. Základní oblasti tvorby třísky. [17]

*Oblast I:* Vlastní oddělování třísky od materiálu. Vznik trhlin díky zatížení nástroje na vlákna. Šíření trhlin směřuje kolmo na osu vyztužujících vláken.

*Oblast II:* V důsledku negativního úhlu čela, nevzniká povrch obráběním, ale především tvářením. Vlákna a matrice jsou zatlačována pod břit.

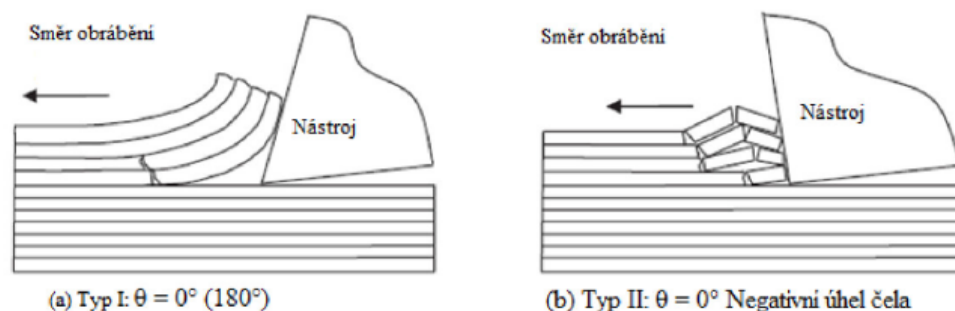
*Oblast III:* Po odlehčení obráběné vrstvy se část povrchové vrstvy vrací zpět v důsledku pružných deformací.

Vysoká křehkost vyztužujících vláken způsobuje typický křehký lom. Na obrázku číslo 6 je znázorněn křehký lom skleněných vláken. Lom je iniciátorem trhlin a defektů, kde se koncentruje napětí. To má za následek vznik a růst trhlin. [17]



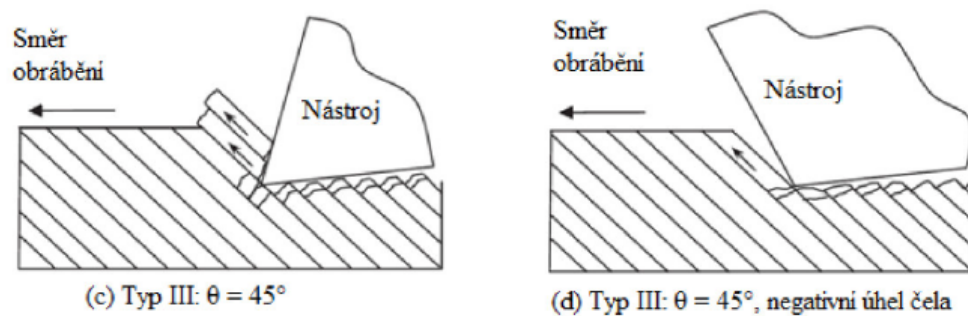
Obr. 6. Křehký lom skleněného vlákna v PE matrice. [18]

Tak jako u běžného obrábění i u kompozitů hraje velkou roli úhel čela. U těchto materiálů se rozlišují dva základní typy oddělování materiálu. Na obrázku číslo 7 je zobrazen způsob oddělování třísky dle typu I a typu II. Typ I vzniká při použití kladného úhlu čela při nulovém úhlu orientace vláken. Typ II vzniká při záporném úhlu čela, kdy se materiál porušuje vzpěrem. [15]



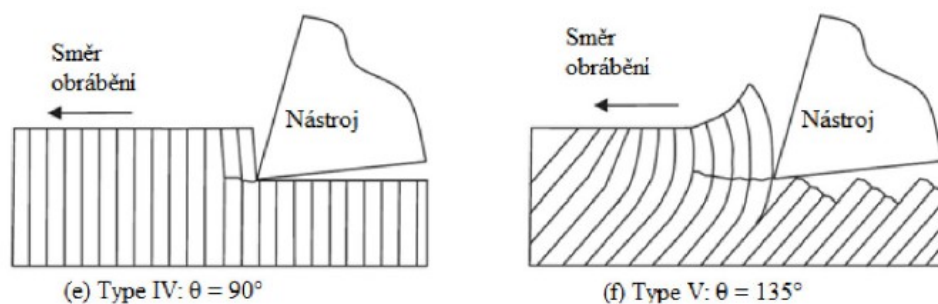
Obr. 7. Způsob oddělování materiálu Typ I a II. [17]

Pokud nastane situace, že se vlákna nachází pod úhlem větším než  $0^0$  a menším než  $90^0$ , jednotlivá vlákna se řezají zvlášť. To platí jak pro kladný úhel čela, tak pro záporný. Při řezání vláken s orientací  $90^0$  s kladným úhlem čela dochází k odebrání materiálu stříhem, avšak nedochází k výraznému lámání (vlákna pod rovinou řezu nejsou výrazně porušována). Na obrázku číslo 8 jsou znázorněny procesy řezání s orientací vláken  $45^0$ .



Obr. 8. Způsob oddělení materiálu typ III. [17]

Odlíšná situace nastává při řezání materiálu s orientací vláken větším než  $90^0$ . V takovém případě nástroj vyvolává deformaci vláken způsobující delaminaci a interlaminární deformaci. Řezaná část nástroje se ohýbá a působí na další vrstvy, které jsou tak poškozeny ještě před samotným vniknutím nástroje. To celé způsobuje poškození vláken a matrice pod rovinou řezu. Tvoří se výrazně větší třísky. Celkově se jedná o přístup, který není příliš vhodný. Situace je znázorněna na obrázku číslo 9, typ V. Mezi nejvýhodnější uspořádání vláken pro obrábění je jejich uspořádání pod úhlem  $135^0$ . Vlákna jsou odstříhována po svazcích, jsou namáhána na ohyb a tah. Předpoklad této situace vyžaduje dostatečnou adhezi vláken a matrice.



Obr. 9. Způsob oddělování materiálu typ IV a V. [17]

Kvalitu řezu lze ovlivnit úhlem čela nástroje a úhlem hřbetu. Při použití velkého úhlu hřbetu vlákna odskakují, oproti tomu při použití malého úhlu čela se povrch zahladí, ale vznikají větší normálové síly a dochází k většímu opotřebení nástroje. [14][15]

## 2.2 Chlazení

Z důvodu nasákavosti velkého množství kompozitních materiálů je velmi obtížné zavést chladicí kapalinu do místa řezu. To s sebou nese znemožnění odvodu tepla a tím nadměrné zahřívání jak obrobku, tak nástroje. Například karbon je velmi porézní a použití chlazení olejovou emulzí způsobuje její zadržení v pórech a tím zvyšuje lepivost materiálu. Odstranění emulze z póru materiálu je velmi obtížné. Pokud je chlazení nezbytné, musí se volit tak, aby nezpůsobilo zhoršení jak obráběcích vlastností, tak vlastností obrobku. Je možné chladit pomocí vody, speciálních roztoků nebo vzduchem.

## 2.3 Řezné materiály

Z ekonomického hlediska se při posuzování nástrojových materiálů převážně vychází z jejich řezivosti. Snahou je používat materiály s dlouhou trvanlivostí za přijatelné jakosti výrobku. U kompozitních materiálů musí nástroje splňovat více kritérií. Zejména tedy houževnatost, pevnost za vysokých teplot a odolnost proti abrazivnímu opotřebení. V dnešní době lze použít mnoho řezných materiálů jako je nástrojová ocel, slinutý karbid wolframu, povlakovaný slinutý karbid, nebo keramika, polykrystalický diamant.

- ***Rychlořezná ocel***

Rychlořezné oceli jsou nevhodné pro obrábění kompozitních materiálů. Mají ve srovnání s jinými řeznými materiály nižší hodnoty tvrdosti, a nízkou odolnost proti abrazivnímu opotřebení. Dalším důležitým faktem je nízká tepelná vodivost rychlořezných ocelí. Jelikož většina kompozitních materiálů má také velmi nízkou tepelnou vodivost, nástroj je velmi tepelně namáhán. Teplotní vodivost rychlořezné oceli je třikrát až čtyřikrát nižší než u slinutých karbidů. Tepelné namáhání výrazně snižuje trvanlivost rychlořezných ocelí. Nejběžnějším způsobem, jak zvýšit trvanlivost a odolnost proti opotřebení rychlořezných ocelí, je jejich povlakování. Jedná se o částečné zlepšení vlastností, nicméně stále se nejedná o produktivní nástroj. [12]

- ***Slinutý karbid wolframu***

Díky práškové metalurgii lze vyrobit materiál skládající se z velmi tvrdých zrn wolframu, spojených nejčastěji kobaltovým pojivem. Výsledné vlastnosti jsou dány podílem pojiva s tvrdou fází a velikostí zrn. Velká variabilita umožňuje vytvářet různé typy materiálů



s odlišnými vlastnostmi a tím zvyšovat rozsah použití. Je pravidlem, že při zvětšování zrn roste tvrdost, ale klesá ohybová pevnost. Mimo zrna pod  $1\mu\text{m}$ , pro ně tato závislost neplatí. Nejvýhodnější materiál pro obrábění kompozitních materiálů je materiál se zrnitostí  $0,7\mu\text{m}$ , má vysokou tvrdost a současně největší ohybovou pevnost. Pro obrábění kompozitních materiálů se nevyplácí vytvářet řezné nástroje se zrnitostí větší než  $1\mu\text{m}$ , neboť pro vytvoření kvalitního povrchu je zapotřebí co nejostřejší nástroj.

- ***Povlakované slinuté karbidy***

Vytváření povlaku pomocí metody chemické depozice z plynné fáze (CVD), nebo metodou fyzikální depozice z plynné fáze (PVD). Je běžné vytvářet vícevrstvé povlaky například z TiC, TiN, TiCN a  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Technologie CVD se provádí za vysokých teplot ( $900\text{--}1050^\circ\text{C}$ ), technologie PVD za značně nižších teplot ( $400\text{--}450^\circ\text{C}$ ). Je patrné, že při metodě CVD vzniká ve struktuře pnutí, proto je metoda PVD vhodnější a vyznačuje se vyšší pevností a odolností proti vylamování. Výhodou CVD povlaků je jejich vyšší odolnost proti opotřebení. Díky odolnosti proti opotřebení jsou v praxi používanější CVD povlaky, PVD povlaky se používají při velkých řezných silách. Celkově jsou povlakované nástroje používané díky své odolnosti proti opotřebení, vyšší životnosti a odolnosti proti vylamování.

- ***Keramické nástroje***

Nejpoužívanější keramické nástroje jsou na bázi slinutého korundu ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Vyrábí se slinutím za vysokých teplot a tlaků. Vyznačují se vysokou tepelnou stabilitou a umožňují tak podávat vynikající výkony při vysokorychlostním obrábění. Oproti slinutým karbidům se nevyznačují vysokou tuhostí a mají tendence k vylamování při vyšších řezných silách nebo při přerušovaném řezu. Nejběžněji se používají nástroje s negativní geometrií. Negativní geometrie břitu zvýší tuhost břitu. Díky své špatné tepelné vodivosti jsou náchylné na tepelné šoky. Životnost lze zlepšit přidáním TiC a  $\text{ZrO}_2$ . Na obrábění kompozitních materiálů se nehodí, neboť pro kvalitní povrch je zapotřebí co největší ostří a to v případě keramických materiálů výrazně snižuje tuhost a stává se tak velice neekonomický. [13]

- ***Polykrystalický diamant***

Umělý diamant je nejtvrdší materiál s vysokou odolností proti otěru. Vyznačuje se velmi dobrou tepelnou vodivostí s nízkým koeficientem tření. Velkou nevýhodou je náchylnost k lomu a výrazně vyšší pořizovací cena. Umělý polykrystalický diamant (PCD) se vyrábí lisováním za vysokých teplot a tlaku současně s malým množstvím kovového pojiva. [13]

Z důvodu vysoké ceny se nevyrábějí celé nástroje (VBD), ale pouze malé řezné segmenty, které se připájí na podklad slinutého karbidu. Nástroje jsou vyráběny se zrny o velikosti 2  $\mu\text{m}$  až 30  $\mu\text{m}$ . Čím větší jsou zrna, tím vyšší je tvrdost a lomová houževnatost. Oproti tomu jemná zrna zaručují lepší odolnost proti otěru a dosažení velmi ostré hrany ostří. I přes vysokou pořizovací cenu se mohou stát PCD ekonomicky výhodné za předpokladu správných řezných podmínek. PCD se používají na obrábění vysoce abrazivních materiálů, přerušované řezy a hrubování. Doporučená řezná rychlost je 200-1000 m/min. Jedno z nejdůležitějších úskalí je pracovní teplota nástroje, ta nesmí přesáhnout 600<sup>0</sup>C, při 650<sup>0</sup>C se mění diamant na grafit. [13]

## 2.4 Teplo při frézování kompozitů

Jeden z největších problémů při obrábění kompozitních materiálů je odvod tepla z místa řezu. Hlavním důvodem je fakt, že matrice kompozitů mají velice nízkou tepelnou vodivost. Při obrábění vzniká smykové tření v oblasti primární a sekundární plastické deformace vlivem tření třísky o čelo nástroje. A také vzniká tření v terciární oblasti plastické deformace mezi obrobenou plochou a břitem nástroje vlivem elastické deformace. Díky vysokým řezným rychlostem odchází do nástroje cca 90 %. U běžného obrábění se odevzdávané teplo do třísky pohybuje okolo 3 – 5 %. Z tohoto důvodu se může obráběný materiál poškodit popřípadě i vzplanout. Lépe jsou na tom materiály vyztuženy uhlíkovým, aramidovým nebo skleněným vláknem. Dalším z důvodů proč je nutné sledovat teplotu při obrábění je teplota skelného přechodu matrice. Při překročení této teploty dochází nenávratně ke ztrátě pevnosti a ke zhoršení jakosti obrobené plochy. [16][20]

## 2.5 Delaminace

Velmi častý problém při obrábění kompozitních materiálů je delaminace. Nejběžněji se sní lze setkat u vrtání nebo frézování vrstvených kompozitů. Delaminace se objevuje jak na vstupu nástroje do materiálu, tak i u jeho výstupu. Znázornění delaminace je na obrázku číslo 9. Většinou vzniká delaminace ve dvou fázích. Za první fázi lze považovat období, kdy síla od příčného ostří působí na neobrobenou plochu materiálu, následně dosáhne kritické hodnoty a končí poté, co ostří pronikne skrz materiál. Následuje druhá fáze, kdy se následkem tlaku nástroje delaminace rozvíjí. Delaminace končí, jakmile příčné ostří prostoupí na povrch. [11]

Delaminace nenastane u vnitřních vrstev, neboť jsou drženy horní a spodní vrstvou. Velký vliv na delaminaci má také ostří nástroje, proto je nutné nástroj dostatečně často ostřit, popřípadě měnit VBD. Vlivem neostrosti nástroje se vlákna nestříhají, nýbrž mají sklon k deformaci a vytahování z matrice. [11]

## 2.6 Opotřebení řezného nástroje

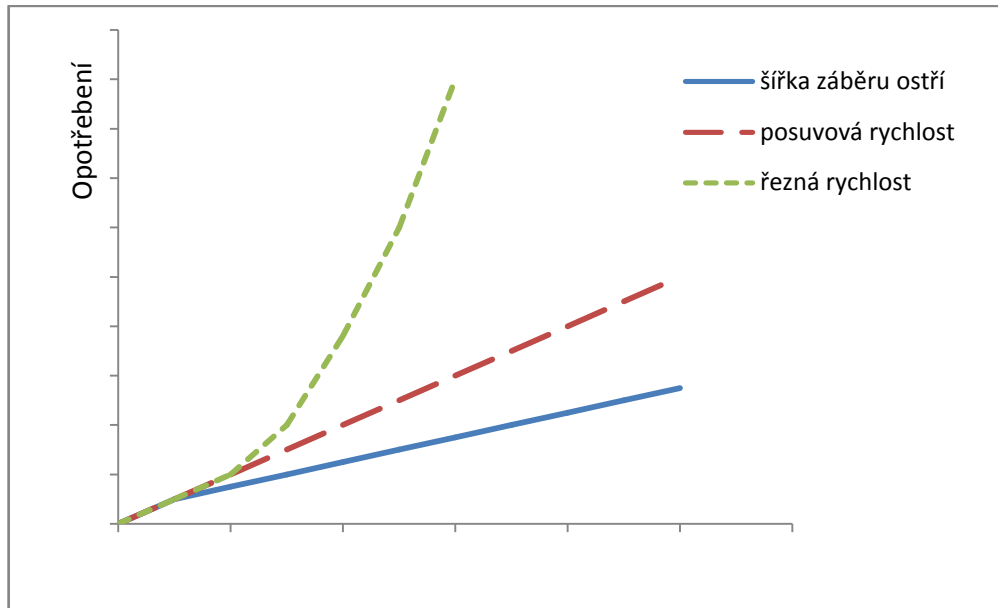
Vlivem obrábění vzniká na každém nástroji určitý druh opotřebení. Opotřebení vzniká v důsledku pohybu nástroje vůči obrobku a nástroje vůči tříске. Samotné opotřebení je složitý děj závislý na mnoha faktorech. Zjednodušeně lze říci, že se jedná o kombinaci mechanického, tepelného a chemického namáhání nástroje. Lze sledovat několik typů opotřebení.

### 2.6.1 Mechanismus opotřebení

Mechanismus opotřebení se řadí především do dvou typů, a to do mechanického a chemického. Při mechanickém opotřebení dochází k deformaci vlivem odcházející třísky a třením po obrobku. U druhého typu dochází k opotřebením vlivem změny složení materiálu nástroje v místě řezu. Také se zásadně mění mechanické vlastnosti povrchu obráběného materiálu. Mechanismy opotřebení se dělí do čtyř dějů.

- Abraze – brusný otěr mikročástic uvolněných z obrobku nebo nástroje.
- Adheze – plastická deformace v místě styku nástroj-obrobek.
- Difuze – migrace atomů z obrobku do nástroje a opačně.
- Oxidace – tvorba oxidů, například  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (velmi tvrdý oxid).

Každý typ opotřebení má odlišný průběh a probíhá za odlišných podmínek. Určujícím činitelem, který rozhoduje o tom, jaký typ děje bude probíhat, je vzniklé teplo mezi nástrojem a obrobkem. Dalším neméně významným činitelem je vliv řezných podmínek. Vliv řezných podmínek na opotřebení nástroje je znázorněn na obrázku číslo 10.



Obr. 10. Graf závislosti opotřebení na řezných podmínkách. [21]

### 2.6.2 Typy opotřebení

#### *Tvorba nárůstku (A):*

Typ tvořící nárůstky, které mají charakter návaru. Při následném odtrhování je pravděpodobnost křehkého porušení břitu. Při porušení břitu se výrazně snižuje jakost povrchu.

#### *Opotřebení hřbetu (B):*

Jedno ze základních opotřebení charakterizující trvanlivost výměnných břitových destiček. Toto opotřebení lze pouze snížit. Vzniká v důsledku otěru nástroje s obrobkem.

#### *Výmol na čele (C):*

Nejčastěji vzniká u destiček s rovným čelem, avšak může se objevovat i u ostatních destiček. Při zvyšující se tvrdosti materiálu se výmol zužuje a zároveň prodlužuje.

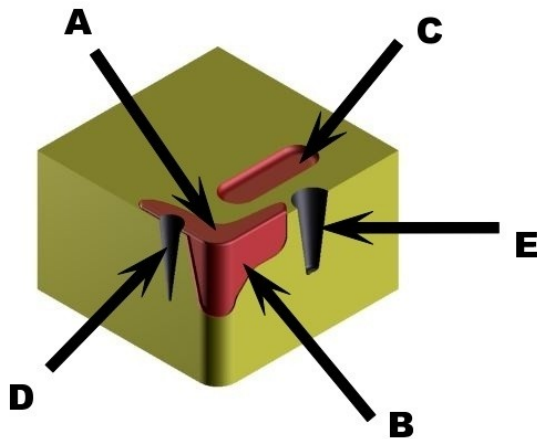
#### *Oxidační rýha na vedlejším hřbetu (D):*

Jedná se o nejvýznamnější kritérium limitující životnost destiček. Zásadně zhoršuje drsnost povrchu obráběné plochy. Tento typ opotřebení vzniká zejména u soustružení.

*Vrubové opotřebení na hlavním břitu (E):*

Vzniká na stykové ploše nástroje s obrobkem. Způsobuje jej zpevnění obráběného materiálu a vzniklé otřepy. Nejčastěji u korozivzdorných ocelí.

Typy opotřebení (A, B, C, D, E) jsou zobrazeny na obrázku číslo 11.



Obr. 11. Typy opotřebení A, B, C, D a E.

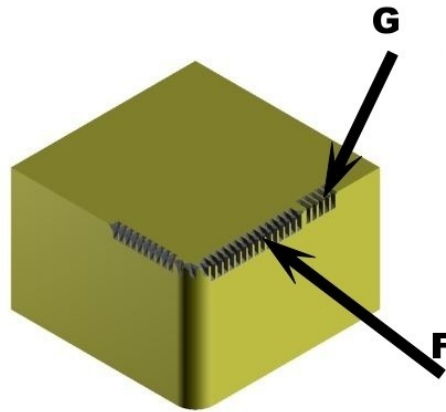
*Křehké porušení řezné hrany (mikrovyštípování), (F):*

Tento typ se objevuje převážně v kombinaci s jinými typy opotřebení. Z tohoto důvodu je obtížné jej jednoznačně identifikovat. Je pozorováno zejména u strojů s nízkou tuhostí.

*Porušování řezné hrany (mimo záběr), (G):*

Vzniká při nesprávném utváření třísky. Při špatném odchodu třísky z řezu naráží na břit a ten ho mechanicky poškozuje

Na obrázku číslo 12 jsou vyobrazeny porušení F a G.



Obr. 12. Typy opotřebení F a G.

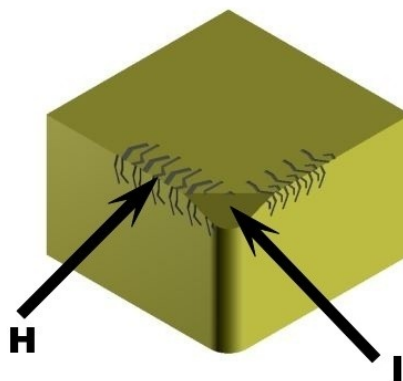
*Hřebenovité trhliny (H):*

Vzniká při přerušovaném řezu v důsledku tepelného zatížení [8].

*Plastická deformace špičky (I):*

Jedná se o výrazné přetížení břitu v důsledku vysokých řezných teplot[8].

Na obrázku číslo 13 jsou vyobrazeny typy opotřebení H a I.



Obr. 13. Typy opotřebení H a I.

### 3 HODNOCENÍ STRUKTURY POVRCHU PO OBRÁBĚNÍ

Struktura povrchu je velmi důležitá složka při hodnocení jakosti výrobku. Má výrazný vliv na životnost, spolehlivost, hlučnost, opotřebení, atd. Měření veličin struktury je popsán normou ČSN EN ISO 4287 od roku 1999.

Nejpoužívanější parametr v technické praxi je drsnost povrchu, která má nejpodstatnější vliv na vznik koroze a únavového lomu (únavový lom nejčastěji vzniká na povrchu, nebo těsně pod ním) [26].

Při jakémkoliv druhu obrábění vzniká charakteristická stopa po nástroji. Vzhled povrchu je určen použitým procesem obrábění a směrem řezu nástroje. V současné době je možnost vytvářet téměř dokonalý povrch. Zvyšování nároku na drsnost povrchu úzce souvisí se zvyšováním nákladů na obrábění.

Samotnou drsnost povrchu lze vypočítat. Vypočtená hodnota je brána jako výchozí bod za ideálních podmínek. Skutečnost se však liší, neboť výsledek je ovlivňován velkým počtem faktorů, které se v procesu vyskytují. [23]

- *Základní faktory ovlivňující drsnost povrchu vzhledem k řeznému nástroji:*  
Stabilita, geometrie břitu, materiál obrobku, řezné podmínky, utváření třísky.
- *Základní faktory ovlivňující drsnost povrchu vzhledem k obráběcímu stroji:*  
Stabilita, prostředí obrábění, chladicí kapalina, technický stav, příkon a tuhost.
- *Základní faktory ovlivňující drsnost povrchu vzhledem k obrobku:*  
Stabilita, druh a způsob tepelného zpracování, upnutí, tolerance rozměrů.

#### 3.1 Základní pojmy

Základním zdrojem informací pro hodnocení jakosti povrchu je užívána profilová metoda. Norma ČSN EN ISO 4287 definuje tři základní geometrické parametry:

- R – pro drsnost povrchu
- W – pro vlnitost povrchu
- P – pro základní profil

Základním zdrojem informací pro nejpoužívanější metodu hodnocení povrchu (profilová metoda), jsou definice.:

- *Profil povrchu* – průsečnice skutečného povrchu a dané roviny.
- *Snímaný profil* – geometrická místa středů snímaného hrotu stanovených parametrů (odvozují se od něj ostatní profily).
- *Referenční profil* – dráha, po které se snímač pohybuje v rovině.
- *Základní profil* – úplný profil pro aplikaci krátkovlnného filtru  $\lambda_s$ .
- *Zbytkový profil* – základní profil získaný snímáním ideálně hladkého a rovného povrchu. Skládá se z odchylky vedení, vnějších a vnitřních poruch a odchylek vzniklých při přenosu profilu.
- *Profil drsnosti* – profil odvozený od základního potlačení složek použitého filtru profilu  $\lambda_c$ . Je základem pro hodnocení parametrů drsnosti.
- *Profil vlnitosti* – profil odvozen postupnou aplikací filtru profilu  $\lambda_f$  a filtru  $\lambda_c$  na základní profil.
- *Základní délka  $l_r$*  – délka ve směru osy x. Používá se pro rozpoznávání nerovnosti charakterizujících daný profil. Základní délka pro drsnost  $l_r$  je číselně rovna hodnotě filtru  $\lambda_c$ .
- *Vyhodnocovaná délka  $l_n$*  – délka ve směru osy x. Používá se pro posouzení vyhodnocovacího profilu. Může obsahovat jednu, nebo více základních délek.

V některých definicích jsou uvedeny filtry profilů, ty slouží pro filtraci (odstranění) nežádoucích složek profilu. Norma ČSN EN ISO 11562:1996 definuje tři základní filtry. [24]

- Filtr  $\lambda_s$  – definuje rozhraní mezi drsností a krátkovlnnými složkami.
- Filtr  $\lambda_c$  – určuje rozhraní mezi složkami drsnosti a vlnitostí.
- Filtr f – určuje rozhraní mezi vlnitostí a dalšími složkami přítomnými na povrchu.

### 3.2 Definice parametrů struktury povrchu

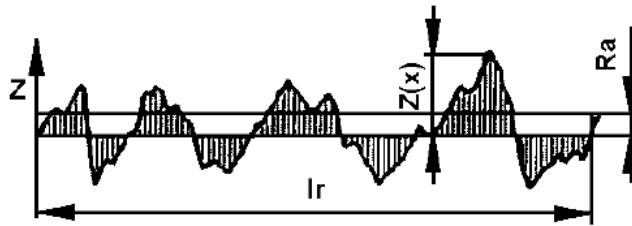
Veškeré termíny a definice jsou stanoveny normou ČSN EN ISO 4287. Zde jsou uvedeny základní pojmy potřebné pro technickou praxi.



### 3.2.1 Výškové parametry

*Střední aritmetická úchylka profilu –  $R_a$ :*

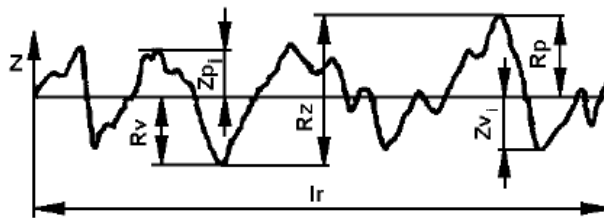
Tato charakteristika je definována jako střední aritmetická hodnota absolutních odchylek profilu v rozsahu délky  $l_m$ . Charakteristika  $R_a$ , tedy popisuje průměrnou hodnotu všech nerovností tak, jako by veškeré špičky a prohlubně byly rovnoměrně rozmístěné. [23][25] U extrémně drsných popřípadě jemných povrchů je tato charakteristika nevýznamná, a proto se často předepisuje s jinými charakteristikami.



Obr. 14. Střední aritmetická úchylka profilu –  $R_a$ . [27]

*Největší výška profilu  $R_z$ :*

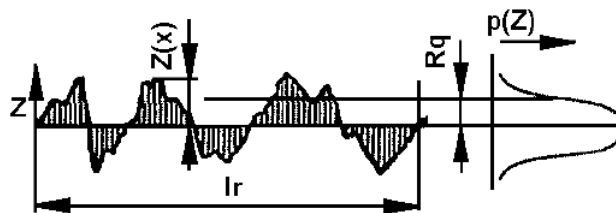
Jedná se o součet výšky nejvyššího výstupku a největší hloubky prohlubně v rozsahu základní délky. Tento profil byl zařazen z důvodu, že parametr  $R_a$  nerozlišuje mezi prohlubní a výškou profilu. Tudíž tato charakteristika poskytuje větší představu o měřeném povrchu.



Obr. 15. Výška nerovnosti profilu -  $R_z$ . [27]

*Průměrná kvadratická úchylka profilu  $R_q$ :*

Lze definovat jako střední kvadratickou hodnotu drsnosti. [23][25]

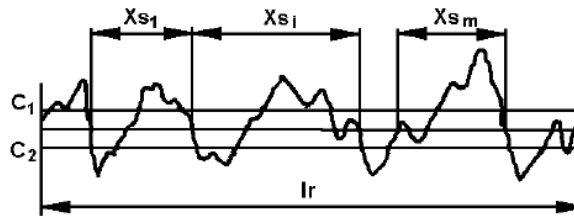


Obr. 16. Průměrná kvadratická úchylka profilu –  $R_q$ . [27]

### 3.2.2 Délkové parametry

*Průměrná šířka vrcholu a prohlubně  $RS_m$ :*

Průměrná hodnota šířek  $X_s$  prvků profilu v rozsahu základní délky  $l_r$ .

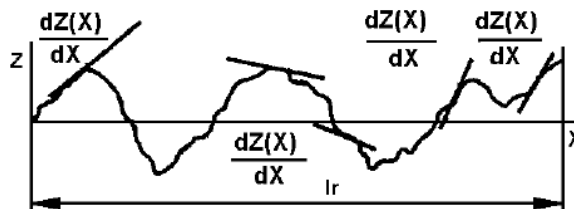


Obr. 17. Parametr  $RS_m$ . [27]

### 3.2.3 Tvarový parametr

*Průměrný kvadratický sklon posuzovaného profilu  $R\Delta q$ :*

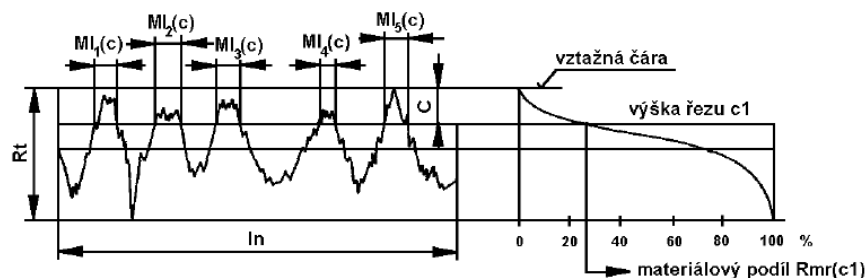
Průměrná kvadratická hodnota sklonu pořadnice  $dZ/dX$  v rozsahu základní délky  $l_r$ . Tento parametr má význam při hodnocení tribologických vlastností, odrazu světla a galvanickém pokovování. [24]



Obr. 18. Parametr  $R\Delta q$ . [27]

*Materiálový podíl profilu  $Rmr^{\circ}$ :*

Procentuální podíl délky materiálu prvků  $MI^{\circ}$  na dané úrovni  $c$  k vyhodnocované délce  $l_n$ .



Obr. 19. Parametr  $Rmr^{\circ}$ . [27]

### 3.3 Pravidla hodnocení struktury povrchu

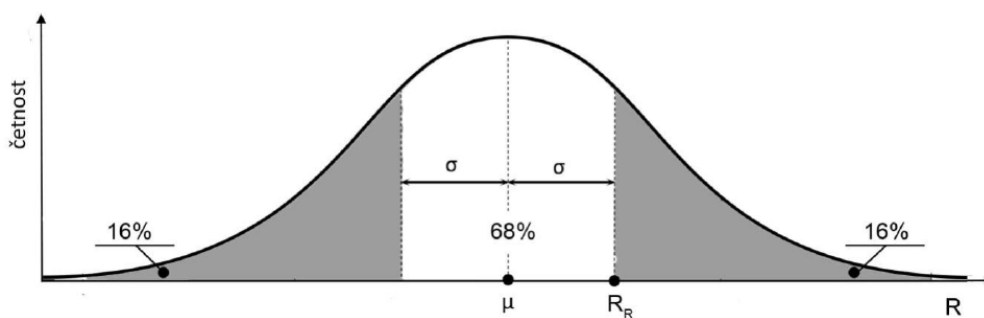
Základním pravidlem při posuzování povrchu je zhodnocení homogenity povrchu. Tato informace je nejčastěji vyhodnocována vizuálně obsluhou. Pokud je povrch po vizuální stránce homogenní, následné vyhodnocování sledované plochy je prováděno pomocí hodnot naměřených přístrojem a porovnáno s hodnotami požadovanými pro funkčnost plochy předepsanými na výkrese, nebo technické dokumentaci. Vyhodnocování se provádí podle normy ČSN EN ISO 4288, a ta stanovuje pravidla pro porovnávání měřených hodnot s tolerančními mezemi.

Sledované parametry nabývají hodnot s určitým rozptylem, s čímž norma počítá a stanovuje pro to pravidlo 16%. [25][26]

#### 3.3.1 Pravidlo 16%

Pravidlo uvádí, že všechny naměřené hodnoty lze považovat za přijatelné, pokud: ne více než 16% všech naměřených hodnot sledovaných parametrů zjišťovaných na vyhodnocovací délce přesáhne hodnotu předepsanou výkresem.

Toto pravidlo je uplatňováno tehdy, jestliže jsou hodnoty na technické dokumentaci opatřeny dolní nebo horní mezí parametru. Na obrázku číslo 20 je znázorněno gaučovo rozdělení pravděpodobnosti výskytu hodnot, dle kterých je pravidlo určováno.



Obr. 20. Gaussovo rozdělení pravděpodobnosti výskytu hodnoty.

#### 3.3.2 Pravidlo maxima

Pokud je na výkresové dokumentaci předepsána největší hodnota parametru, nesmí ji žádná hodnota při kontrole povrchu přesáhnout. Při překročení této meze je výrobek považován za nevyhovující. [25][26]

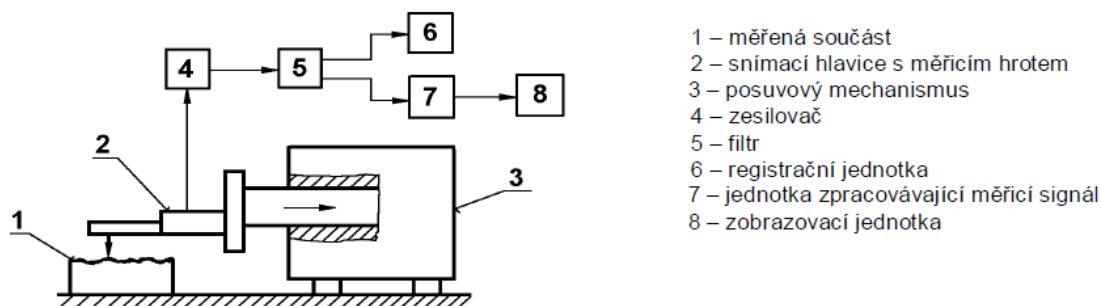
### 3.4 Hodnocení parametrů

Pro rozhodnutí, zda je povrch obrobeneé plochy ve shodě s požadavky na dokumentaci, jsou použity různé druhy parametrů struktury, z nichž každá charakteristika je vyhodnocována na určité délce. Do parametru struktury povrchu se nezahrnují vady povrchu, jako jsou póry a rýhy.

Při kontrole struktury povrchu je nutno zhodnotit, zda naměřené hodnoty jsou spolehlivé. Spolehlivost naměřených hodnot a jejich přesnost získáme při opakovaném měření zkoumaného povrchu. Tedy spolehlivost a přesnost závisí na počtu měření základních délek. Čím větší je počet měření a vyhodnocovací délka, tím větší je spolehlivost. Avšak v praxi není možné měřit každý opracovaný povrch, neboť měření je zdoluhavé a tím i nákladné. Vždy je nutné volit kompromis mezi počtem měření a spolehlivostí daných hodnot. [23]

- *Měření pomocí dotykového profilometru*

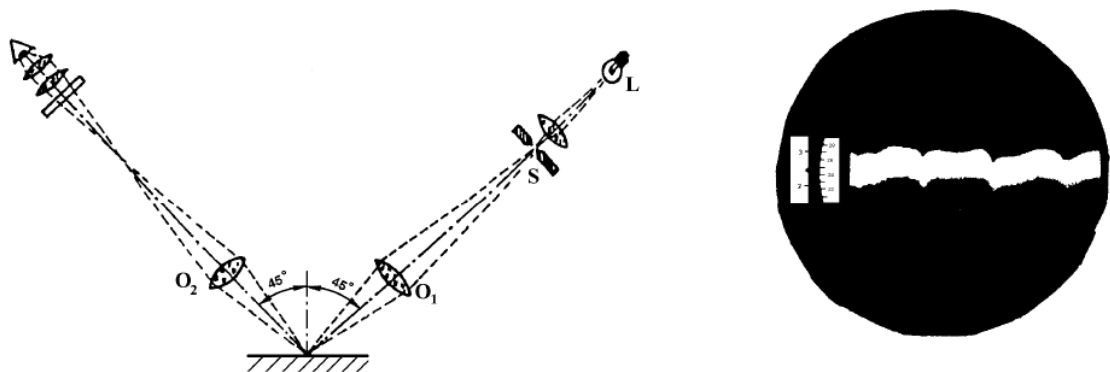
Vyhodnocování drsnosti povrchu je prováděno přístrojem, který za pomoci diamantového nebo safírového hrotu snímá povrch při stanovené přitlačné síle. Při přesouvání hrotu po ploše materiálu, jsou změny zaznamenávány pomocí napětí a indukčnosti. Nejběžnější způsob provedení přístrojů jsou s mechanickým převodem, induktivní, elektromagnetické a elektrodynamické. Princip měření dotykovým profilometrem je vyobrazen na obrázku číslo 17. Přesnost měření je závislá na několika faktorech. Mezi základní lze zařadit poloměr zaoblení hrotu (2  $\mu\text{m}$ , 5  $\mu\text{m}$ , 10  $\mu\text{m}$ ), vrcholový úhel snímače ( $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ), přitlačnou sílu (0,0007 N), rychlost změny měřicí síly, poloměr zaoblení kluzné patky snímače nebo celkové systémové uspořádání snímače. [27]



Obr. 21. Princip měření dotykovým profilometrem. [27]

- *Měření metodou světelného toku*

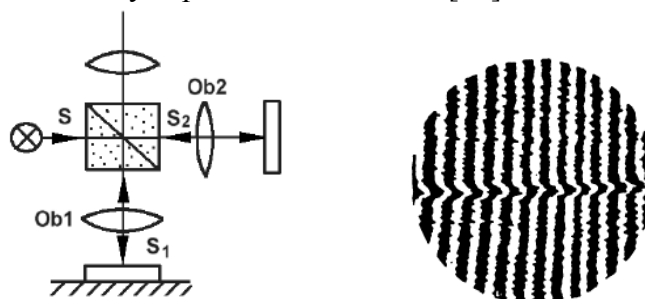
Rovnoběžný svazek paprsků usměrněný štěrbinou do tenké světelné roviny je promítán optickým systémem na měřenou plochu. Svazek je promítán pod úhlem  $45^\circ$ . Obraz vznikne pronikem světelné roviny přes nerovnost měřeného povrchu. Na zobrazovacím zařízení se vyobrazí světlezelená stužka znázorňující nerovnost plochy. Princip je znázorněn na obrázku číslo 18.



Obr. 22. Metoda světelného řezu – princip a zobrazení v okuláru. [27]

- *Měření s využitím interference světla*

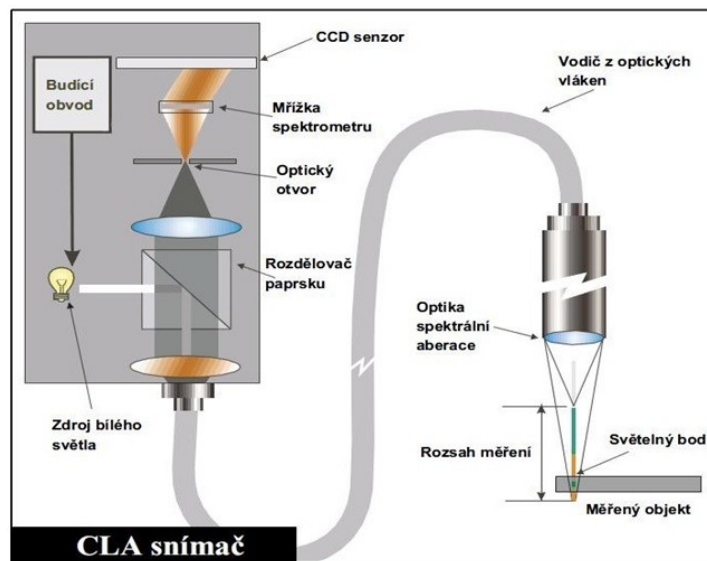
Princip spočívá ve vyslání paprsku ze zdroje světla přes polopropustné zrcadlo vytvořené ve skleněném hranolu, v němž se rozdělí na dva dílčí paprsky. Část paprsku míří na měřený povrch a zpět, a druhá část paprsku se odrazí od odrazného zrcadla zpět. Následně se oba paprsky spojí (interferují) a směřují do okuláru mikroskopu. Vzniklé proužky jsou sledovány na okuláru přístroje a vyhodnocovány. Veškeré povrchové deformace se projevují vychýlením proužků v daném místě. Nerovnost povrchu se následně vypočítá z výchylky tmavých a světlých proužků na okuláru. [27]



Obr. 23. Princip využití interference světla pro měření struktury povrchu. [27]

- *Talysurf CLI snímač*

Vysoce účinné měřicí zařízení k provedení rychlého prostorového měření a vyhodnocení povrchu s velmi vysokým rozlišením. CLI snímač, nabízí možnost měření povrchu ve třech osách. Jsou schopni provádět hodnocení jak ve 2D tak ve 3D. Největší výhodou tohoto přístroje je schopnost měřit indukčním dotykovým způsobem, nebo bezdotykovým způsobem laserovou triangulační sondou a CLA konfokálním snímačem. Zjednodušený princip CLA snímače je znázorněn na obrázku číslo 20. [27]



Obr. 24. Schéma CLA snímače. [28]

## 4 SHRnutí TEoretické Části a Cíle PRAktické Části PRÁCE

Teoretická část se v první řadě zabývá klasifikací kompozitních materiálů a jejich základních dvou složek. Nejprve je popsána výztužná složka kompozitů, její druhy a základní vlastnosti. Následuje druhá významná složka, a to matrice. Práce stručně provází jednotlivými druhy matic, které jsou v technické praxi užívané. První kapitola je zakončena stručným přehledem výroby kompozitních materiálů s uvedením výhod a nevýhod jednotlivých metod. Následuje druhá část teoretického rozboru, zabývající se obráběním kompozitů. Popisuje se zde problematika obrábění, která se odlišuje od běžného obrábění kovových a nekovových materiálů. Patrné zvláštnosti jsou již ve tvorbě třísky, chlazení řezného procesu, samotného odvodu tepla z místa řezu nebo delaminaci obráběného materiálu. Blíže je popsána problematika opotřebení nástroje, jeho mechanismus a typy opotřebení. Poslední kapitola teoretické části seznamuje s hodnocením struktury povrchu po obrábění a vysvětluje základní pojmy dle normy. Dále definuje výškové, délkové a tvarové parametry. V neposlední řadě je pozornost zaměřena na pravidla pro hodnocení povrchu a metody snímání.

Praktická část práce se bude soustředit na obrábění tří typů kompozitních materiálů. Veškeré testování a měření bude prováděno v prostorách školních dílen. Obrábění bude probíhat na 3osé CNC frézce C - 442 HWT a měření parametrů povrchu se bude hodnotit pomocí dotykového profilometru Mitutoyo SJ – 410. Všechny tři typy materiálů budou podrobené čtyřem typům frézovacích strategií za jednotných řezných podmínek. Nejprve bude vyfrézována drážka klasickým čelním frézováním (šířka drážky 6 mm), následně se vyfrézuje drážka pomocí trochoidního cyklu (šířka drážky 8 mm). U drážek se bude hodnotit jakost povrchu ze dna. U drážek bude proměřena i jejich šířka a vyhodnocen delamináčnı faktor. Následně bude materiál obráběn bočním frézováním jak sousledně, tak nesousledně. U CFRP materiálu se navíc vyhodnotí, zda nástroj frézuje stejnou jakost v celém záběru při bočním frézování. Vyhodnocené budou parametry jak pro každou strategii zvlášť, tak komplexně pro celý typ kompozitního materiálu.

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**



## 5 TESTOVANÝ MATERIÁL

I když v dnešní době neustále narůstá počet různých prací zaměřujících se na obrábění kompozitních materiálů, neustále tato oblast zůstává v pozici, kdy zdaleka nedosahuje dostatečným množstvím dat a zkušeností, jako je tomu u kovových materiálů. Může za to nejen velké množství variant matrice a výztuže, ale také nehomogenita materiálu a nemožnost přesného definování orientace vláken.

Proto i v této práci byly použity tři typy kompozitních materiálů. Bude sledováno nejen chování nástrojů na tom či onom materiálu, ale bude možné porovnat sledované charakteristiky mezi jednotlivými vzorky. Díky tomu bude možné pozorovat chování v těchto třech typech kompozitů a vyvodit jasné závěry jak u jednotlivých typů, tak i komplexně.

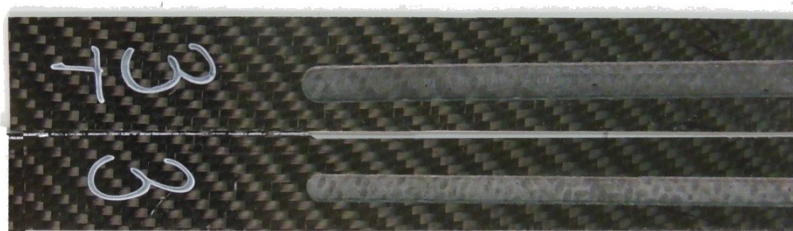
### 5.1 Uhlíkový kompozit

Uhlíkový kompozit, označovaný anglickou zkratkou CFRP (carbon fiber reinforced polymer) je kompozitní materiál vyztužený uhlíkovým vláknem v epoxidové matrici. Tento kompozit, je hojně využíván v mnoha odvětví průmyslu, a to díky velmi dobré pevnosti a zároveň nízké hmotnosti. Mechanické a fyzikální vlastnosti jsou uvedeny v tabulce číslo 3.

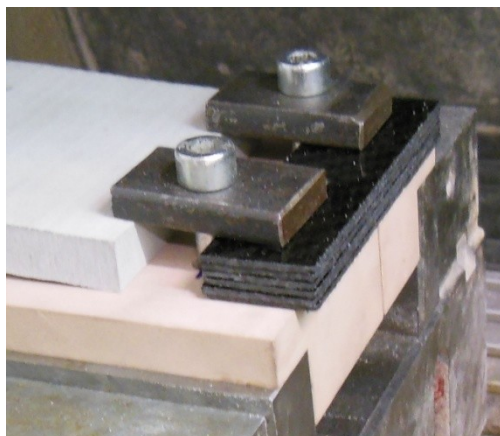
Tab. 3. Základní vlastnosti CFRP. [29]

| Mechanické vlastnosti                             |                             |
|---|-----------------------------|
| Modul pružnosti [GPa]                             | 69 – 150                    |
| Pevnost v tahu [MPa]                              | 550 – 1050                  |
| Mez kluzu [MPa]                                   | 550 – 1050                  |
| Tažnost [%]                                       | 0,32 – 0,35                 |
| Tvrdość Vickers [HV]                              | 10,8 – 20,8                 |
| Lomová houževnatost [MPa/m <sup>1/2</sup> ]       | 6,12 – 20                   |
| Fyzikální vlastnosti                              |                             |
| Teplota skelného přechodu [°C]                    | 99,85 – 179,9               |
| Měrné teplo [J/kg.K]                              | 901,7 – 1037                |
| Koeficient tepelné roztažnosti [K <sup>-1</sup> ] | 1 – 4.10 <sup>-6</sup>      |
| Tepelná vodivost [W/m.K]                          | 1,28 – 1,6                  |
| Elektrický odpor [μΩ.cm]                          | 1,65 – 9,46.10 <sup>5</sup> |

Pro testování byly použity vzorky o síle 2 mm. Jedna sada vzorků se využila pro obrábění drážky o hloubce 1 mm, a druhá sada vzorků se naskládala na sebe do celkové tloušťky 12 mm (6 vzorků po 2 mm) a využila se tak pro frézování bokem frézy. Na obrázku číslo 25 je vyobrazen vzorek s drážkou a na obrázku číslo 26 je znázorněna sada vzorků pro druhý test.



Obr. 25. Vzorky CFRP s drážkou.



Obr. 26. Vzorky CFRP pro boční frézování.

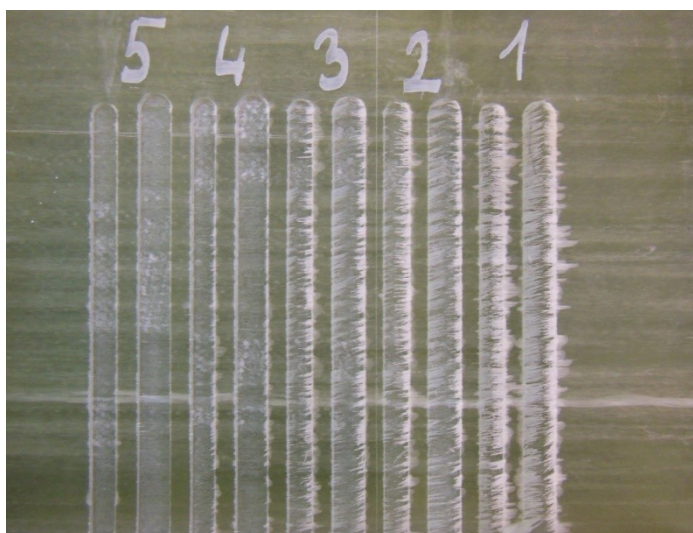
## 5.2 Kompozit plněný sklem

Zde se jedná o kompozitní materiál vyztužený skelným vláknem a polyesterovou maticí, je označován anglickou zkratkou GFRP (glass fiber fiber reinforced polymer). Tento materiál se též vyznačuje velmi dobrými mechanickými vlastnostmi a je používán napříč průmyslovým spektrem. Oproti CFRP, má výrazně horší mechanické vlastnosti, jako je modul pružnosti, nebo pevnost v tahu, lépe na tom je z tažností. V tabulce číslo 4 jsou uvedeny základní mechanické a fyzikální vlastnosti.

Tab. 4. Základní vlastnosti GFRP. [29]

| Mechanické vlastnosti                             |                              |
|---|------------------------------|
| Modul pružnosti [GPa]                             | 15 - 28                      |
| Pevnost v tahu [MPa]                              | 138 - 241                    |
| Mez kluzu [MPa]                                   | 110 – 192                    |
| Tažnost [%]                                       | 0,85 – 0,95                  |
| Tvrdość Vickers [HV]                              | 10,8 – 21,5                  |
| Lomová houževnatost [MPa/m <sup>1/2</sup> ]       | 7 - 23                       |
| Fyzikální vlastnosti                              |                              |
| Teplota skelného přechodu [°C]                    | 147 - 197                    |
| Měrné teplo [J/kg.K]                              | 1000 - 1200                  |
| Koeficient tepelné roztažnosti [K <sup>-1</sup> ] | 8,6 – 32,96.10 <sup>-6</sup> |
| Tepelná vodivost [W/m.K]                          | 0,4 – 0,55                   |
| Elektrický odpor [μΩ.cm]                          | 2,4 – 1,9.10 <sup>22</sup>   |

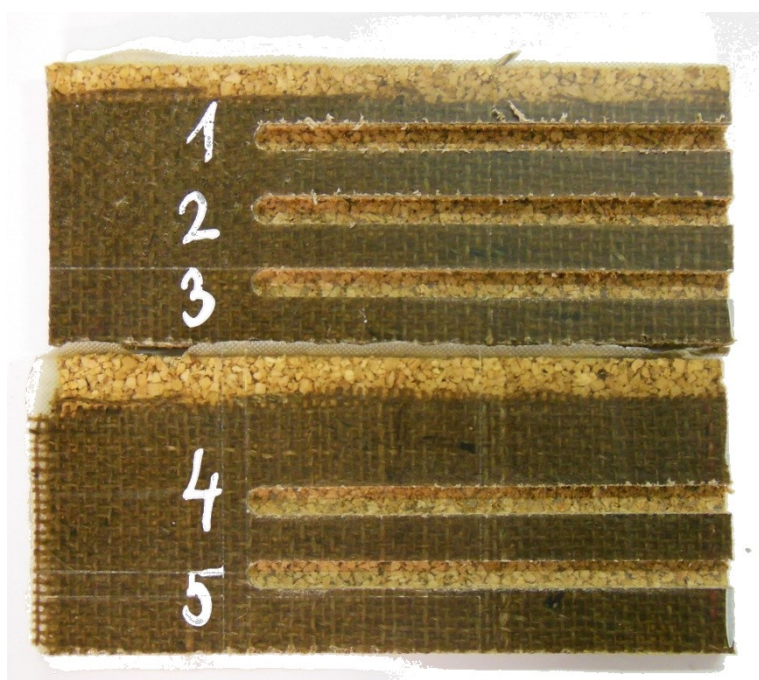
Pro testování byla použita deska o síle 10 mm. Jak výroba drážek, tak boční frézování se provádělo na jednom vzorku. Na obrázku číslo 27 je ukázán vzorek materiálu GFRP. Drážky byly vyrobeny s rozstupem 5 mm, aby bylo možné sledovat delaminaci. Boční frézování probíhalo vždy po dvou frézováních o délce 100 mm s okamžitým vyhodnocením. Vyhodnocení muselo probíhat hned po frézování, neboť byl materiál použit znovu na další nástroje.



Obr. 27. Vzorek GFRP s drážkami.

### 5.3 Sendvičový kompozit s korkovým jádrem

Kompozitní sendvičový materiál Corecork NL10 je složen z prepregu s jutovým vláknem a korkovým jádrem o síle 8 mm. Materiál se vyznačuje dobrými mechanickými vlastnostmi a velmi nízkou pořizovací cenou. Vzorek byl široký 70 mm a dlouhý cca 150 mm. Testování se mírně lišilo od obou předchozích materiálů, neboť hloubka řezu byla 4 mm. Tím se docílila možnost při jedné jízdě naměřit jak jakost povrchu na boku drážky, tak na jejím dně. Na obrázku 28 je znázorněn vzorek s drážkami. Mechanické vlastnosti materiálu corecork NL10 v sendvičovém stavu jsou uvedeny v tabulce číslo 5.



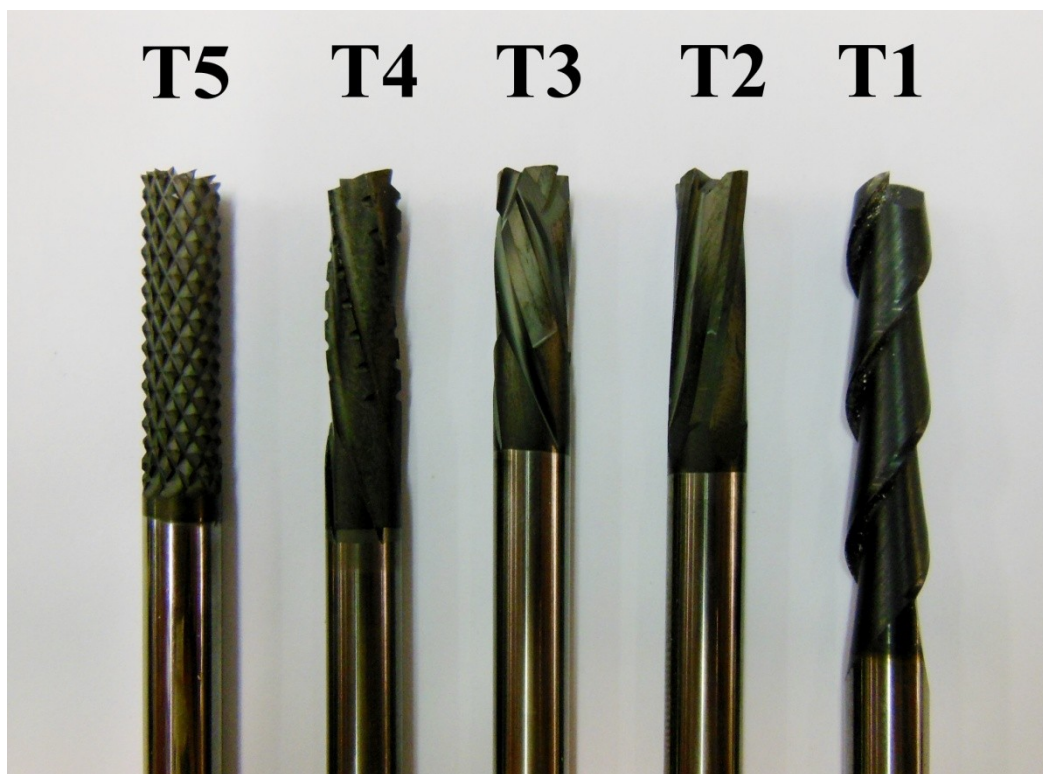
Obr. 28. Vzorek Corecorku NL10.

Tab. 5. Základní vlastnosti corecorku NL10 v sendvičovém stavu. [30]

| Mechanické vlastnosti                              |                     |
|--|---------------------|
| Modul pružnosti [GPa]                              | 3,5                 |
| Pevnost v tahu [MPa]                               | 19                  |
| Fyzikální vlastnosti                               |                     |
| Teplota skelného přechodu [ $^{\circ}\text{C}$ ]   | 180                 |
| Koeficient tepelné roztažnosti [ $\text{K}^{-1}$ ] | $110 \cdot 10^{-6}$ |
| Tepelná vodivost [ $\text{W/m.K}$ ]                | 0,032               |

## 6 TESTOVANÉ NÁSTROJE

Nástroje byly voleny tak, aby byly primárně vhodné pro obrábění kompozitních materiálů. Celkem se použilo 5 karbidových fréz s rozdílnými geometriemi od firmy SECO. Každá z nich disponuje povlakem, ty budou popsány u jednotlivých typů nástrojů zvlášť. Byl použit jednotný průměr fréz, a to 6 mm. Výrobce těchto monolitních karbidových nástrojů zařadí naše použité nástroje do kategorie JC800 a jeden do kategorie JS500. Tato řada zajišťuje vysokou účinnost při obrábění moderních kompozitních materiálů. Jednotlivé geometrie jsou navrženy tak, aby eliminovaly delaminaci materiálu a zlepšily jakost povrchu. Na obrázku číslo 29 jsou nafoceny všechny použité typy fréz. [32]



Obr. 29. Testované nástroje firmy SECO.

### 6.1 Nástroj JS 522 (T1)

Monolitní fréza určena pro jemné dokončování s možností obrábění vysokých stěn na jeden záběr. Mají speciálně upravenou řeznou hranu pro dosažení lepší kvality povrchu a tuhé jádro poskytuje vynikající stabilitu. Jediná ze všech testovaných fréz disponuje povlakem MEGA – 64. Povlak MEGA – 64 zaručuje výbornou trvanlivost při obrábění abrazivního materiálu. Na obrázku číslo 30 je znázorněn nástroj, který bude dále označován jako T1. V tabulce číslo 6 jsou základní parametry. [31]



Obr. 30. Nástroj JS 522 (T1).

Tab. 6. Parametry nástroje JS 522 (T1). [31]

|   |                |
|---|----------------|
| Výrobce                                 | SECO           |
| Průměr nástroje [mm]                    | 6              |
| Materiál                                | Slinutý karbid |
| Povlak                                  | MEGA – 64      |
| Počet břitů                             | 2              |
| Délka nástroje / délka řezné části [mm] | 80/30          |

## 6.2 Nástroj JC 880 (T2)

4břitá fréza pro velké spektrum využití. Díky malému stoupání šroubovice ( $10^0$ ), zaručuje nízkou hodnotu delaminace. V kombinaci s povlakem DURA získává nástroj mnohem vyšší životnost a více odolává abrazivním účinkům výztuže kompozitních materiálů. Výrobce udává zvýšení životnosti 5x až 6x, oproti nepovlakovaným nástrojům.



Obr. 31. Nástroj JC 880 (T2).

Tab. 7. Parametry nástroje JC 880 (T2). [31]

|   |                |
|---|----------------|
| Výrobce                                 | SECO           |
| Průměr nástroje [mm]                    | 6              |
| Materiál                                | Slinutý karbid |
| Povlak                                  | DURA           |
| Počet břitů                             | 4              |
| Délka nástroje / délka řezné části [mm] | 65/18          |

### 6.3 Nástroj JC 840 (T3)

Fréza navržena především pro sendvičové materiály, neboť disponuje dvojitou šroubovicí. Navržený úhel a rozdílné úhly šroubovice zaručují vysokou stabilitu při obrábění těžce obrobitelných materiálů.



Obr. 32. Nástroj JC 840 (T3).

Tab. 8. Parametry nástroje JC 840 (T3). [31]

|   |                |
|---|----------------|
| Výrobce                                 | SECO           |
| Průměr nástroje [mm]                    | 6              |
| Materiál                                | Slinutý karbid |
| Povlak                                  | DURA           |
| Počet břitů                             | 4              |
| Délka nástroje / délka řezné části [mm] | 65/12          |

### 6.4 Nástroj JC 860 (T4)

Nástroj účelově navržen na výrobu drážek a boční frézování. Především pro frézování voštinových prvků s uhlíkovým vláknem, nebo vláknem skleněným.



Obr. 33. Nástroj JC 860 (T4).

Tab. 9. Parametry nástroje JC 860 (T4). [31]

|   |                |
|---|----------------|
| Výrobce                                 | SECO           |
| Průměr nástroje [mm]                    | 6              |
| Materiál                                | Slinutý karbid |
| Povlak                                  | DURA           |
| Počet břitů                             | 5              |
| Délka nástroje / délka řezné části [mm] | 70/18          |

## 6.5 Nástroj JC 870 (T5)

Posledním testovaným nástrojem byla levořezná vícebřitá fréza. Tento typ je vhodný na různorodé materiály a lze ji použít na velké množství frézovacích strategií.



Obr. 34. Nástroj JC 871 (T5).

Tab. 10. Parametry nástroje JC 871 (T5). [31]

|   |                |
|---|----------------|
| Výrobce                                 | SECO           |
| Průměr nástroje [mm]                    | 6              |
| Materiál                                | Slinutý karbid |
| Povlak                                  | DURA           |
| Počet břitů                             | -              |
| Délka nástroje / délka řezné části [mm] | 65/20          |

## 6.6 Kontrola průměru nástrojů

Aby bylo možné vyhodnotit rozměry vyfrézovaných drážek, muselo být provedeno přeměření průměru řezné části fréz. Měření bylo provedeno na komparačním délkoměru SOMET, kdy byl vyroben nejprve kalibr o průměru  $6 \pm 0,05$  mm a následně přeměřeny jednotlivé nástroje. Měření na každém nástroji proběhlo 10 x na třech různých místech. V tabulce číslo 11 jsou udané hodnoty od výrobce a naměřené hodnoty. Všechny nástroje jsou vyrobeny do mínusu a mělo by se to podepsat na vyrobených drážkách.

Tab. 11. Srovnání naměřených průměrů řezné části s daty od výrobce.

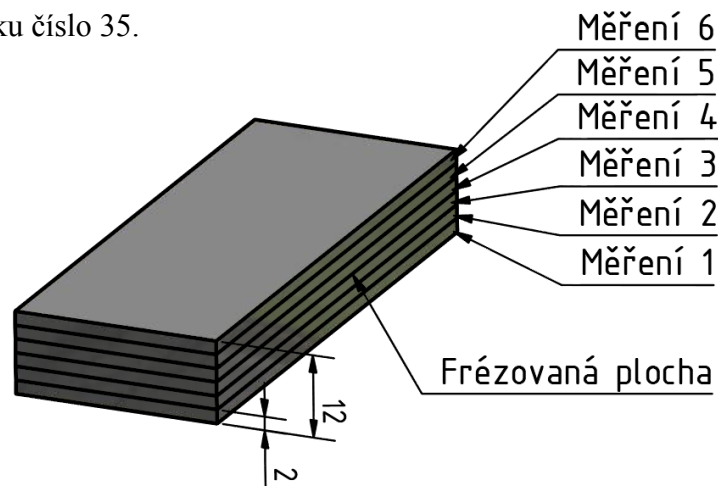
|   | T1            | T2            | T3            | T4            | T5            |
|---|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Průměr řezné části<br>udaný výrobcem [mm] | 6             | 6             | 6             | 6             | 6             |
| Naměřený průměr řezné<br>části [mm]       | 5,97<br>±0,02 | 5,95<br>±0,01 | 5,96<br>±0,01 | 5,89<br>±0,02 | 5,92<br>±0,01 |



## 7 FRÉZOVÁNÍ VZORKŮ

Primárně byly testovány tři typy materiálů, a to kompozitní materiál s uhlíkovým vláknem, kompozitní materiál se skelným vláknem a kompozitní materiál s korkovým jádrem. Jednotlivé výsledky byly vyhodnoceny pro daný materiál a následně komplexně porovnány. Při každém testování se sledovalo několik parametrů.

V první řadě byly měřeny charakteristiky povrchu, jako je Ra, Rz a Rsm. Charakteristika Ra a Rz jsou běžně používané v téměř každé praxi, nicméně charakteristika Rsm již tak běžná není. Průměrná šířka vrcholu a prohlubně, tedy Rsm, je oproti Ra a Rz charakteristika délková. Do testování byla zařazena právě z důvodu porovnání a lepšího pochopení, popřípadě zjištění závislosti mezi výškovými a délkovými charakteristikami. Hodnoty byly získávány ze dvou typů frézovaných ploch. Nejprve bylo měřeno dno, při frézování drážky. U všech třech testů se frézovaly dva typy drážek, a to běžná drážka (šířka drážky 6 mm) a drážka trochoidní (šířka drážky 8 mm). Druhým typem byla plocha po bočním frézování a zde se měřily hodnoty jak ze sousledného, tak z nesousledného frézování. Navíc u bočního frézování CFRP materiálu byly hodnoty měřeny z několika míst tak, aby se zjistilo, zda nástroje obrábí v celém záběru stejnou jakost. Princip měření bočního frézování je znázorněn na obrázku číslo 35.



Obr. 35. Princip měření bočního frézování.

V další části byly překontrolovány vyfrézované drážky, a to jak standardní, tak i drážky vyfrézované trochoidním cyklem. Naměřené hodnoty byly vyhodnoceny s ohledem na samotné rozměry jednotlivých nástrojů. Posledním zkoumaným parametrem byl delami-nační faktor. Z hlediska zjištěných hodnot byla určena vhodnost jednotlivých nástrojů k tomu, či onomu materiálu.

## 7.1 CNC frézka

Jelikož jsou nástroje malého průměru a jejich řezné podmínky dosahují vysokých hodnot, musel se zvolit adekvátní stroj, který dostatečně pokryje požadované podmínky. Z tohoto důvodu byla zvolena CNC frézka C – 442 HWT od firmy AZK. Její základní parametry jsou uvedeny v tabulce číslo 11. Základním limitujícím faktorem pro volbu stroje byly otáčky vřetene. Při doporučených řezných podmínkách bylo potřeba dosáhnout více jak 5000 otáček/min. Frézka je zobrazena na obrázku číslo 36.



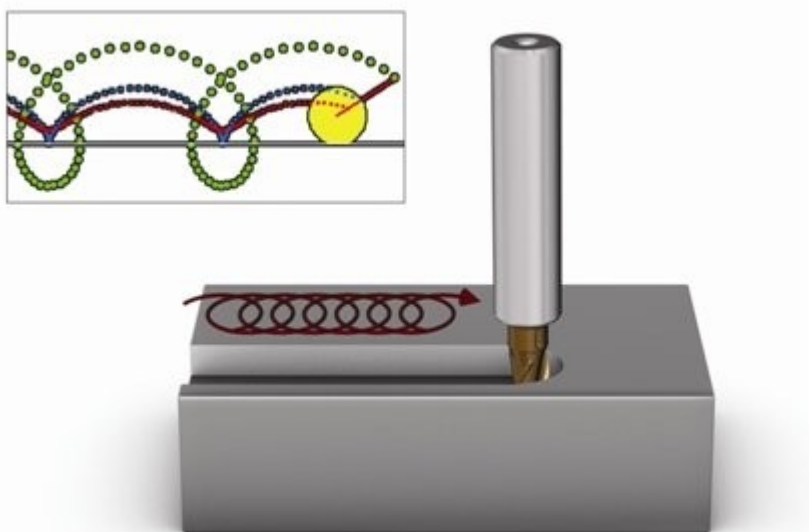
Obr. 36. CNC frézka C – 442 HWT.

Tab. 12. Technické parametry CNC frézky C – 442 HWT.

|   |                |
|---|----------------|
| Příkon motoru [W]                       | 1000           |
| Otáčky vřetene [ot/min]                 | 2000 – 25 000  |
| Programovatelná rychlost posuvu [m/min] | Max. 3         |
| Programový krok [mm]                    | 0,00625        |
| Velikost pracovní plochy [mm]           | 500 x 500 x 8  |
| Maximální upínací průměr [mm]           | 10             |
| Formát NC programu                      | ISO, APT, HGPL |

## 7.2 NC program

Pro práci na CNC frézce bylo nutné vytvořit part programy, díky kterým se stroj řídil. Programy byly tři, z toho dva jednoduché a jeden složitý, který musel být vygenerován pomocí CAM programu. Pro frézování drážky a pro boční frézování byl program napsán v textovém editoru a jeho ukázka je v příloze PI a PII. Part program pro trochoidní frézování bylo nutné nasimulovat v programu NX Siemens 10, neboť jeho dráha je velmi složitá a na 100 mm dlouhou drážku obsahoval cca 600 řádků. Dráha trochoidního frézování je vyobrazena na obrázku číslo 37.



Obr. 37. Dráha při trochoidním frézování.[33]

## 7.3 Volba řezných podmínek

Aby bylo možné vyvodit závěry z naměřených hodnot, bylo nutné zvolit jedny řezné podmínky. Jelikož se řezná rychlost použitých nástrojů pohybuje v rozmezí od 50 m/min do 200 m/min, byla zvolena hodnota 100 m/min. Tato hodnota nebyla zvolena pouhou úvahou, ale plynule navazuje na práci Ing. Solařika [34], který ji ve své diplomové práci určil jako nejvhodnější z hlediska silového zatížení. Otáčky a posuvová rychlost byly dopočítány dle známých vzorců. Ze vztahu 1 se dopočítaly otáčky a ze vztahu 2 posuvová rychlost. Přehled řezných parametrů je uveden v tabulce číslo 12.

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} \quad (1)$$

kde:  $n$  [ot./min] - otáčky nástroje  
 $v_c$  [m/min] - řezná rychlost  
 $D$  [mm] - průměr frézy

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{100 \cdot 1000}{\pi \cdot 6} = 5310 \text{ ot./min}$$

$$v_f = f_z \cdot z \cdot n \quad (2)$$

kde:  $n$  [ot./min] - otáčky nástroje  
 $v_f$  [mm/min] - posuvová rychlost  
 $z$  [mm] - počet zubů frézovací hlavy  
 $f_z$  [mm/zub] - posuv na zub

$$v_f = f_z \cdot z \cdot n = 0,05 \cdot 2 \cdot 5310 = 550 \text{ mm/min}$$

Tab. 13. Řezné podmínky pro frézování.

| Frézování drážky                 |      | Boční frézování                  |         |
|----------------------------------|------|----------------------------------|---------|
| Řezná rychlost $v_c$ [m/min]     | 100  | Řezná rychlost $v_c$ [m/min]     | 100     |
| Posuvová rychlost $v_f$ [mm/min] | 550  | Posuvová rychlost $v_f$ [mm/min] | 550     |
| Otáčky $n$ [ot./min]             | 5310 | Otáčky $n$ [ot./min]             | 5301    |
| Šířka záběru $a_e$ [mm]          | 6    | Šířka záběru $a_e$ [mm]          | 0,6     |
| Hloubka řezu $a_p$ [mm]          | 1    | Hloubka řezu $a_p$ [mm]          | 10 - 12 |
| Posuv na zub $f_z$ [mm/zub]      | 0,05 | Posuv na zub $f_z$ [mm/zub]      | 0,5     |

## 8 VYHODNOCENÍ

Pro vyhodnocení bylo využito několik různých přístrojů. Zejména pak dotykový profilometr Mitutoyo SJ – 410. Přístroj byl nastaven tak, aby současně měřil všechny tři potřebné parametry ( $R_a$ ,  $R_z$  a  $R_{sm}$ ). Diamantový hrot byl zvolen se špičkou  $2\mu\text{m}$  s výrobním označením 12AAC731. Pouze u materiálu Corecork NL10 musel být hrot vyměněn za dotyk se špičkou  $5\mu\text{m}$  s výrobním číslem 12AAB403. Rychlost snímání  $0,5\text{ m/s}$ , a filtr byl nastaven na  $\lambda_c = 2,5$ . Celková délka měření s náběhem a přeběhem tedy činila  $15\text{ mm}$ . Každý vzorek byl přeměřen na třech místech. Měření daného místa bylo provedeno  $5x$ , tudíž z každého vzorku bylo získáno patnáct hodnot, které byly následně statisticky zpracovány do box-plotového diagramu pomocí programu STATISTICA 12. Přístroj umožňoval přímý tisk naměřených hodnot, nicméně z úspory času byly hodnoty přímo odečítány z obrazovky a zapisovány do tabulkového dokumentu. V příloze P III jsou uvedeny příklady vytisknuté pomocí přístroje. Měřicí přístroj Mitutoyo SJ – 410 je ukázán na obrázku číslo 38.



*Obr. 38. Dotykový profilometr Mitutoyo SJ – 410.*

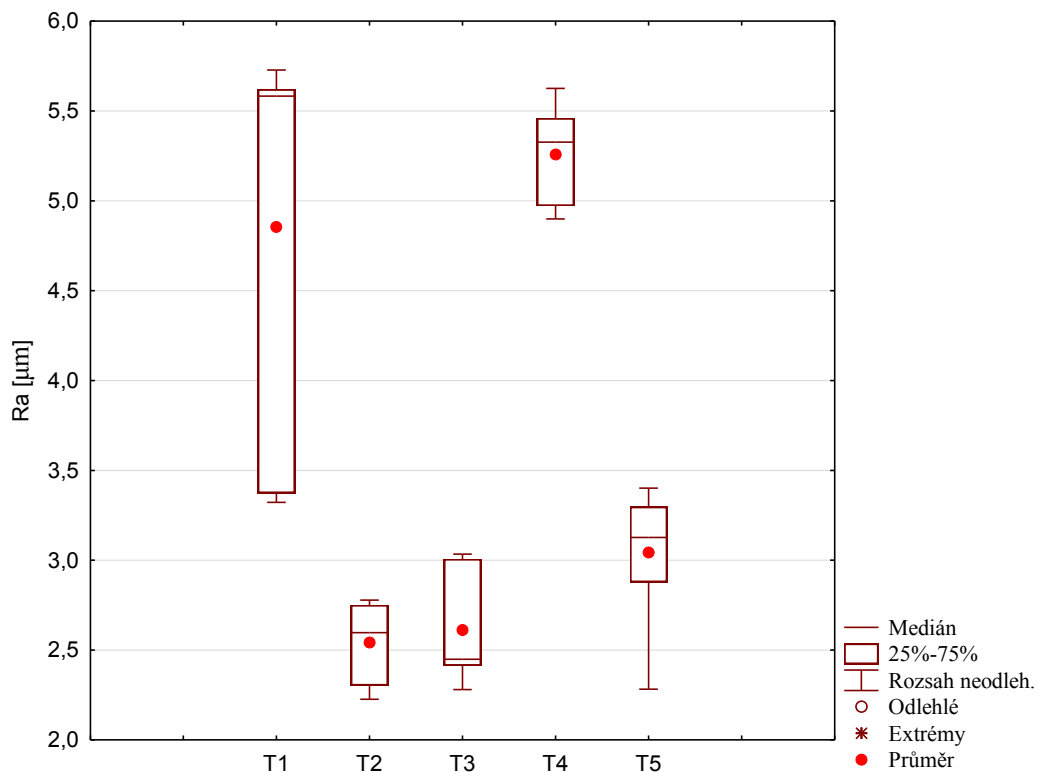
Další měření bylo prováděno pomocí digitálního posuvného měřítka Mitutoyo CD 15 – PC. Pomocí tohoto měřidla se vyhodnocovala šířka vyfrézované drážky. Měřily se oba dva typy drážek, jak běžná o šířce  $6\text{ mm}$  tak drážka vyrobena trochoidním frézováním o šířce  $8\text{ mm}$ . Posuvným měřítkem byla též vyhodnocena delaminace.

## 8.1 Vyhodnocení CFRP

U kompozitu s uhlíkovou výztuží vyšel pro všechny tři testované parametry nejlépe nástroj T3 a T2. Parametr Ra byl u nástrojů T1 a T4 zhruba o 70% horší. Parametr Rz byl srovnatelný u všech nástrojů a parametr Rsm se zvýšil cca o 30%. Celkem markantní změna nastala u trochoidního frézování, kdy se většina parametrů výrazně zlepšila u všech nástrojů. U trochoidního frézování se nástroje T1 a T4 vyrovnali parametrům, které vykazovali nástroje T2 a T3 při frézování normální drážky. Jakost povrchu při frézování nástrojem T2 a T3 se oproti normální drážce zlepšila u parametru Ra o 43%, tedy z 2,54  $\mu\text{m}$  u nástroje T2 na 1,27  $\mu\text{m}$  a u nástroje T3 z 2,61  $\mu\text{m}$  na 0,96  $\mu\text{m}$ . Také u parametru Rz došlo ke zlepšení a to z 19,61  $\mu\text{m}$  na 13,01  $\mu\text{m}$  u T2 a u T3 z 22,85  $\mu\text{m}$  na 6,96  $\mu\text{m}$ . Na obrázku číslo 39 je ilustrační graf znázorňující hodnoty parametru Ra pro normální drážku. Souhrn všech hodnot je v tabulce 14. Veškeré vyhodnocování bylo prováděné s pravděpodobností 95,45 %, podle pravidla dvou sigma ( $\mu - 2\sigma$ ,  $\mu + 2\sigma$ ).

Tab. 14. Hodnoty parametrů při čelním frézování CFRP

|                   |                       | T1                   | T2                  | T3                  | T4                  | T5                  |
|-------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Normální drážka   | Ra [ $\mu\text{m}$ ]  | 4,86<br>$\pm 1,1$    | 2,54<br>$\pm 0,2$   | 2,61<br>$\pm 0,29$  | 5,26<br>$\pm 0,24$  | 3,04<br>$\pm 0,3$   |
|                   | Rz [ $\mu\text{m}$ ]  | 31,71<br>$\pm 2,02$  | 19,61<br>$\pm 3,6$  | 22,85<br>$\pm 5,81$ | 36,59<br>$\pm 1,95$ | 21,3<br>$\pm 3,43$  |
|                   | Rsm [ $\mu\text{m}$ ] | 633<br>$\pm 85,2$    | 247,3<br>$\pm 37,4$ | 297,4<br>$\pm 29,9$ | 415,7<br>$\pm 55,7$ | 300,6<br>$\pm 25,4$ |
| Trochoidní drážka | Ra [ $\mu\text{m}$ ]  | 2,45<br>$\pm 0,23$   | 1,27<br>$\pm 0,13$  | 0,96<br>$\pm 0,21$  | 2,18<br>$\pm 0,3$   | 1,65<br>$\pm 0,1$   |
|                   | Rz [ $\mu\text{m}$ ]  | 24,59<br>$\pm 5,47$  | 13,01<br>$\pm 2,79$ | 6,96<br>$\pm 1,43$  | 19,01<br>$\pm 6,46$ | 10,64<br>$\pm 2,63$ |
|                   | Rsm [ $\mu\text{m}$ ] | 558,1<br>$\pm 108,1$ | 291,9<br>$\pm 95,5$ | 143,6<br>$\pm 66,2$ | 319,6<br>$\pm 95,6$ | 146,3<br>$\pm 30,9$ |



Obr. 39. Hodnoty Ra pro CFRP (dno)

Získávání hodnot po bočním frézování probíhalo ze šesti vrstev po pěti měřeních. Aby mohly být hodnoty statisticky zpracované, musela být otestována hypotéza, která tvrdí, že náhodný výběr  $x_1, \dots, x_n$  pochází z normálního rozdělení. Pro potvrzení této hypotézy byl použit Shapiro-Wilkův test. Podstatou testu je zjištění, zda se hodnoty sestrojeného kvantil-kvartilového grafu (Q-Q plotu) významně liší od regresní přímky proložené těmito body. Testování bylo provedeno programem Statistica 10. Výsledkem je hodnota testové statistiky  $W$ , která by se měla přibližovat číslu 1. Čím blíže je hodnota  $W$  číslu 1, tím je lepší shoda mezi teoretickým a empirickým rozložením. Dále tato hodnota nesmí klesnout pod kritickou hodnotu Shapiro - Wilkova testu. Kritické hodnoty pro tento test jsou v příloze P IV. Tedy kritická hodnota pro testovaný soubor s  $n = 30$  a  $p = 0,05$  by neměla klesnout pod hodnotu 0,927, kde  $\alpha$  je zvolená hladina významnosti. V tabulce 15 jsou výsledky potvrzující hypotézu u všech naměřených souborů. Díky tomu lze hodnoty spojit do jednoho souboru a vyhodnocovat je tak jako v ostatních případech.

Tab. 15. Hodnoty parametrů  $W$  a  $p$  z testu normality.

|    |     | Sousledné |       | Nesousledné |       |
|----|-----|-----------|-------|-------------|-------|
|    |     | W         | p     | W           | p     |
| T1 | Ra  | 0,949     | 0,165 | 0,929       | 0,056 |
|    | Rz  | 0,964     | 0,397 | 0,954       | 0,22  |
|    | Rsm | 0,93      | 0,082 | 0,955       | 0,22  |
| T2 | Ra  | 0,97      | 0,57  | 0,948       | 0,154 |
|    | Rz  | 0,933     | 0,124 | 0,928       | 0,066 |
|    | Rsm | 0,925     | 0,052 | 0,942       | 0,109 |
| T3 | Ra  | 0,957     | 0,27  | 0,949       | 0,154 |
|    | Rz  | 0,944     | 0,113 | 0,96        | 0,314 |
|    | Rsm | 0,927     | 0,059 | 0,974       | 0,119 |
| T4 | Ra  | 0,971     | 0,568 | 0,934       | 0,066 |
|    | Rz  | 0,959     | 0,29  | 0,97        | 0,632 |
|    | Rsm | 0,955     | 0,057 | 0,936       | 0,731 |
| T5 | Ra  | 0,94      | 0,089 | 0,972       | 0,254 |
|    | Rz  | 0,973     | 0,63  | 0,927       | 0,06  |
|    | Rsm | 0,958     | 0,276 | 0,951       | 0,052 |

Při vyhodnocování povrchu po bočním frézování se ukázalo, že je situace takřka opačná. Tedy nástroj T1 a T4 vykazovali lepší Ra, Rz i Rsm než nástroje T2 a T3. Tato změna se projevila zejména u nesousledného frézování. Při sousledném frézování byly hodnoty srovnatelné napříč nástroji. U nesousledného frézování dopadl velmi špatně nástroj T2 u parametru Rsm, kdy se hodnota dostala k hodnotě 1030,9  $\mu\text{m}$ . To je téměř pětinašobek než při čelním frézování. Všechny parametry jsou uvedeny v tabulce číslo 16.

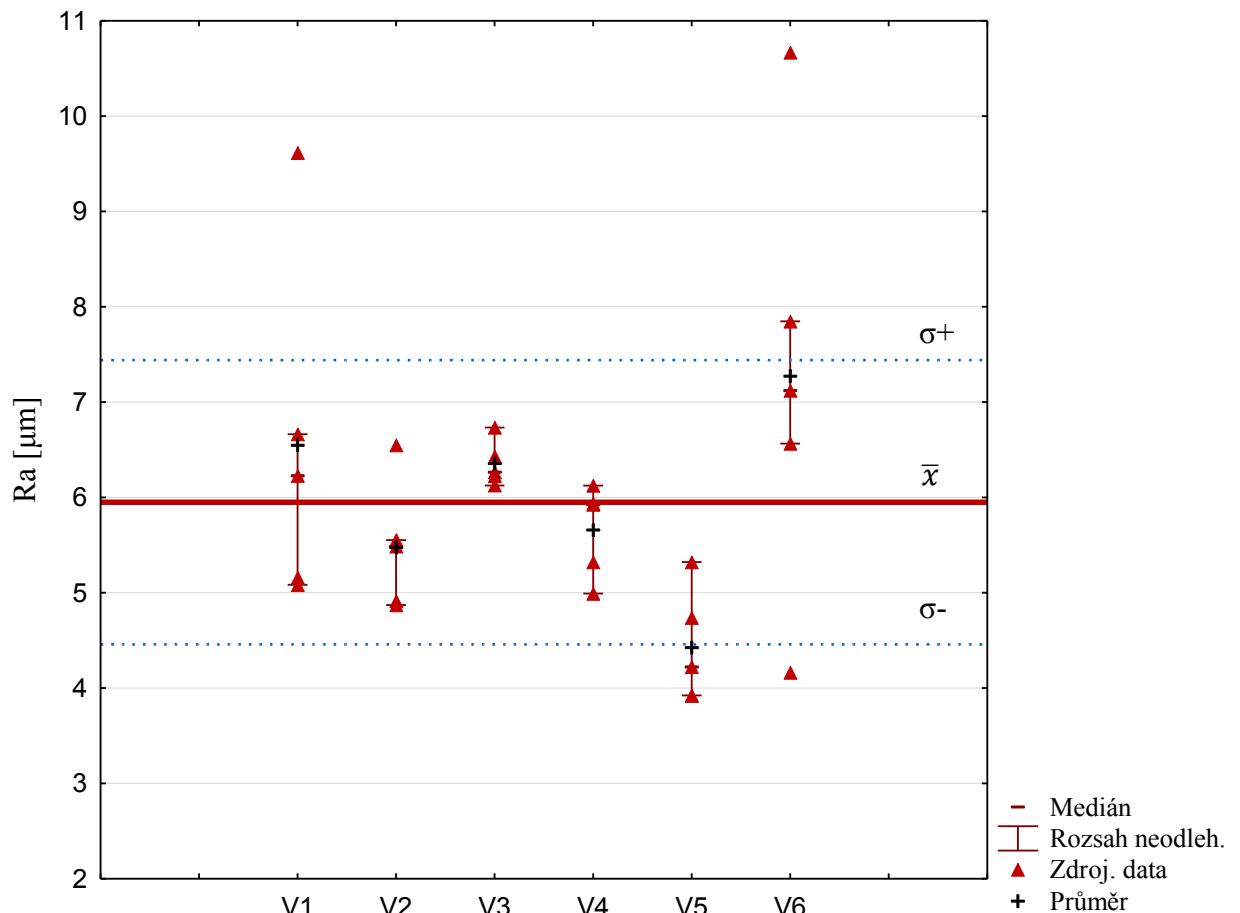
Celkově lze říci, že z hlediska srovnání všech parametrů je nejvhodnější nástroj T5, jelikož nevykazoval ani v jednom vyhodnocení výrazné odchylky. Pokud by se kladl důraz na jakost dna, nejlépe vyhověly nástroje T2 a T3 a pokud by bylo nutné zajistit co nejlepší jakost při bočním frézování, vyhověly nástroje T1 a T4.



Tab. 16. Hodnoty parametrů při bočním frézování CFRP

|                       |                       | T1                   | T2                    | T3                   | T4                   | T5                   |
|-----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Nesousledné frézování | Ra [ $\mu\text{m}$ ]  | 1,61<br>$\pm 0,29$   | 5,96<br>$\pm 1,49$    | 4,03<br>$\pm 0,84$   | 3,54<br>$\pm 0,87$   | 3,31<br>$\pm 0,76$   |
|                       | Rz [ $\mu\text{m}$ ]  | 11,13<br>$\pm 2,69$  | 30,73<br>$\pm 7,36$   | 23,37<br>$\pm 4,86$  | 21,74<br>$\pm 4,14$  | 21,08<br>$\pm 4,9$   |
|                       | Rsm [ $\mu\text{m}$ ] | 380,2<br>$\pm 209,8$ | 1030,9<br>$\pm 374,1$ | 665,8<br>$\pm 286,9$ | 556,9<br>$\pm 315,1$ | 422,6<br>$\pm 159,4$ |
| Sousledné frézování   | Ra [ $\mu\text{m}$ ]  | 1,89<br>$\pm 0,48$   | 2,28<br>$\pm 1,43$    | 2,08<br>$\pm 0,49$   | 3,37<br>$\pm 1,23$   | 2,79<br>$\pm 1,28$   |
|                       | Rz [ $\mu\text{m}$ ]  | 11,43<br>$\pm 2,64$  | 26,63<br>$\pm 8,6$    | 14,72<br>$\pm 4,11$  | 20,08<br>$\pm 6,37$  | 18,74<br>$\pm 7,48$  |
|                       | Rsm [ $\mu\text{m}$ ] | 309,7<br>$\pm 104,9$ | 779,4<br>$\pm 348,5$  | 389,4<br>$\pm 220,9$ | 522,9<br>$\pm 234,4$ | 449,9<br>$\pm 295,5$ |

U materiálu CFRP proběhl ještě jeden test, kdy se zjišťovala jakost povrchu při bočním frézování z různých vrstev, tak jak je znázorněno na obrázku 35. Z hlediska jakosti nebylo pozorováno zhoršení, nebo zlepšení v žádné vrstvě. Každý nástroj vykazoval drobné výkyvy, každopádně nelze jasně říci, že za to mohla poloha nástroje. Pro ilustraci je na obrázku číslo 40 vidět, jak každá vrstva vykazuje hodnoty bez jasněho trendu. Tedy hodnoty nemají stoupající, nebo klesající charakter. Do grafu je vloženo proložení aritmetickým průměrem se směrodatnými odchylkami z daného souboru dat. Na něm je vidět, že všechny hodnoty leží v celkové vypočítané hodnotě směrodatné odchylky. U všech nástrojů a parametrů se více či méně tyto hodnoty překrývaly. Nelze tedy jasně říci, že nástroj při obrábění tohoto typu materiálu a při testovaných řezných podmínkách mění jakost povrchu po délce své řezné části. Pokud ojediněle vznikly na některých vrstvách vyšší odchylky některého z parametrů, pravděpodobně se jednalo o nehomogenitu výztužného materiálu v konkrétním místě měření.



Obr. 40. Porovnání parametru Ra v jednotlivých vrstvách (T2).

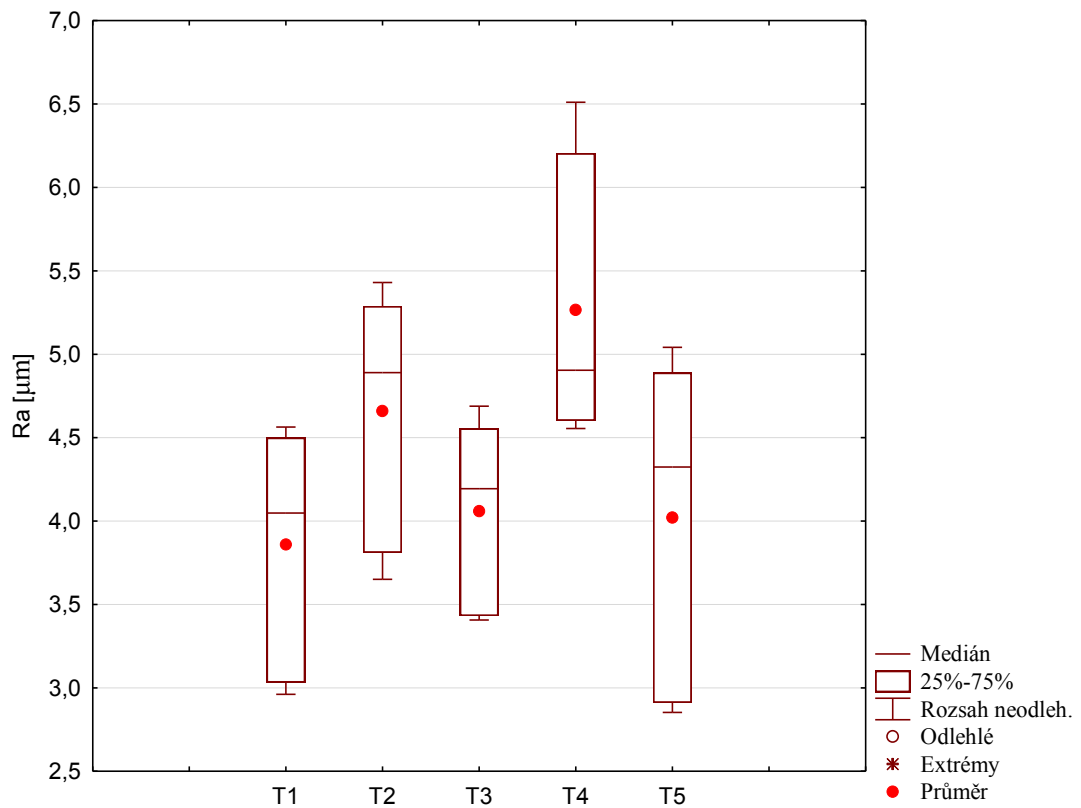
## 8.2 Vyhodnocení GFRP

Při frézování materiálu se skelným vláknem dopadly nástroje téměř stejně. Ve všech třech parametrech nebyly nikterak výrazné skoky. Například u parametru Ra byl rozdíl mezi nejnižší a nevyšší hodnotou pouze 1,4  $\mu\text{m}$ . Nízké rozdíly byly vyhodnoceny i u parametru Rz a Rsm. Avšak žádný nástroj nedosahoval takových hodnot jako u materiálu CFRP. Pro čelní obrábění je dle parametrů nejvhodnější nástroj T1, avšak lze považovat za vyhovující všechny nástroje. Souhrn vyhodnocených dat je v tabulce číslo 17. Na obrázku číslo 41 je znázorněn krabicový graf pro parametr Ra pro materiál GFRP.

Tab. 17. Hodnoty parametrů při čelním frézování GFRP

|                      |                       | T1                  | T2                  | T3                   | T4                  | T5                  |
|----------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------|
| Normální<br>drážka   | Ra [ $\mu\text{m}$ ]  | 3,86<br>$\pm 0,65$  | 4,66<br>$\pm 0,67$  | 4,06<br>$\pm 0,51$   | 5,26<br>$\pm 0,76$  | 4,02<br>$\pm 0,87$  |
|                      | Rz [ $\mu\text{m}$ ]  | 24,33<br>$\pm 2,65$ | 31,49<br>$\pm 6,31$ | 26,34<br>$\pm 4,93$  | 34,42<br>$\pm 5,04$ | 26,79<br>$\pm 5,58$ |
|                      | Rsm [ $\mu\text{m}$ ] | 193,4<br>$\pm 27,7$ | 154,5<br>$\pm 17$   | 197<br>$\pm 47,6$    | 176<br>$\pm 28,5$   | 136,3<br>$\pm 23,9$ |
| Trochoidní<br>drážka | Ra [ $\mu\text{m}$ ]  | 2,95<br>$\pm 0,26$  | 4,03<br>$\pm 1,27$  | 3,6<br>$\pm 1,69$    | 3,67<br>$\pm 0,47$  | 4,39<br>$\pm 1,24$  |
|                      | Rz [ $\mu\text{m}$ ]  | 17,79<br>$\pm 1,38$ | 26,19<br>$\pm 7,05$ | 25,36<br>$\pm 12,93$ | 24,24<br>$\pm 3,53$ | 28,47<br>$\pm 6,42$ |
|                      | Rsm [ $\mu\text{m}$ ] | 119,7<br>$\pm 30,5$ | 126,6<br>$\pm 26,8$ | 180,7<br>$\pm 64,1$  | 133,2<br>$\pm 33,4$ | 129,1<br>$\pm 20,4$ |

I u bočního frézování nedosahovaly nástroje takových parametrů jako u CFRP materiálu. Z tabulky číslo 18 je evidentní, že naprosto nevyhovující nástroj jak pro sousledné tak pro nesousledné frézování je T2, a pro sousledné frézování ještě nástroj T4. Nástroj T2 a T4 frézovali horší povrch než ostatní nástroje při sousledném frézování o cca 80%. Ostatní nástroje dosahují dobrých výsledků. U sousledného obrábění lze říci, že byl povrch po všech třech nástrojích (T1, T3 a T5) stejný, mírně se odlišují hodnoty u nesousledného frézování, kdy nejlépe vyhovuje nástroj T1.



Obr. 41. Hodnoty Ra pro GFRP (dno)

Tab. 18. Hodnoty parametrů při bočním frézování GFRP

|                       |          | T1             | T2              | T3              | T4               | T5             |
|-----------------------|----------|----------------|-----------------|-----------------|------------------|----------------|
| Nesousledné frézování | Ra [µm]  | 2,23<br>±0,37  | 5,79<br>±1,14   | 3,76<br>±0,84   | 3,43<br>±0,48    | 3,75<br>±0,65  |
|                       | Rz [µm]  | 19,02<br>±3,94 | 34,93<br>±3,76  | 24,72<br>±3,44  | 24,98<br>±3,51   | 25,82<br>±3,47 |
|                       | Rsm [µm] | 219,3<br>±94,5 | 493,5<br>±173,1 | 284,7<br>±94,7  | 265,8<br>±75     | 206,8<br>±35,6 |
| Sousledné frézování   | Ra [µm]  | 3,02<br>±0,38  | 19,74<br>±0,86  | 4,17<br>±0,56   | 20,05<br>±4,32   | 3,02<br>±0,51  |
|                       | Rz [µm]  | 22,29<br>±1,14 | 84,56<br>±7,20  | 28,16<br>±7,9   | 109,37<br>±13,15 | 19,33<br>±2,51 |
|                       | Rsm [µm] | 246,1<br>±49,1 | 864,3<br>±15,1  | 449,6<br>±129,7 | 839,6<br>±161,9  | 272,9<br>±69,2 |

### 8.3 Vyhodnocení Corecork NL10

Sendvičový kompozitní materiál byl naprosto odlišný od předchozích dvou materiálů. Nejen výsledky jednotlivých parametrů jsou naprosto odlišné, ale pohledově byl povrch nehomogenní. Schůdný povrch byl na dně drážek, kdy jednotlivé korkové kousky byly celkem solidně odříznuty bez větších defektů. Oproti tomu boky drážky byly o poznání horší. Měřitelná byla pouze strana, která byla frézována nesousledně a to jen v určitých místech. Druhá strana byla od všech nástrojů více či méně poškozena tak, že nemohlo proběhnout měření. Na obrázku číslo 42 je detail roztřepeného korkového kousku.

Při sledování parametrů na dně drážek nebyl mezi jednotlivými nástroji výrazný rozdíl. Byť jsou rozdíly v průměrných hodnotách a dal by se určit nástroj, který dokáže vyrobít nejlepší jakost, jejich směrodatné odchylky jsou tak velké, že nelze jednoznačně říci, který je nejvhodnější. Dle vizuálního hodnocení však bylo jasné, že nejlepší povrch byl vyhotoven nástrojem T4 a T5. Hodnoty jsou uvedeny v tabulce 19.

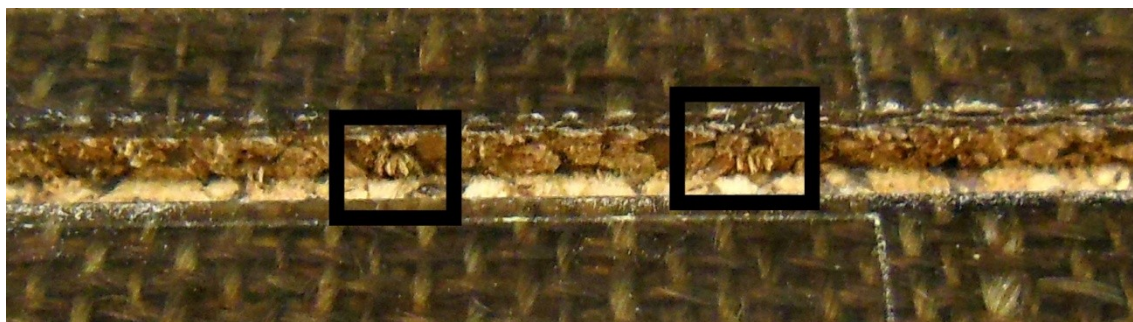
Tab. 19. Hodnoty parametrů při čelním frézování Corecork NL10

|                   |                       | T1                    | T2                    | T3                    | T4                    | T5                   |
|-------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| Normální drážka   | Ra [ $\mu\text{m}$ ]  | 24,41<br>$\pm 7,63$   | 22,14<br>$\pm 3,98$   | 24,46<br>$\pm 5,44$   | 29,57<br>$\pm 6,51$   | 21,24<br>$\pm 6,39$  |
|                   | Rz [ $\mu\text{m}$ ]  | 150,76<br>$\pm 43,88$ | 148,79<br>$\pm 38,41$ | 174,03<br>$\pm 65,86$ | 173,97<br>$\pm 41,18$ | 117,27<br>$\pm 34,9$ |
|                   | Rsm [ $\mu\text{m}$ ] | 876,3<br>$\pm 266,1$  | 838,4<br>$\pm 477,1$  | 867<br>$\pm 144,4$    | 806,8<br>$\pm 300,9$  | 901,4<br>$\pm 317$   |
| Trochoidní drážka | Ra [ $\mu\text{m}$ ]  | 22,04<br>$\pm 6,18$   | 20,07<br>$\pm 8,51$   | 17,58<br>$\pm 3,19$   | 21,24<br>$\pm 15,01$  | 13,21<br>$\pm 3,86$  |
|                   | Rz [ $\mu\text{m}$ ]  | 129,8<br>$\pm 40,62$  | 116,14<br>$\pm 45,37$ | 108,37<br>$\pm 22,12$ | 117,27<br>$\pm 59,34$ | 85,56<br>$\pm 31,6$  |
|                   | Rsm [ $\mu\text{m}$ ] | 1032,9<br>$\pm 559,4$ | 828,4<br>$\pm 360,2$  | 855,2<br>$\pm 304,6$  | 660,8<br>$\pm 377,2$  | 747<br>$\pm 258,8$   |

U bočního frézování jsou parametry velmi podobné jako u předchozího vyhodnocení. Žádný nástroj nepředstavuje kvalitního kandidáta, který by mohl být určen jako nejlepší, nebo nejvhodnější. Lze pouze tvrdit, že nástroj T4 má ze všech nástrojů mírně zvýšené parametry. Opět směrodatné odchylky jsou celkem vysoké, a tudíž nejsou hodnoty dostatečně reprezentovatelné. V tabulce 20 jsou naměřené parametry.

Tab. 20. Hodnoty parametrů při bočním frézování Corecork NL10

|                       |                       | T1                    | T2                    | T3                   | T4                    | T5                    |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Nesousledné frézování | Ra [ $\mu\text{m}$ ]  | 24,51<br>$\pm 6,35$   | 28,48<br>$\pm 12,15$  | 26,08<br>$\pm 10,55$ | 38,22<br>$\pm 8,13$   | 26,16<br>$\pm 2,91$   |
|                       | Rz [ $\mu\text{m}$ ]  | 187,05<br>$\pm 44,91$ | 161,23<br>$\pm 47,47$ | 130,9<br>$\pm 68,69$ | 193,84<br>$\pm 35,5$  | 162,84<br>$\pm 25,84$ |
|                       | Rsm [ $\mu\text{m}$ ] | 763,1<br>$\pm 136,5$  | 886,4<br>$\pm 427,1$  | 699,4<br>$\pm 193,9$ | 1107,9<br>$\pm 381,8$ | 793,9<br>$\pm 103$    |



Obr. 42. Roztřepení korkového jádra.

#### 8.4 Vyhodnocení opotřebení nástrojů

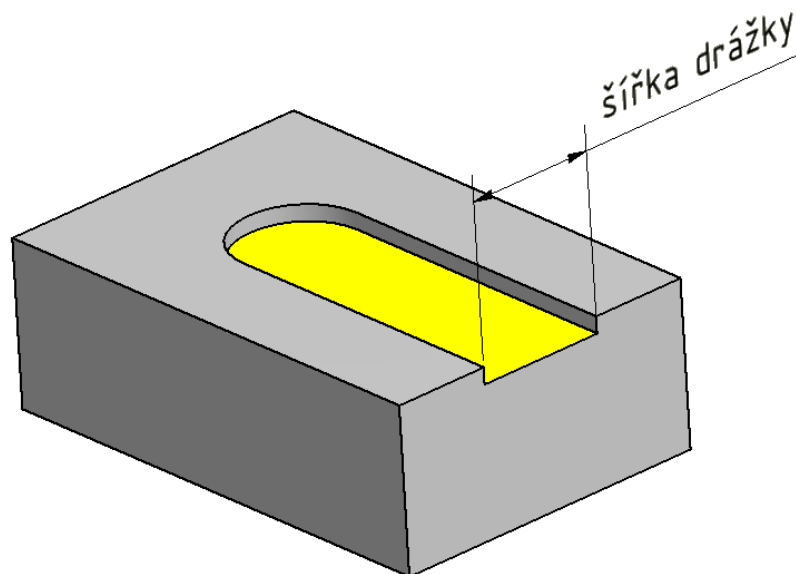
Jeden z podstatných sledovaných faktorů, bylo opotřebení řezné části nástroje. Opotřebení bylo průběžně kontrolováno po každé sadě testů. Při bočním frézování nevzniklo u žádného nástroje sledovatelné opotřebení, to mohlo být způsobeno vhodností použitého povlaku na všech třech nástrojích, nebo příliš nízkým řezným časem. Při čelním frézování vzniklo mírné opotřebení na nástroji T1 a T4. U nástroje T1 byla předpokládána nižší trvanlivost, díky staršímu typu povlaku MEGA – 64, avšak nástroj T4 disponuje novým povlakem DURA a opotřebení též vzniklo. Druhým podstatnějším důvodem vzniku opotřebení je fakt, že oba nástroje jsou v dvoubřité. Nástroj T4 je čtyřbřitý, nicméně dva břity jsou podbroušené a při hloubce řezu 1 mm se účastní řezu pouze dva břity. V příloze P VI jsou vyfoceny břity všech nástrojů

## 8.5 Vyhodnocení šířky drážek

V tabulce číslo 21 jsou výsledky naměřené šířky jednotlivých drážek, jak pro normální drážku, tak pro trochoidní frézování. Pro všechny tři typy materiálů vychází nejlépe nástroj T1, T3 a T4, nástroj T2 a T5 frézovaly drážku o cca 0,15 mm širší. U trochoidního frézování si vedli dobře všechny nástroje, pouze u materiálu Corecork byla drážka cca o 0,1 mm užší. Další pozorovatelná změna nastala při trochoidním frézování materiálu GFRP, kdy se situace obrátila, tedy nástroje T2 a T5 frézovaly nejpřesnější drážku. U zbytku nástrojů byly drážky o 0,1 až 0,2 mm užší.

Tab. 21. Hodnoty šířky drážek

|          |            | T1              | T2              | T3              | T4              | T5              |
|----------|------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| CFRP     | Normální   | $5,98 \pm 0,01$ | $6,27 \pm 0,03$ | $6,03 \pm 0,02$ | $5,92 \pm 0,02$ | $6,17 \pm 0,01$ |
|          | Trochoidní | $7,91 \pm 0,02$ | $8,03 \pm 0,03$ | $7,96 \pm 0,02$ | $7,68 \pm 0,06$ | $7,9 \pm 0,03$  |
| GFRP     | Normální   | $5,92 \pm 0,02$ | $6,22 \pm 0,01$ | $6 \pm 0,03$    | $5,87 \pm 0,03$ | $6,17 \pm 0,02$ |
|          | Trochoidní | $7,85 \pm 0,04$ | $7,98 \pm 0,03$ | $7,86 \pm 0,04$ | $7,72 \pm 0,04$ | $7,92 \pm 0,02$ |
| CORECORK | Normální   | $6 \pm 0,02$    | $6,19 \pm 0,03$ | $6,03 \pm 0,05$ | $6,09 \pm 0,07$ | $5,97 \pm 0,03$ |
|          | Trochoidní | $7,9 \pm 0,02$  | $7,94 \pm 0,02$ | $7,88 \pm 0,05$ | $7,88 \pm 0,03$ | $7,86 \pm 0,02$ |



Obr. 43. Měření šířky drážky.

## 8.6 Vyhodnocení delaminačního faktoru

Hodnocení delaminačního faktoru probíhalo pouze u kompozitního materiálu s uhlíkovým vláknem a se skleněným vláknem. Corecork NL10 nevykazoval žádné hodnoty delaminace. Pravděpodobně to bylo způsobeno silnou vrstvou pryskyřice, a tudíž neměl nástroj možnost vytahovat vlákna juty.

Delaminační faktor je definován jako podíl maximálního poškození vůči šířce řezu. Hodnotu delaminačního faktoru lze vypočítat podle vztahu 3. V tabulce číslo 22 jsou veškeré hodnoty potřebné pro určení delaminačního faktoru. Princip vyhodnocování delaminace je na obrázku 43. Při trochoidním frézování se delaminační faktor u všech nástrojů snížil, pouze nástroj T1 vykazoval zhoršení.

$$F_d = \frac{W_{max}}{W} \quad (3)$$

kde:  $W_{max}$  [mm] - šířka maximálního poškození

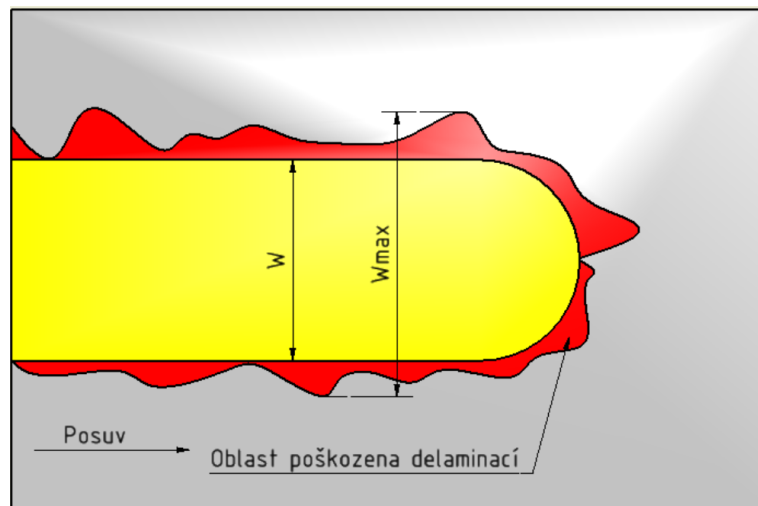
$W$  [mm] - šířka řezu

$F_d$  [-] - delaminační faktor

Tab. 22. Výsledky delaminačního faktoru

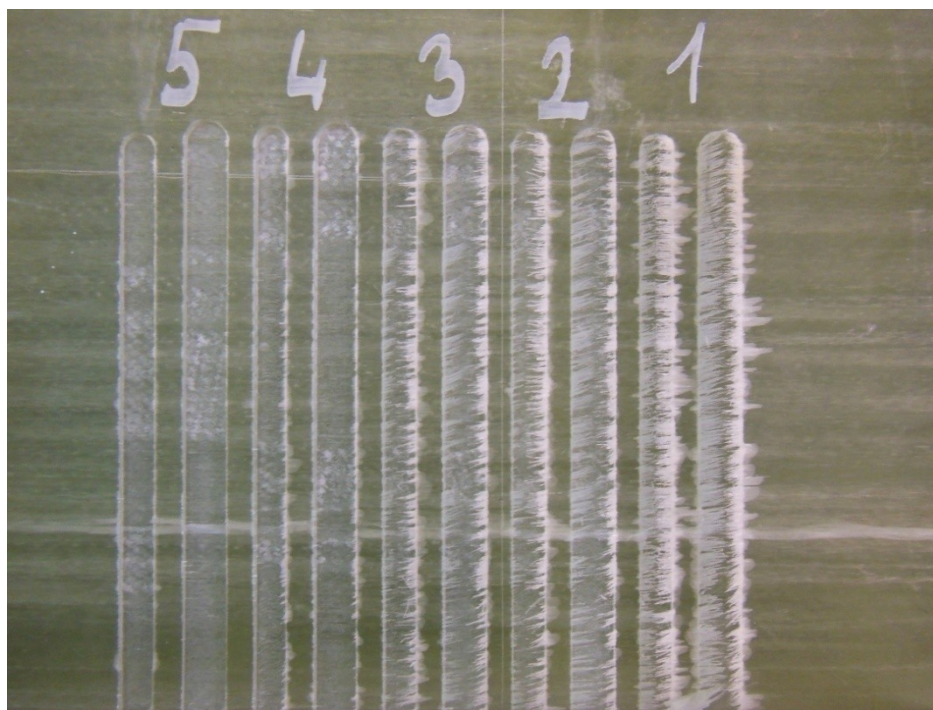
|      |                                      | T1        | T2       | T3       | T4       | T5      |
|------|--------------------------------------|-----------|----------|----------|----------|---------|
| CFRP | W [mm]<br>Normální / Trochoidní      | 6 / 8     | 6 / 8    | 6 / 8    | 6 / 8    | 6 / 8   |
|      | Wmax [mm]<br>Normální / trochoidní   | 7,7 / 7,5 | 6,7/6    | 6,4/6    | 6,5/6    | 6,1/6   |
|      | $F_D$ [-]<br>Normální / trochoidní   | 1,28/1,25 | 1,12/1   | 1,07/1   | 1,08/1   | 1,01/1  |
| GFRP | W [mm]<br>Normální / Trochoidní      | 6 / 8     | 6 / 8    | 6 / 8    | 6 / 8    | 6 / 8   |
|      | Wmax [mm]<br>Normální / trochoidní   | 11/12,5   | 10,5/7,9 | 9,4/8,5  | 9,1/8    | 7,2/6,5 |
|      | $F_D W$ [-]<br>Normální / trochoidní | 1,83/2,8  | 1,8/1,32 | 1,57/1,4 | 1,5/1,34 | 1,2/1,1 |





Obr. 44. Princip vyhodnocení delaminace.

Nejen z vypočtených hodnot, ale i z pohledového hodnocení je jasné, že nejlépe vychází nástroj T5. Tento nástroj vyšel nejlépe jak pro CFRP tak pro GFRP materiál. Pro CFRP materiál je vhodné použít i nástroj T3 a T4, kde delaminační faktor dosahuje hodnot 1,07 a 1,08. Nástroj T2 a T1 jsou použitelné podmíněně. Pro materiál GFRP je vhodný pouze nástroj T5, ostatní vykazují výrazné delaminační poškození. Na obrázku číslo 44 je ukázka delaminace u materiálu GFRP. V příloze P V jsou detaily jednotlivých drážek.



Obr. 45. Delaminace GFRP

## 9 CELKOVÉ VYHODNOCENÍ

Aby bylo možné určit nástroj, který je vhodnější na ten, či onen materiál, bylo zapotřebí ohodnotit jednotlivé výsledky a srovnat je mezi sebou. Tak, aby byl výsledek co nejlépe demonstrovatelný, byl zaveden bodový systém tzv. výkonové kritérium. Každý z testů měl určitou prioritu, která se odrazila na množství bodového ohodnocení. Největší váha byla přidělena parametrům Ra, Rz a Rsm, nižší váhu měly výsledky delaminace a šířky drážek, a nejnižší váhu měl skutečný průměr nástroje. Celkově se tedy body skládaly ze šesti parametrů. Vyhodnocení vždy probíhalo pro daný materiál, takže výsledkem jsou 3 nástroje, kdy jeden je pro materiál CFRP, druhý pro GFRP a třetí pro Corecork NL10. Bodové hodnocení bylo vždy vypočítáno s ohledem na danou situaci, kdy nejlepší hodnotě bylo přiděleno 100 bodů a nejhorší 0. Se snižujícím se kritériem se snižoval i maximální počet dosažitelných bodů.

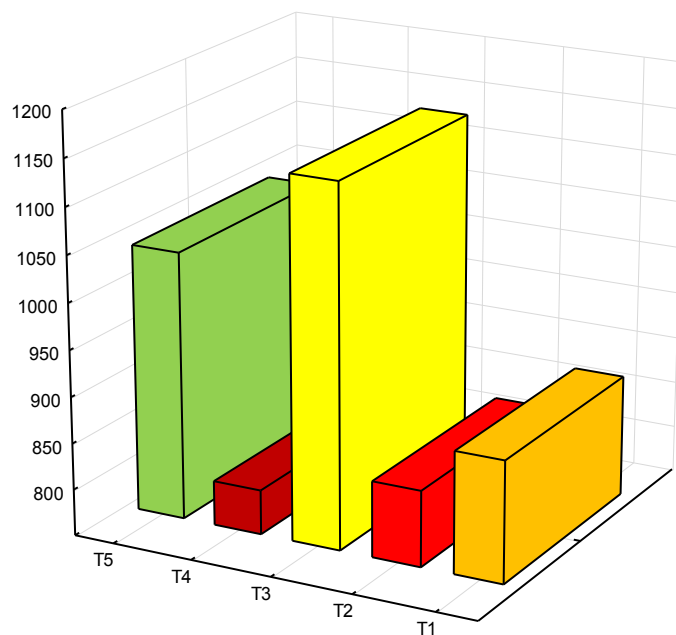
U materiálu CFRP je dle bodového hodnocení na nejlepší pozici nástroj T3 s těsným náskokem před nástrojem T5. Nástroj T3 je vybaven dělenou řeznou částí, kdy část nástroje je s pravotočivou řeznou částí a část s levotočivou řeznou částí. Podle výrobce je spíše určen na sendvičový materiál. Nástroj T5 je s nedefinovanou geometrií pro všeobecné použití na kompozitní materiály. Nástroj T2 a T4 vycházejí z bodového ohodnocení nejhůře.

Materiál GFRP nemá jasného zástupce, jako vhodný se ukazuje nástroj T1, T3 a T5. Tak jako u CFRP materiálu jsou nevhodné nástroje T2 a T4, které výrazně zaostávají. U tohoto kompozitního materiálu se vyrovnal nástroj T3 a T5 nástroj T1, který má od těchto dvou nástrojů jednodílnou pravotočivou šroubovici. Jediným výrazným rozdílem mezi nástroji, které se nehodí na tento materiál a nástroji, které dopadly dobře, je úhel stoupání šroubovice. Nástroje T1, T3 a T4 mají minimálně  $20^{\circ}$ , kdežto nástroj T4 má  $15^{\circ}$  a nástroj T2 pouze  $10^{\circ}$ . Samozřejmě nejvýraznější vliv na jakost bude mít geometrie nástroje, ale lze uvažovat i s úhlem stoupání šroubovice.

Kupodivu u materiálu Corecork NL 10 dopadl nejlépe nástroj T2, který jinak u obou předchozích materiálů nevyhovoval. S celkem velkým odstupem za nástrojem T2 se umístily nástroje T1, T3 a T5. Nejhůře dopadl nástroj T4, který neuspěl u žádného z testovaných materiálů.

Tab. 23. Bobové hodnocení CFRP

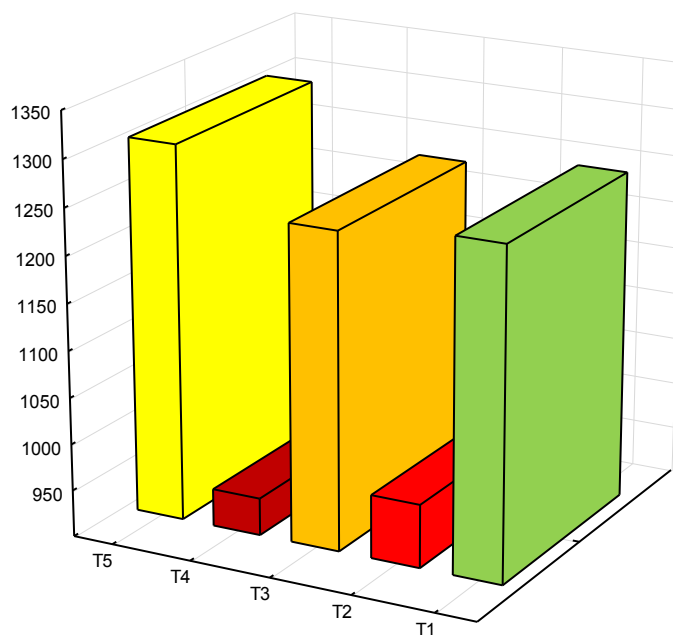
|                              |     | T1         | T2         | T3          | T4         | T5          |
|------------------------------|-----|------------|------------|-------------|------------|-------------|
| Normální drážka              | Ra  | 22         | 68         | 67          | 14         | 58          |
|                              | Rz  | 16         | 57         | 46          | 0          | 51          |
|                              | Rsm | 45         | 88         | 85          | 70         | 82          |
| Trochoidní drážka            | Ra  | 70         | 94         | 100         | 76         | 86          |
|                              | Rz  | 41         | 79         | 100         | 59         | 87          |
|                              | Rsm | 54         | 83         | 100         | 80         | 99          |
| Nesousledné frézování        | Ra  | 86         | 0          | 39          | 48         | 53          |
|                              | Rz  | 86         | 20         | 45          | 50         | 52          |
|                              | Rsm | 74         | 0          | 42          | 54         | 69          |
| Sousledné frézování          | Ra  | 81         | 74         | 78          | 52         | 63          |
|                              | Rz  | 85         | 34         | 80          | 56         | 60          |
|                              | Rsm | 81         | 29         | 72          | 58         | 66          |
| Šířka normální drážka        |     | 70         | 70         | 0           | 66         | 53          |
| Šířka trochoidní drážka      |     | 30         | 30         | 60          | 55         | 0           |
| Delaminace normální drážky   |     | 0          | 0          | 44          | 57         | 53          |
| Delaminace trochoidní drážky |     | 4          | 4          | 75          | 75         | 75          |
| Průměr nástroje              |     | 36         | 36         | 27          | 32         | 0           |
| <b>Celkový počet bodů</b>    |     | <b>881</b> | <b>832</b> | <b>1139</b> | <b>798</b> | <b>1038</b> |



Obr. 46. Grafické znázornění bodového hodnocení CFRP.

Tab. 24. Bodové hodnocení GFRP

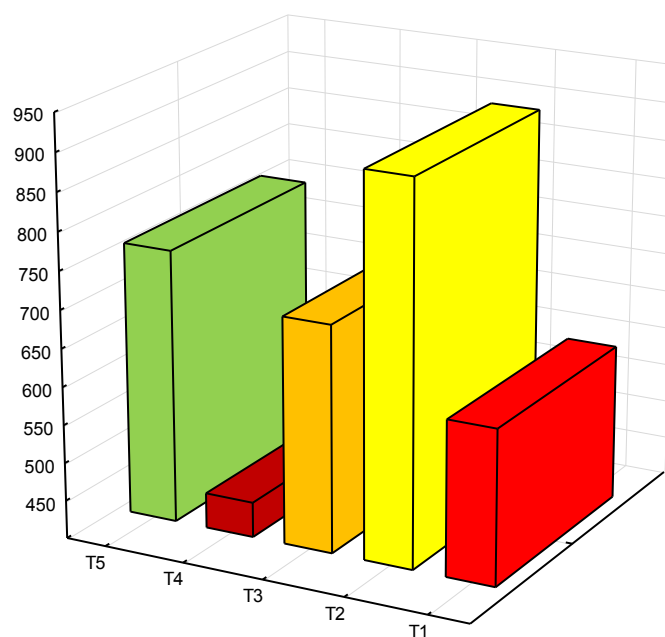
|                              |     | T1   | T2  | T3   | T4  | T5   |
|------------------------------|-----|------|-----|------|-----|------|
| Normální drážka              | Ra  | 90   | 86  | 89   | 83  | 90   |
|                              | Rz  | 93   | 85  | 91   | 82  | 90   |
|                              | Rsm | 100  | 95  | 89   | 92  | 98   |
| Trochoidní drážka            | Ra  | 96   | 90  | 92   | 93  | 87   |
|                              | Rz  | 100  | 91  | 92   | 93  | 88   |
|                              | Rsm | 100  | 99  | 92   | 98  | 99   |
| Nesousledné frézování        | Ra  | 100  | 80  | 91   | 93  | 91   |
|                              | Rz  | 98   | 81  | 92   | 92  | 91   |
|                              | Rsm | 87   | 50  | 78   | 80  | 88   |
| Sousledné frézování          | Ra  | 96   | 2   | 90   | 0   | 96   |
|                              | Rz  | 94   | 27  | 88   | 0   | 98   |
|                              | Rsm | 83   | 0   | 56   | 3   | 79   |
| Šířka normální drážka        |     | 70   | 53  | 14   | 75  | 40   |
| Šířka trochoidní drážka      |     | 30   | 10  | 65   | 10  | 0    |
| Delaminace normální drážky   |     | 0    | 17  | 23   | 36  | 39   |
| Delaminace trochoidní drážky |     | 4    | 0   | 53   | 46  | 52   |
| Průměr nástroje              |     | 36   | 36  | 27   | 32  | 0    |
| Celkový počet bodů           |     | 1253 | 968 | 1239 | 940 | 1302 |



Obr. 47. Grafické znázornění bodového hodnocení GFRP.

Tab. 25. Bodové hodnocení Corecork NL10

|                           |     | T1         | T2         | T3         | T4         | T5         |
|---------------------------|-----|------------|------------|------------|------------|------------|
| Normální drážka           | Ra  | 63         | 64         | 55         | 35         | 68         |
|                           | Rz  | 40         | 42         | 18         | 18         | 71         |
|                           | Rsm | 65         | 76         | 67         | 84         | 58         |
| Trochoidní drážka         | Ra  | 65         | 73         | 83         | 68         | 100        |
|                           | Rz  | 59         | 72         | 79         | 71         | 100        |
|                           | Rsm | 21         | 78         | 71         | 100        | 95         |
| Nesousledné frézování     | Ra  | 55         | 39         | 49         | 0          | 48         |
|                           | Rz  | 6          | 300        | 59         | 0          | 30         |
|                           | Rsm | 94         | 62         | 99         | 0          | 92         |
| Šířka normální drážka     |     | 70         | 75         | 22         | 66         | 50         |
| Šířka trochoidní drážka   |     | 30         | 25         | 45         | 20         | 20         |
| Průměr nástroje           |     | 36         | 36         | 27         | 32         | 0          |
| <b>Celkový počet bodů</b> |     | <b>604</b> | <b>900</b> | <b>698</b> | <b>446</b> | <b>758</b> |



Obr. 48. Grafické znázornění bodového hodnocení Corecork NL10.

## ZÁVĚR

Při testování CFRP materiálu se ukázalo, že jakost povrchu byla výrazně lepší při frézování drážky pomocí trochoidního cyklu, toto zlepšení činilo zhruba 30% u všech nástrojů. Nicméně čas frézování se zvýšil cca 4x. Při čelním frézování nejlépe dopadl nástroj T2 (JC 880) a T3 (JC 840). Dokonce u trochoidního cyklu dosáhl nástroj T3 u parametru Ra hodnoty  $0,96 \pm 0,21 \mu\text{m}$ , což je nejlepší hodnota ze všech testovaných strategií u všech materiálů. Při bočním frézování nastala naprosto opačná situace, neboť nejlépe dopadl nástroj T1 (JS 522), který u čelního frézování dosáhl velmi špatných výsledků. Zlepšení pravděpodobně zapříčinil úhel stoupání šroubovice a fakt, že nástroj disponoval pouze dvěma břity oproti ostatním nástrojům. Při posuzování sousledného a nesousledného frézování se u nástrojů T1 a T4 takřka nic nezměnilo, změna nastala u zbylých nástrojů, kdy se jakost výrazně zlepšila u sousledného frézování.

Výsledky jakosti povrchu u GFRP materiálů nevykazovaly tak výrazné odlišnosti jak u CFRP materiálu při frézování drážek. Rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší hodnotou Ra byl  $1,4 \mu\text{m}$ . Hodnoty ostatních parametrů se pohybovaly ve stejné těsnosti jako parametr Ra. Ani trochoidní cyklus nevykazoval tak výrazné zlepšení jak u CFRP materiálu, nicméně zlepšení nastalo. Nejlépe dopadl nástroj T1 a to jak u čelního frézování, tak u bočního frézování. Při bočním frézování nastal výrazný výkyv u nástroje T2 a T4, kdy se parametr Ra zvýšil z průměrné hodnoty  $3,5 \mu\text{m}$  na  $20 \mu\text{m}$ . I ostatní parametry se samozřejmě výrazně zhoršily. Pravděpodobně za tuto změnu mohl úhel stoupání šroubovice, nebo výrazná nehomogenita výztužného materiálu.

Hodnoty jakosti u sendvičového materiálu s korkovým jádrem stouply oproti CFRP a GFRP cca o 80%. Nemluvě o tom, že povrch z vizuálního hlediska představoval nesourodou strukturu, která tvořila vyškubané části korkového jádra, nebo velké plochy zateklé pryskyřice která při obrobení tvořila velmi hladké plochy. Avšak při vyhodnocení dopadl nejhůře nástroj T4, ostatní nástroje měly takřka stejné hodnoty. Další změna nastala u bočního frézování, kdy povrch při nesousledném frézování nebyl měřitelný.

Při přeměřování šířky drážek se ukázalo, že nejpřesněji byl schopen normální drážku vyfrézovat nástroj T1, T3 a T4. Nástroje T2 a T5 frézovali drážku širší o 0,1 až 0,2 mm. U nástroje T5 lze přikládat váhu nejasně definované geometrii a u nástroje T2 pravděpodobně nízkému úhlu stoupání šroubovice. Při vyhodnocování drážek vyfrézovaných tro-

choidním cyklem byly hodnoty převážně o 0,1 mm nižší než jmenovitý rozměr drážky, pouze u nástroje T4 klesla hodnota u CFRP materiálu o 0,32 mm.

Poslední z vyhodnocovaných parametrů byl delaminační faktor. Tato hodnota byla zjišťována pouze u CFRP a GFRP materiálu, neboť u materiálu Corecork NL10 delaminace nevznikla. To, že nevznikla žádná delaminace u posledního materiálu, bych přikládal tomu, že výztužný materiál (juta) byl v dostatečné hloubce pod vrstvou pryskyřice. U materiálu CFRP vznikla delaminace, nicméně byla pouze ojedinělá. Nejhůře dopadl nástroj T1, kdy delaminační faktor dosáhl hodnoty 1,28. Ostatní nástroje dopadly velmi dobře, a nejlépe dopadl nástroj T5. U GFRP materiálu byla situace velmi odlišná, neboť nastala delaminace u všech nástrojů. Nejlépe dopadl nástroj T5, kdy delaminační faktor dosáhl hodnoty 1,2. Další nástroje se pohybovaly mezi hodnotami od 1,5 do 1,88, což je 3 až 5 mm odchlípnutého vlákna. Při trochoidním cyklu dopadly nástroje mnohem lépe, dokonce u CFRP materiálu nevznikla žádná delaminace, pouze u nástroje T1. U GFRP materiálu sice vznikla delaminace, ale byla menší cca o 10 % – 20 %. Pouze nástroj T1 vykázal zhoršení faktoru z 1,83 na 2,8. Z hlediska delaminace je pro materiál GFRP i CFRP nástroj T1 nevhodný, nástroj T2 a T3 podmíněně vhodný, a nejvhodnější jsou nástroje T2 a T1.

Pro sumarizaci všech testů, naměřených hodnot a poznatků, bylo u každého materiálu nastaveno konkrétní bodové hodnocení, ze kterého se komplexně vyhodnotilo, který z nástrojů je nejvhodnější. Samozřejmě „nejvhodnější“ je myšleno z hlediska této práce a podmínek v ní nastavených. Pro materiál s uhlíkovým vláknem se nejlépe hodí nástroj T3, popřípadě T5. Jak již bylo psáno, nástroj T3 byl primárně výrobcem určen na frézování sendvičových materiálů a nástroj T5 pro všeobecné použití. Nejhůře dopadly nástroje T2 a T4. Podobné výsledky se ukázaly i u materiálu se skleněným vláknem. Nejlépe dopadly nástroje T1, T3 a T5 a nejhůře nástroj T2 a T4. Jako nejvhodnější nástroj pro poslední testovaný materiál Corecork NL 10 se ukázal nástroj T2, který u předchozích dvou nikterak nevyňikal. Dále lze říci, že nástroje T1, T3 a T5 sice zaostávají v bodovém hodnocení za nástrojem T2, ale podmíněně je lze použít. Nejhůře dopadl opět nástroj T4 a dle bodového hodnocení není vhodný pro tyto tři kompozitní materiály ve srovnání s ostatními nástroji.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [8] AGARWAL, Bhagwan D a Lawrence J BROUTMAN. *Vláknové kompozity: celostátní vysokoškolská příručka pro vysoké školy technické*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987.
- [2] *Kompozity* [online]. [cit. 25-1-2016]. Dostupné z: <http://www.volny.cz/zkorinek/>.
- [3] BAREŠ, Richard. *Kompozitní materiály*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988.
- [4] LE BELL-RÖNNLÖF, A., 2007. *Fibre-Reinforced Composites as Root Canal Posts*. Turku, Finland. Dizertační práce. University of Turku, Institute of Dentistry. ISBN 978-951-29-3428-7.
- [5] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [6] Havel - komposites. *Všeobecný a základní popis materiálů využívaných při výrobě kompozitů* [online]. [cit. 2016-1-25]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/74-Vseobecny-a-zakladni-popis-materialu-pouzivanych-pri-vyrobe-kompozitu.html>
- [7] JANOVEC, Jiří, Jiří CEJP a Josef STEIDL. *Perspektivní materiály*. Vyd. 3., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04167-3.
- [8] KROČOVÁ, B. *Částicové kompozity vyztužené krátkými vlákny*. Brno, 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 65 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Poláček, Ph.D
- [9] Stariz Corp. *Polyester Short-Cut Fiber* [online]. [cit. 2016-2-3]. Dostupné z: <http://www.stariz.co.kr/shortcut.htm>.
- [10] HUMÁR, Anton. *Obrábění vláknově vyztužených kompozitů: Machining fibre reinforced composites : teze přednášky k profesorskému jmenovacímu řízení v oboru strojírenská technologie*. Brno: VUT IUM, 2004. ISBN 80-214-2740-X.
- [11] Problémy při obrábění kompozitních materiálů. SEDLÁČEK, J., VUT V BRNĚ, Fakulta strojního inženýrství. *MM - Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2016-2-17]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/problemy-pri-obrabeni-kompozitnich-materialu.html>



- [12] Nástroje pro obrábění kompozitních materiálů, SEDLÁČEK, J., VUT V BRNĚ, Fakulta strojního inženýrství. *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2016-2-17]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nastroje-pro-obrabeni-kompozitnich-materialu.html>
- [13] MAŠEK, O., *Přesné obrábění vnějších válcových ploch z kompozitních materiálů*. Plzeň, 2013. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní. Vedoucí bakalářské práce Miroslav Zetek.
- [14] Teti, R. Machining of composite materials. *CIRP annals: Manufacturing technology* [online]. 2002, roč. 51, č. 2, str. 611 – 634. [cit. 2016-2-10]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000785060761703X>
- [15] SCHORNÍK, V., *Frézování rovinných ploch a drážek při obrábění kompozitních materiálů*. Plzeň, 2013. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní. Vedoucí práce Miroslav Zetek.
- [16] Změny v obrábění kompozitních materiálů, BENEŠOVÁ, D., Sandvik Coromant. *MM – Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2016-2-7]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/zmeny-v-obrabeni-kompozitnich-materialu.html>.
- [17] TRČKA, R. Obrábění součásti z kompozitního materiálu. Brno, 2014. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí bakalářské práce Milan Kalivoda.
- [18] *Edgecam* [online]. Edgecam ©2016 [cit. 2016-2-3]. Dostupné z: <http://www.edgecamcz.cz/>.
- [19] *Západočeská univerzita v Plzni* [online]. ZCU, ©2016 [cit. 2016-2-3]. Dostupné z: [http://www.ateam.zcu.cz/download/kompozity09\\_10.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/download/kompozity09_10.pdf)
- [20] TAKESHI, Y., aj. *Temperatur measurement of cutting tool and mechaned surface layer in milling of CFRP*. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2013, č. 70, str. 63 – 69. [cit. 2016-2-12]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695513000503>
- [21] KOČMAN, Karel. *Technologie obrábění*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN 80-214-3068-0.
- [22] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
- [23] *Příručka obrábění: kniha pro praktiky*. 1. čes. vyd. Praha: Scientia, 1997. ISBN 91-972299-4-6.

- [24] ČSN EN ISO 4287, 1997. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – struktura povrchu: profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření.
- [25] ČSN EN ISO 4288, 1997. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – struktura povrchu: profilová metoda – Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření.
- [26] JAROŠOVÁ, J., *Matematicko-statistický model optimalizace procesu měření a vyhodnocování drsnosti obrobené plochy*. Brno, 2002. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [27] TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2006. ISBN 80-248-1209-6.
- [28] Micro-top. *Talysurf CLI systems* [online]. ©2016 [cit. 2016-4-8]. Dostupné z: <http://www.microtop.ro/en/product/talysurf-cli-systems.html>
- [29] *Mat net* [online]. MatNet Slovakia, ©2006 [cit. 2016-4-8]. Dostupné z: <http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=9>
- [30] MATRIX Composite Materials Company. *CORECORK technical data* [online]. ©2009 [cit. 1016-4-10]. Dostupné z: <http://www.matrix-composites.co.uk/product-data-sheet/cork/mds-gama-corecork.pdf>
- [31] SECOTOOLS. *JS800 composite range* [online]. 2015 [cit. 2016-4-12]. Dostupné z: <https://www.secotools.com/cs/Global/Products/Milling/Solid-carbide-end-mills/JC800-composite-range/>
- [32] Shapiro, S. An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples) *Biometrika*. 1965.
- [33] Příručka pro technology: Dynamické frézování – využití kompenzačních přístupů, BENEŠOVÁ, D a kol. *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2016-4-12]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/prirucka-pro-technology.html>
- [34] SOLAŘÍK, J., *Obrobitelnost kompozitních materiálů*. Zlín, 2015. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická. Vedoucí diplomové práce Ondřej Bílek.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

|                    |  |
|--------------------|--|
| $^{\circ}\text{C}$ | Stupeň celsiův                         |
| APA                |  |
| BMC                | Bulk Moulding Compound                 |
| CLA                | Chromatic Length Aberration            |
| CLI                | Chromatic Length                       |
| CVD                | Chemical Vapor Deposition              |
| ČSN                | Česká Státní Norma                     |
| E                  | Modu pružnosti v tahu                  |
| EN                 | Evropská Norma                         |
| EP                 | Epoxidy                                |
| FRP                | Fiber Reinforced Plastic               |
| HSC                | High speed cutting                     |
| ISO                | Mezinárodní Organizace pro Normalizaci |
| PA                 | Polyamid                               |
| PAN                | Polyakrylonitrilových                  |
| PCD                | Polykrystalický Diamant                |
| PE                 | Polyethylen                            |
| PES                | Polyester                              |
| PP                 | Polypropylen                           |
| PU                 | Polyester                              |
| PVD                | Physical Vapor Deposition              |
| Ra                 | Střední aritmetická úchylka profilu    |
| RIP                | Resin Injection Pultrusion             |
| Rmr <sup>©</sup>   | Materiálový podíl profilu              |
| Rq                 | Průměrná kvadratická úchylka profilu   |

---

|            |   |
|------------|---|
| RSm        | Průměrná vzdálenost prvku profilu               |
| RTM        | Resin Transfer Moulding                         |
| Rz         | Výška nerovnosti profilu                        |
| RΔq        | Průměrný kvadratický sklon posuzovaného profilu |
| SMC        | Sheet Moulding Compound                         |
| UV         | Ultraviolet                                     |
| VBD        | Výměnná Břitová Destička                        |
| VE         | Vinilester                                      |
| $\rho$     | Hustota   |
| $\sigma_p$ | Mez pevnosti v tahu                             |
| CFRP       | Carbon fiber reinforced polymer                 |
| GFRP       | Glass fiber reinforced polymer                  |

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

|   |    |
|---|----|
| Obr. 1. - Synergický efekt  | 13 |
| Obr. 2. - Klasifikace kompozitních materiálů                                | 14 |
| Obr. 3. - Schéma kompozitu vyztuženého částicemi                            | 15 |
| Obr. 4. - Rozdělení technologií dle typu výztuže                            | 25 |
| Obr. 5. – Základní oblasti tvorby třísky                                    | 29 |
| Obr. 6. - Křehký lom skleněného vlákna v PE matrici                         | 30 |
| Obr. 7. - Způsob oddělování materiálu Typ I a II                            | 30 |
| Obr. 8. – Způsob oddělování materiálu Typ III                               | 31 |
| Obr. 9. - Způsob oddělování materiálu Typ IV a V                            | 31 |
| Obr. 10. - Graf závislosti opotřebení na řezných podmínkách                 | 36 |
| Obr. 11. – Typy opotřebení A, B, C, D a E                                   | 37 |
| Obr. 12. – Typy opotřebení F a G  | 38 |
| Obr. 13. – Typy opotřebení H a I  | 38 |
| Obr. 14. – Střední aritmetická úchylka profilu – Ra                         | 41 |
| Obr. 15. – Výška nerovnosti profilu - Rz                                    | 41 |
| Obr. 16. - Průměrná kvadratická úchylka profilu – Rq                        | 41 |
| Obr. 17. – Parametr RSm   | 42 |
| Obr. 18. – Parametr RΔq   | 42 |
| Obr. 19. – Parametr Rmr©  | 42 |
| Obr. 20. - Gaussovo rozdělení pravděpodobnosti výskytu hodnoty              | 43 |
| Obr. 21. – Princip měření dotykovým profilometrem                           | 44 |
| Obr. 22. – Metoda světelného řezu – princip a zobrazení v okuláru           | 45 |
| Obr. 23. – princip využití interference světla pro měření struktury povrchu | 45 |
| Obr. 24. – Schéma CLA snímače   | 46 |
| Obr. 25. – Vzorky CFRP s drážkou  | 50 |

---

|   |    |
|---|----|
| Obr. 26. – Vzorok CFRP pro boční frézování                      | 50 |
| Obr. 27. – Vzorek GFRP s drážkami                               | 51 |
| Obr. 28. – Vzorek Corecorku NL10                                | 52 |
| Obr. 29. – Testované nástroje firmy SECO                        | 53 |
| Obr. 30. – Nástroj JS 522 (T1)                                  | 54 |
| Obr. 31. – Nástroj JC 880 (T2)                                  | 54 |
| Obr. 32. – Nástroj JC 840 (T3)                                  | 55 |
| Obr. 33. – Nástroj JC 860 (T4)                                  | 55 |
| Obr. 34. – Nástroj JC 871 (T5)                                  | 56 |
| Obr. 35. – Princip měření bočního frézování                     | 57 |
| Obr. 36. – CNC frézka C – 442 HWT                               | 58 |
| Obr. 37. - Dráha při trochoidním frézování                      | 59 |
| Obr. 38. – Dotykový profilometr Mitutoyo SJ – 410               | 61 |
| Obr. 39. - Hodnoty Ra pro CFRP (dno)                            | 63 |
| Obr. 40. - Porovnání parametru Ra v jednotlivých vrstvách (T2)  | 66 |
| Obr. 41. - Hodnoty Ra pro GFRP (dno)                            | 68 |
| Obr. 42. - Roztřepení korkového jádra                           | 70 |
| Obr. 43. – Měření šířky drážky                                  | 71 |
| Obr. 44. - Princip vyhodnocení delaminace                       | 73 |
| Obr. 45. - Delaminace GFRP                                      | 73 |
| Obr. 46. - Grafické znázornění bodového hodnocení CFRP          | 75 |
| Obr. 47. - znázornění bodového hodnocení GFRP                   | 76 |
| Obr. 48. - Grafické znázornění bodového hodnocení Corecork NL10 | 77 |

**SEZNAM TABULEK**

|  |    |
|--|----|
| Tab. 1. - Vlastnosti vláken s porovnáním konvenčních materiálů       | 16 |
| Tab. 2. - Odvod tepla z místa řezu při obrábění.                     | 28 |
| Tab. 3. - Základní vlastnosti CFRP                                   | 49 |
| Tab. 4. - Základní vlastnosti GFRP                                   | 51 |
| Tab. 5. - Základní vlastnosti Corecorku NL10 v sendvičovém stavu     | 52 |
| Tab. 6. - Parametry nástroje JS 522 (T1)                             | 54 |
| Tab. 7. - Parametry nástroje JC 880 (T2)                             | 54 |
| Tab. 8. - Parametry nástroje JC 840 (T3)                             | 55 |
| Tab. 9. - Parametry nástroje JC 860 (T4)                             | 55 |
| Tab. 10. - Parametry nástroje JC 871 (T5)                            | 56 |
| Tab. 11. - Srovnání naměřených průměrů řezné části s daty od výrobce | 56 |
| Tab. 12. - Technické parametry CNC frézky C – 442 HWT                | 58 |
| Tab. 13. - Řezné podmínky pro frézování                              | 60 |
| Tab. 14. - Hodnoty parametrů při čelním frézování CFRP               | 62 |
| Tab. 15. - Hodnoty parametrů W a p z testu normálnosti               | 64 |
| Tab. 16. - Hodnoty parametrů při bočním frézování CFRP               | 65 |
| Tab. 17. - Hodnoty parametrů při čelním frézování GFRP               | 67 |
| Tab. 18. - Hodnoty parametrů při bočním frézování GFRP               | 68 |
| Tab. 19. - Hodnoty parametrů při čelním frézování Corecork NL10      | 69 |
| Tab. 20. - Hodnoty parametrů při bočním frézování Corecork NL10      | 70 |
| Tab. 21. - Hodnoty šířky drážek                                      | 71 |
| Tab. 22. - Výsledky delaminačního faktoru                            | 72 |
| Tab. 23. - Bobové hodnocení CFRP                                     | 75 |
| Tab. 24. - Bodové hodnocení GFRP                                     | 76 |
| Tab. 25. - Bodové hodnocení Corecork NL10                            | 77 |

## SEZNAM PŘÍLOH

- P I Part program pro frézování drážky
- P II Part program pro boční frézování
- P III Ukázka vyhodnocení měření přístroje Mitutoyo SJ – 410
- P IV Kritické hodnoty pro Shapirův-Wilkův
- P V Srovnání kvality drážek
- P VI Opatření nástrojů



## PŘÍLOHA P I: PART PROGRAM PRO FRÉZOVÁNÍ DRÁŽKY

N010 G00 Y0

N020 M03 S5310 T01 Z0

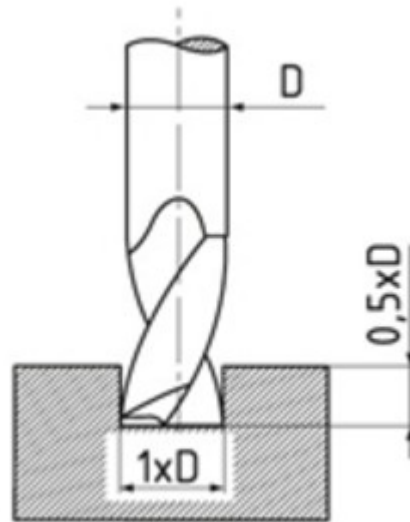
N030 G01 Z-1 F550

N040 G01 Y0 X150

N050 G00 Z10

N060 G00 X0

N070 M30



## PŘÍLOHA P II: PART PROGRAM PRO BOČNÍ FRÉZOVÁNÍ

N010 G00 X20 Y0 Y30

N020 M03 S5310 T01

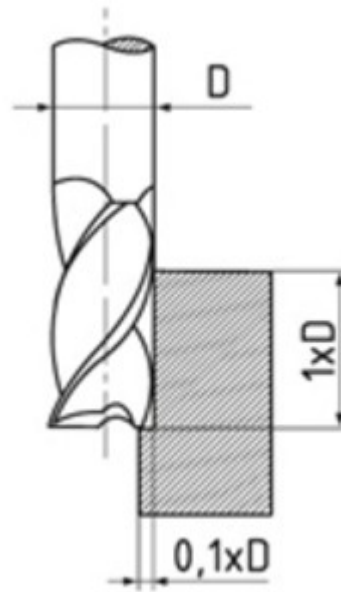
N030 G00 Z-12,5

N040 G01 Y2

N050 G01 X-150 F 550

N060 G00 Z30 X20

N070 M30



# PŘÍLOHA P III: UKÁZKA VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ PŘÍSTROJE MITUTOYO SJ – 410

Mitutoyo

**SURFTTEST**  
**SJ-410**

H-meritko 200.00  $\mu\text{m}/\text{cm}$

Datum 06/04/2016  
Cas 10:55:02

PodminkyMereni

|              |          |
|--------------|----------|
| Rychl. -M    | 0.5mm/s  |
| Rychl. -Zpet | 2.0mm/s  |
| Rozsah       | AUTO     |
| Mimo rozs.   | ESC      |
| Komp.ramen   | Vyp      |
| Auto-Start   | Vyp      |
| Auto-Zpet    | Zap      |
| Zatazeni     | Vyp      |
| Pojezd       | Zap      |
| Vysl.kalib.  | Vyp      |
| Vyber doteku | 12AAC731 |

**A** Podm. vyhodn.

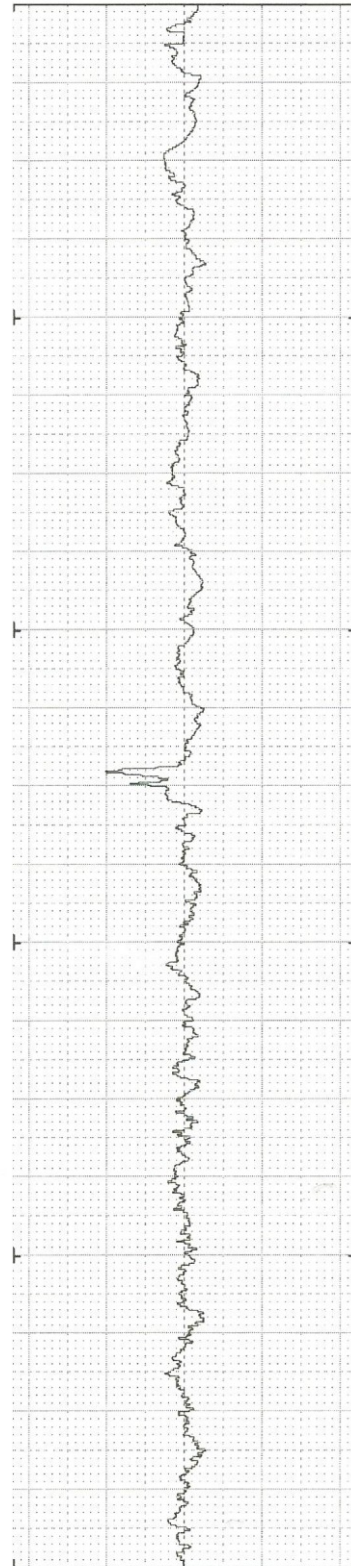
|              |                   |
|--------------|-------------------|
| Norma        | ISO1997           |
| Profil       | R                 |
| Filtr        | GAUSS             |
| $\lambda_c$  | 0.8mm             |
| $\lambda_s$  | 2.5 $\mu\text{m}$ |
| N            | 5                 |
| Pre/Post     | Zap               |
| SmazatVln.   | Vyp               |
| Tol.vyhodno. | StredHod          |
| Komp.Prof.   | Vyp               |
| StredniPr.   | Vypnout           |

Vysledky

|     |               |               |
|-----|---------------|---------------|
| Ra  | 1.921         | $\mu\text{m}$ |
| Rz  | 13.164        | $\mu\text{m}$ |
| RSm | 233.1         | $\mu\text{m}$ |
|     | [Zp/Zv:10.0%] |               |

RProfil

x500  
v50



Mitutoyo

SURFTTEST  
SJ-410

Datum 06/04/2016  
Cas 10:57:01

PodminkyMereni

Rychl. -M 0.5mm/s  
Rychl. -Zpet 2.0mm/s  
Rozsah AUTO  
Mimo rozs. ESC  
Komp. ramen Vyp  
Auto-Start Vyp  
Auto-Zpet Zap  
Zatazeni Vyp  
Pojezd Zap  
Vysl. kalib. Vyp  
Vyber doteku 12AAC731

Podm. vyhodn.

Norma ISO1997  
Profil R  
Filtr GAUSS  
λc 2.5mm  
λs 8μm  
N 5  
Pre/Post Zap  
SmazatVln. Vyp  
Tol. vyhodno. StredHod  
Komp. Prof. Vyp  
StredniPr. Vypnout

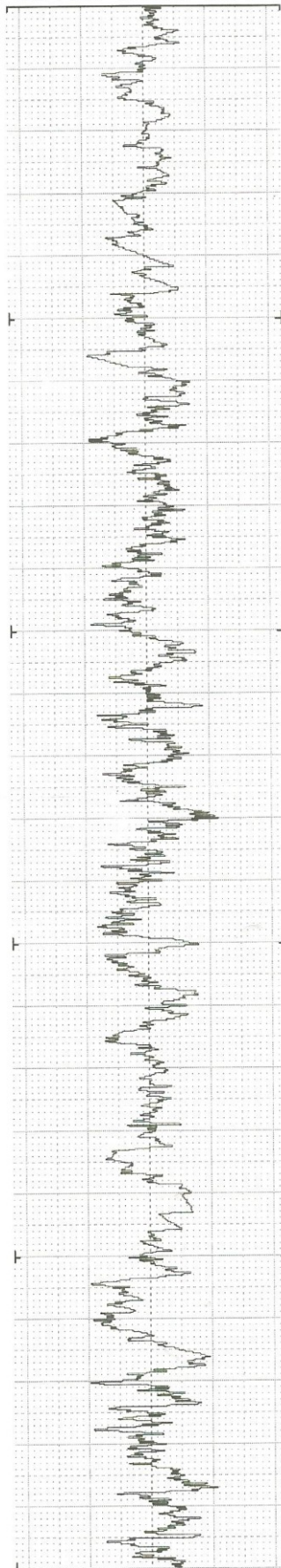
Vysledky

Ra 3.004 μm  
Rz 17.016 μm  
RSm 262.3 μm  
[Zp/Zv: 10.0%]

RProfil

x1K

V-meritko 10.00 μm/cm  
H-meritko 500.00 μm/cm



Stat. vysle.

Vel. vyberu 5  
Parametr Ra  
Hodn. toler.  
Hor. Tol. 0.000 μm  
Dol. Tol. 0.000 μm  
Stred. hod. 23.763 μm  
Std. odch. 10.132 μm  
Max. 36.276 μm  
Min. 9.983 μm  
Pruch. pod. 0.0 %  
Parametr Rz  
Hodn. toler.  
Hor. Tol. 0.000 μm  
Dol. Tol. 0.000 μm  
Stred. hod. 139.73 μm  
Std. odch. 51.127 μm  
Max. 191.16 μm  
Min. 55.259 μm  
Pruch. pod. 0.0 %  
Parametr RSm  
Hodn. toler.  
Hor. Tol. 0.0 μm  
Dol. Tol. 0.0 μm  
Stred. hod. 993.0 μm  
Std. odch. 432.2 μm  
Max. 1602.0 μm  
Min. 380.8 μm  
Pruch. pod. 0.0 %

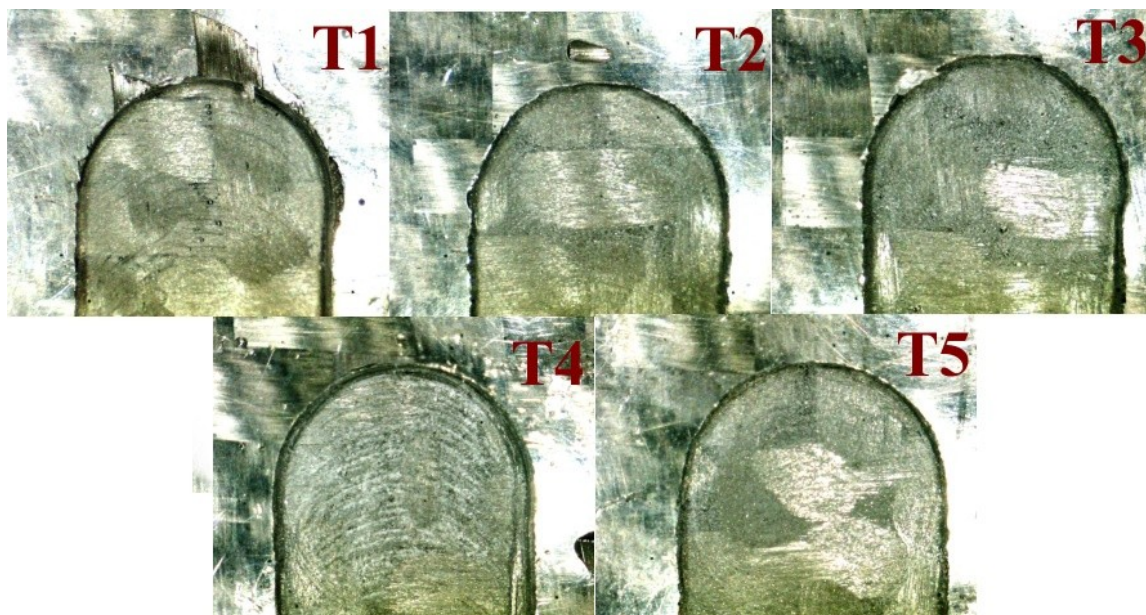
# PŘÍLOHA P IV: KRITICKÉ HODNOTY PRO SHAPIRŮV-WILKŮV TEST [32]

| <i>n</i>  | <b>0-01</b> | <b>0-02</b> | <b>0-05</b> | <b>0-10</b> | <b>0-50</b> | <b>0-90</b> | <b>0-95</b> | <b>0-98</b> | <b>0-99</b> |
|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>3</b>  | 0-753       | 0-756       | 0-767       | 0-789       | 0-959       | 0-998       | 0-999       | 1-000       | 1-000       |
| <b>4</b>  | ·687        | ·707        | ·748        | ·792        | ·935        | ·987        | ·992        | ·996        | ·997        |
| <b>5</b>  | ·686        | ·715        | ·762        | ·806        | ·927        | ·979        | ·986        | ·991        | ·993        |
| <b>6</b>  | 0-713       | 0-743       | 0-788       | 0-826       | 0-927       | 0-974       | 0-981       | 0-986       | 0-989       |
| <b>7</b>  | ·730        | ·760        | ·803        | ·838        | ·928        | ·972        | ·979        | ·985        | ·988        |
| <b>8</b>  | ·749        | ·778        | ·818        | ·851        | ·932        | ·972        | ·978        | ·984        | ·987        |
| <b>9</b>  | ·764        | ·791        | ·829        | ·859        | ·935        | ·972        | ·978        | ·984        | ·986        |
| <b>10</b> | ·781        | ·806        | ·842        | ·869        | ·938        | ·972        | ·978        | ·983        | ·986        |
| <b>11</b> | 0-792       | 0-817       | 0-850       | 0-876       | 0-940       | 0-973       | 0-979       | 0-984       | 0-986       |
| <b>12</b> | ·805        | ·828        | ·859        | ·883        | ·943        | ·973        | ·979        | ·984        | ·986        |
| <b>13</b> | ·814        | ·837        | ·866        | ·889        | ·945        | ·974        | ·979        | ·984        | ·986        |
| <b>14</b> | ·825        | ·846        | ·874        | ·895        | ·947        | ·975        | ·980        | ·984        | ·986        |
| <b>15</b> | ·835        | ·855        | ·881        | ·901        | ·950        | ·975        | ·980        | ·984        | ·987        |
| <b>16</b> | 0-844       | 0-863       | 0-887       | 0-906       | 0-952       | 0-976       | 0-981       | 0-985       | 0-987       |
| <b>17</b> | ·851        | ·869        | ·892        | ·910        | ·954        | ·977        | ·981        | ·985        | ·987        |
| <b>18</b> | ·858        | ·874        | ·897        | ·914        | ·956        | ·978        | ·982        | ·986        | ·988        |
| <b>19</b> | ·863        | ·879        | ·901        | ·917        | ·957        | ·978        | ·982        | ·986        | ·988        |
| <b>20</b> | ·868        | ·884        | ·905        | ·920        | ·959        | ·979        | ·983        | ·986        | ·988        |
| <b>21</b> | 0-873       | 0-888       | 0-908       | 0-923       | 0-960       | 0-980       | 0-983       | 0-987       | 0-989       |
| <b>22</b> | ·878        | ·892        | ·911        | ·926        | ·961        | ·980        | ·984        | ·987        | ·989        |
| <b>23</b> | ·881        | ·895        | ·914        | ·928        | ·962        | ·981        | ·984        | ·987        | ·989        |
| <b>24</b> | ·884        | ·898        | ·916        | ·930        | ·963        | ·981        | ·984        | ·987        | ·989        |
| <b>25</b> | ·888        | ·901        | ·918        | ·931        | ·964        | ·981        | ·985        | ·988        | ·989        |
| <b>26</b> | 0-891       | 0-904       | 0-920       | 0-933       | 0-965       | 0-982       | 0-985       | 0-988       | 0-989       |
| <b>27</b> | ·894        | ·906        | ·923        | ·935        | ·965        | ·982        | ·985        | ·988        | ·990        |
| <b>28</b> | ·896        | ·908        | ·924        | ·936        | ·966        | ·982        | ·985        | ·988        | ·990        |
| <b>29</b> | ·898        | ·910        | ·926        | ·937        | ·966        | ·982        | ·985        | ·988        | ·990        |
| <b>30</b> | ·900        | ·912        | ·927        | ·939        | ·967        | ·983        | ·985        | ·988        | ·990        |
| <b>31</b> | 0-902       | 0-914       | 0-929       | 0-940       | 0-967       | 0-983       | 0-986       | 0-988       | 0-990       |
| <b>32</b> | ·904        | ·915        | ·930        | ·941        | ·968        | ·983        | ·986        | ·988        | ·990        |
| <b>33</b> | ·906        | ·917        | ·931        | ·942        | ·968        | ·983        | ·986        | ·989        | ·990        |
| <b>34</b> | ·908        | ·919        | ·933        | ·943        | ·969        | ·983        | ·986        | ·989        | ·990        |
| <b>35</b> | ·910        | ·920        | ·934        | ·944        | ·969        | ·984        | ·986        | ·989        | ·990        |
| <b>36</b> | 0-912       | 0-922       | 0-935       | 0-945       | 0-970       | 0-984       | 0-986       | 0-989       | 0-990       |
| <b>37</b> | ·914        | ·924        | ·936        | ·946        | ·970        | ·984        | ·987        | ·989        | ·990        |
| <b>38</b> | ·916        | ·925        | ·938        | ·947        | ·971        | ·984        | ·987        | ·989        | ·990        |
| <b>39</b> | ·917        | ·927        | ·939        | ·948        | ·971        | ·984        | ·987        | ·989        | ·991        |
| <b>40</b> | ·919        | ·928        | ·940        | ·949        | ·972        | ·985        | ·987        | ·989        | ·991        |
| <b>41</b> | 0-920       | 0-929       | 0-941       | 0-950       | 0-972       | 0-985       | 0-987       | 0-989       | 0-991       |
| <b>42</b> | ·922        | ·930        | ·942        | ·951        | ·972        | ·985        | ·987        | ·989        | ·991        |
| <b>43</b> | ·923        | ·932        | ·943        | ·951        | ·973        | ·985        | ·987        | ·990        | ·991        |
| <b>44</b> | ·924        | ·933        | ·944        | ·952        | ·973        | ·985        | ·987        | ·990        | ·991        |
| <b>45</b> | ·926        | ·934        | ·945        | ·953        | ·973        | ·985        | ·988        | ·990        | ·991        |
| <b>46</b> | 0-927       | 0-935       | 0-945       | 0-953       | 0-974       | 0-985       | 0-988       | 0-990       | 0-991       |
| <b>47</b> | ·928        | ·936        | ·946        | ·954        | ·974        | ·985        | ·988        | ·990        | ·991        |
| <b>48</b> | ·929        | ·937        | ·947        | ·954        | ·974        | ·985        | ·988        | ·990        | ·991        |
| <b>49</b> | ·929        | ·937        | ·947        | ·955        | ·974        | ·985        | ·988        | ·990        | ·991        |
| <b>50</b> | ·930        | ·938        | ·947        | ·955        | ·974        | ·985        | ·988        | ·990        | ·991        |

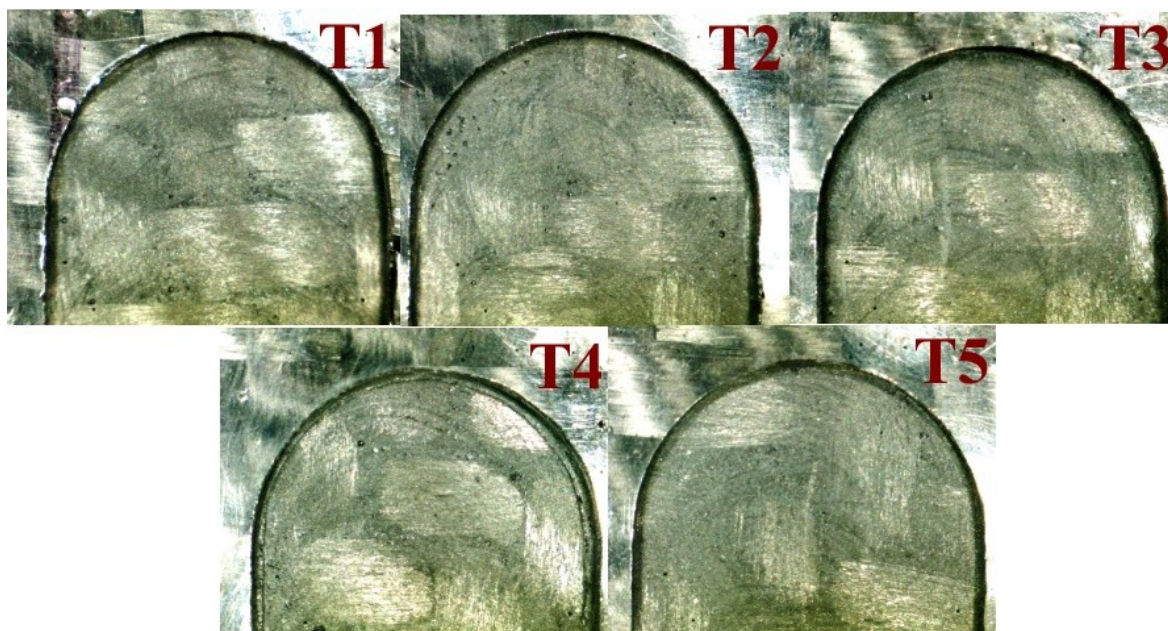
## PŘÍLOHOA P V: SROVNÁNÍ KVALITY DRÁŽEK

Kompozitní materiál s uhlíkovým vláknem.

Normální drážka:

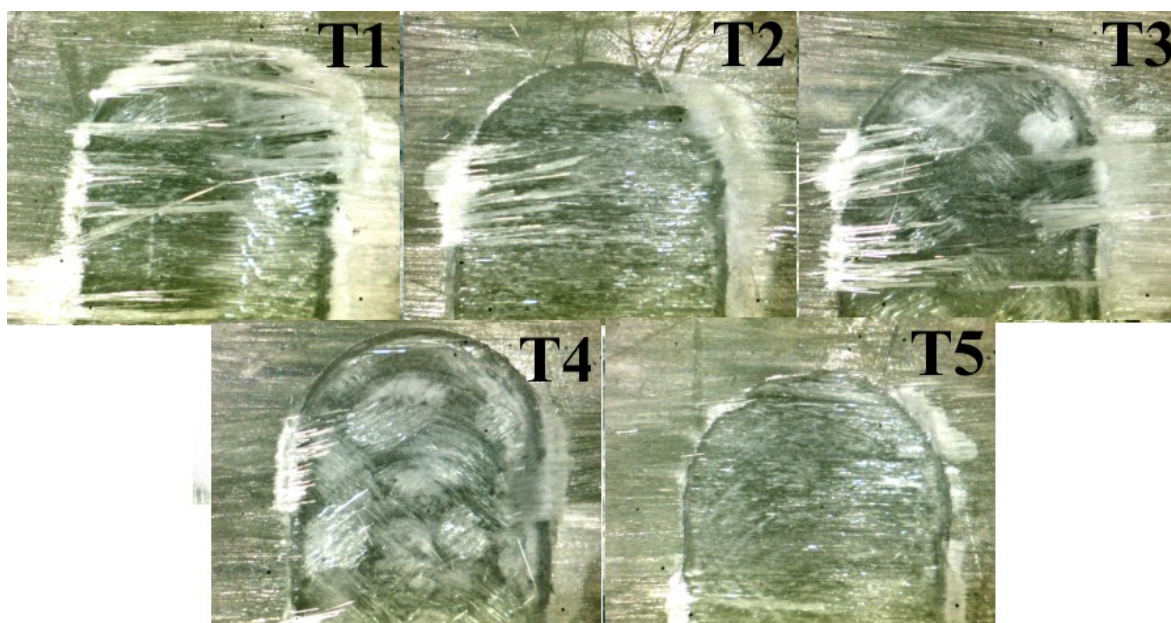


Trochoidní drážka:

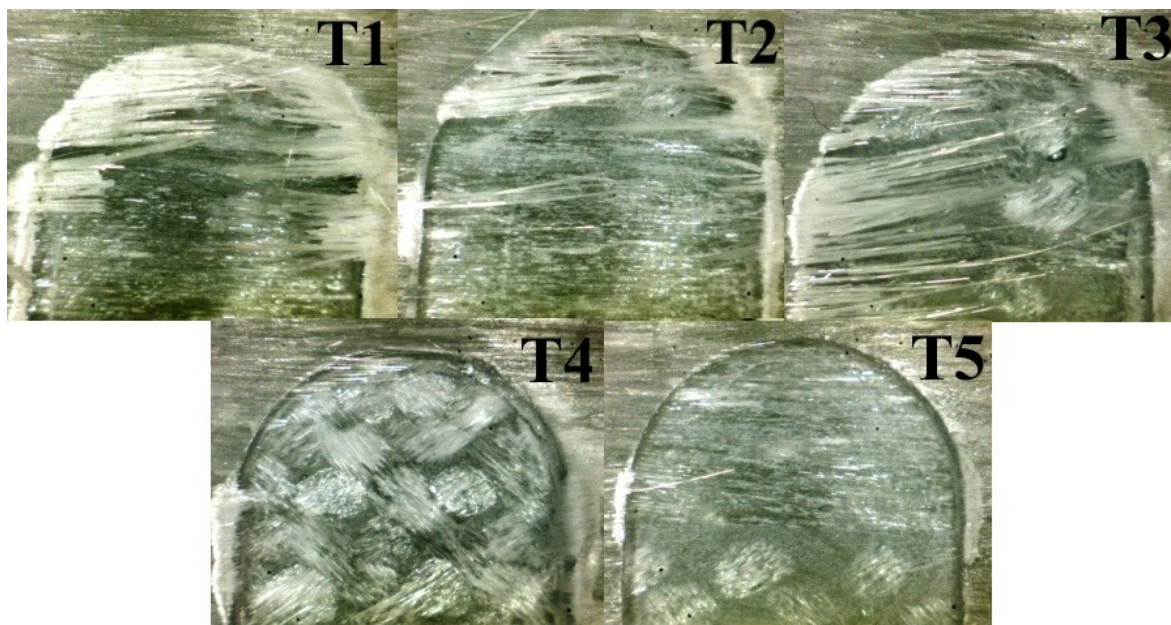


Kompozitní materiál se skleněným vláknem.

Normální drážka:



Trochoidní drážka:



## PŘÍLOHA VI: OPOTŘEBENÍ NÁSTROJŮ

