

# Porovnání technologií řezání kompozitů

Bc. Lukáš Krejčířek

---

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. Lukáš Krejčírek**  
Osobní číslo: **T14539**  
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Porovnání technologií řezání kompozitů.**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte studii na dané téma
2. Vyrobte vzorky z různých materiálů pro experiment
3. Proveďte experiment
4. Proveďte vyhodnocení experimentu

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

**Dle doporučení vedoucí diplomové práce.**

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Jana Knedlová**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

**8. ledna 2016**

Termín odevzdání diplomové práce:

**13. května 2016**

Ve Zlíně dne 26. ledna 2016



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



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

Příjmení a jméno: Krejčířek Lukáš

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, považuji se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 5. 5. 2016.

  
.....

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

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

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

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

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

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

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

(1) *Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpirá-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 přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.*

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá porovnáním technologií řezání kompozitních materiálů pomocí laserového a vodního paprsku. V teoretické části jsou popsány kompozitní materiály, jejich vlastnosti, rozdělení a technologie výroby. Poslední část teoretické části popisuje řezání materiálů laserovým a vodním paprskem. Praktická část se zabývá výrobou kompozitu metodou ruční laminace a vyřezáním vzorků laserem a vodním paprskem. Na vzorcích byl zkoumán vzhled řezu, drsnost, šířka řezné mezery a ovlivnění mechanických vlastností.

Klíčová slova: Kompozit, řezání, laser, vodní paprsek, drsnost, řezná mezera, mechanické vlastnosti.

## **ABSTRACT**

This thesis presents a comparison of cutting technologies of composite materials by laser and water jet. The theoretical part describes composite materials, their properties, distribution and manufacturing technologies. The last part of the theoretical part describes cutting the material by laser and waterjet. The practical part deals with the production of composites by hand lamination and cutting out the samples by the laser and waterjet. The samples were examined to appearance sectional roughness, the width of the cutting gap and the influence on the mechanical properties.

Keywords: Composite, cutting, laser, water jet, roughness, cutting gap, mechanical properties.

Poděkování:

Rád bych zde poděkoval všem, kteří mi poskytli svůj čas a rady při tvorbě této práce.

Zejména děkuji vedoucímu mé diplomové práce paní Ing. Janě Knedlové za odborný pohled, vedení a čas při práci na této diplomové práci. Dále bych rád poděkoval firmě Karel Kaňák, s.r.o. za pomoc při vyřezání vzorků a v neposlední řadě mé rodině za podporu po celou dobu mého studia.

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>11</b> |
| <b>1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY</b> .....                  | <b>12</b> |
| 1.1 VLASTNOSTI KOMPOZITŮ .....                       | 12        |
| 1.2 DRUHY KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ.....                | 14        |
| 1.2.1 Rozdělení dle disperzní fáze .....             | 15        |
| 1.2.2 Rozdělení dle výztuže .....                    | 15        |
| 1.2.3 Rozdělení dle matrice.....                     | 22        |
| <b>2 VÝROBA KOMPOZITŮ</b> .....                      | <b>26</b> |
| 2.1 RUČNÍ LAMINACE .....                             | 26        |
| 2.2 NANÁŠENÍ SPREJEM.....                            | 27        |
| 2.3 VYSOKOTLAKÉ VSTRÍKOVÁNÍ .....                    | 28        |
| 2.4 TAŽENÍ (PULTRUZE).....                           | 29        |
| 2.5 NAVÍJENÍ.....                                    | 30        |
| 2.6 LISOVÁNÍ ZA POMOCI VAKUA .....                   | 30        |
| 2.7 VÝROBA HPL LAMINÁTŮ .....                        | 31        |
| <b>3 ŘEZÁNÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ</b> .....         | <b>32</b> |
| 3.1 LASER .....                                      | 32        |
| 3.1.1 Princip laseru.....                            | 32        |
| 3.1.2 Dělení laserů.....                             | 35        |
| 3.1.3 Interakce materiálu s laserovým paprskem ..... | 36        |
| 3.1.4 Princip řezání laserem .....                   | 38        |
| 3.2 VODNÍ PAPERSEK .....                             | 39        |
| 3.2.1 Princip řezání vodním paprskem.....            | 41        |
| <b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....                       | <b>43</b> |
| <b>4 CÍL PRÁCE</b> .....                             | <b>44</b> |
| <b>5 POPIS VYBRANÝCH KOMPOZITŮ</b> .....             | <b>45</b> |
| 5.1 VÝROBA ARAMIDOVÉHO KOMPOZITU .....               | 46        |
| <b>6 ŘEZÁNÍ VZORKŮ Z KOMPOZITŮ</b> .....             | <b>49</b> |
| <b>7 VIZUÁLNÍ ZKOUMÁNÍ ŘEZU</b> .....                | <b>51</b> |
| 7.1 ARAMIDOVÝ KOMPOZIT ŘEZANÝ LASEREM .....          | 52        |
| 7.2 ARAMIDOVÝ KOMPOZIT ŘEZANÝ VODNÍM PAPERSEM .....  | 54        |
| 7.3 UHLÍKOVÝ KOMPOZIT ŘEZANÝ LASEREM .....           | 56        |
| 7.4 UHLÍKOVÝ KOMPOZIT ŘEZANÝ VODNÍM PAPERSEM .....   | 59        |
| 7.5 HPL LAMINÁT ŘEZANÝ LASEREM.....                  | 61        |
| 7.6 HPL LAMINÁT ŘEZANÝ VODNÍM PAPERSEM .....         | 63        |
| <b>8 MĚŘENÍ DRSNOSTI ŘEZU</b> .....                  | <b>65</b> |



|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 8.1       | POSTUP MĚŘENÍ.....  | 66         |
| 8.2       | VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT.....                        | 67         |
| 8.3       | POROVNÁNÍ PARAMETRU RA A RZ STATISTICKÝMI HYPOTÉZAMI..... | 68         |
| <b>9</b>  | <b>MĚŘENÍ ŠÍŘKY ŘEZNÉ MEZERY.....</b>                     | <b>76</b>  |
| <b>10</b> | <b>MĚŘENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ.....</b>                | <b>79</b>  |
| 10.1      | POROVNÁNÍ MODULU PRUŽNOSTI V TAHU.....                    | 82         |
| 10.2      | POROVNÁNÍ PEVNOSTI V TAHU.....                            | 83         |
| 10.3      | POROVNÁNÍ TAŽNOSTI.....                                   | 84         |
| <b>11</b> | <b>EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....</b>                         | <b>86</b>  |
|           | <b>ZÁVĚR.....</b>   | <b>88</b>  |
|           | <b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>                     | <b>90</b>  |
|           | <b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>            | <b>94</b>  |
|           | <b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>                                | <b>97</b>  |
|           | <b>SEZNAM TABULEK.....</b>                                | <b>100</b> |
|           | <b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>                                 | <b>101</b> |

## ÚVOD

V době, ve které nyní žijeme, procházejí materiály a technologie nepřetržitým vývojem. Jedním ze znaků dnešní doby je neustálý rozmach a využívání kompozitních materiálů v mnoha odvětvích. Význam slova kompozitní znamená složený ze dvou nebo více různých prvků. Vzájemnou kombinací různých materiálů s odlišnými vlastnostmi můžeme dosáhnout výhodných vlastností a potlačit nevýhodné. Původně se kompozitní materiály využívaly hlavně ve vojenském průmyslu a až postupem času se využití rozšířilo do oblasti letecké, sportovní, automobilové a dalších. Za jejich rozšíření stojí především jejich unikátní vlastnosti jako je např. nízká hustota, vysoká pevnost či chemická odolnost.

Dnešní moderní kompozitní materiály mají spojitou polymerní matici s vláknitou výztuží. Jejich použití je stále rozšířenější zejména kvůli jejich výhodným vlastnostem v poměru k jejich nízké hmotnosti. Co je ovšem problematické, je jejich obrábění, které se v mnohém liší od obrábění běžných kovů. A přesto, že jsou kompozitní materiály často vyráběné ve finálních tvarech, tak zejména kompozitní materiály vyráběné ve tvaru desek, trubek či různých profilů je většinou nutné obrobit.

Teoretická část této práce popisuje vlastnosti, rozdělení a výrobu kompozitních materiálů. Dále teoretická část pojednává o řezání materiálů pomocí laserového a vodního paprsku. Praktická část je zaměřena na výrobu kompozitu metodou ruční laminace a následné vyřezání vzorků laserovým a vodním paprskem. Poté následuje vyhodnocení jednotlivých technologií dle vzhledu řezu, drsnosti, šířky řezné mezery a ovlivnění mechanických vlastností.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

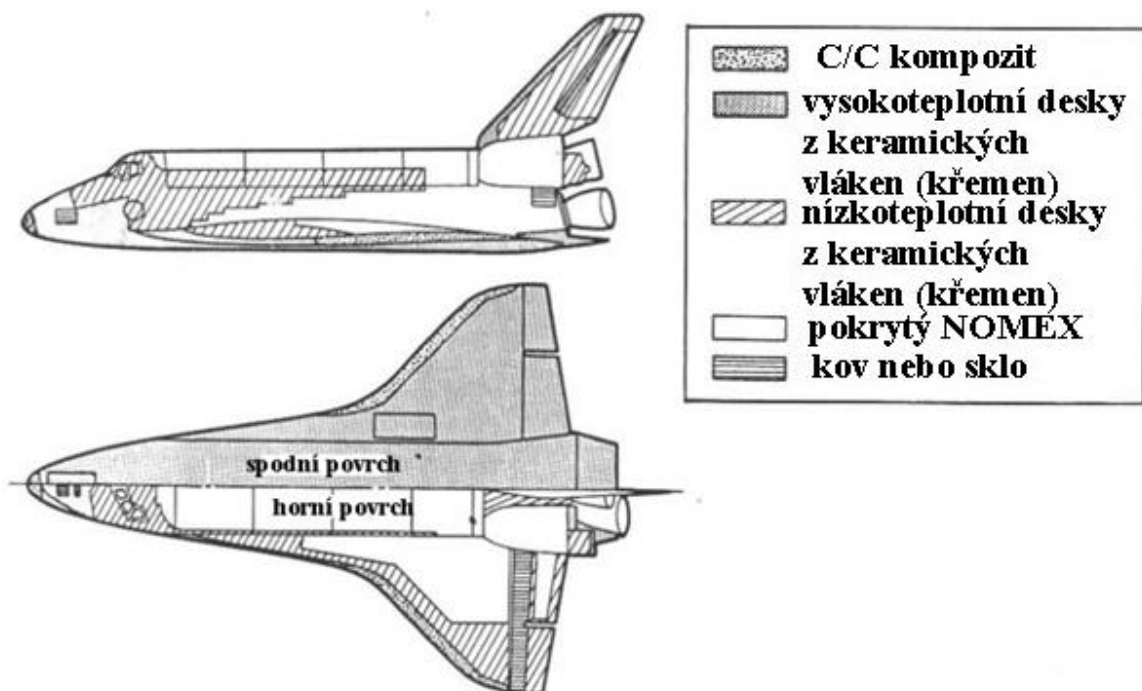
## 1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozitní materiály jsou materiály, které se skládají ze dvou či více fyzikálně a chemicky odlišných fází (složek). Jejich složením dostaneme nový materiál, který má v porovnání s jednotlivými složkami své specifické vlastnosti, odlišné od jednotlivých složek. [1,2]

Výsledné vlastnosti kompozitu jsou dány zejména použitým typem výztuže a pojiva. Výztuž je většinou pevnější, tvrdší, tužší a houževnatější než pojivo. Pojivo je spojitě a většinou poddajnější než výztuž. Nazýváme jej maticí. Výztuž má za úkol hlavně zpevnit matici a zabezpečit přenos vnějšího zatížení. Matrice má za úkol zaručit geometrický tvar, ochránit vyztužující vlákna a přenést zatížení na vyztužující vlákna. [1,2,4]

Materiály, které řadíme mezi kompozity, musí splnit tyto podmínky:

- kompozit musí být tvořen dvěma či více složkami
- vlastnosti výztuže a matrice se musí lišit
- podíl výztuže v kompozitu musí být větší než 5 % [3]

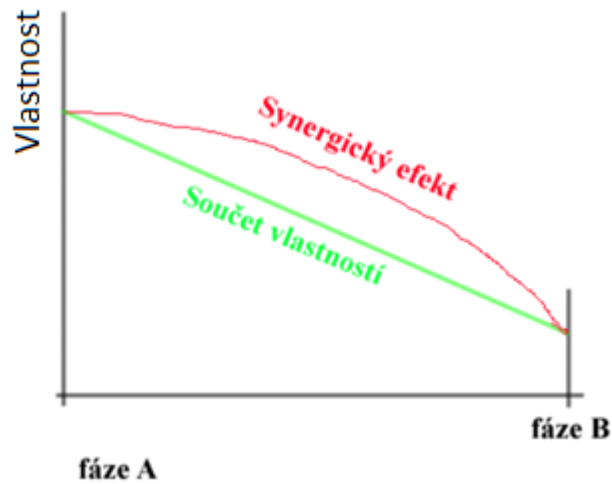


Obr. 1. Použití kompozitů u raketoplánu [5]

### 1.1 Vlastnosti kompozitů

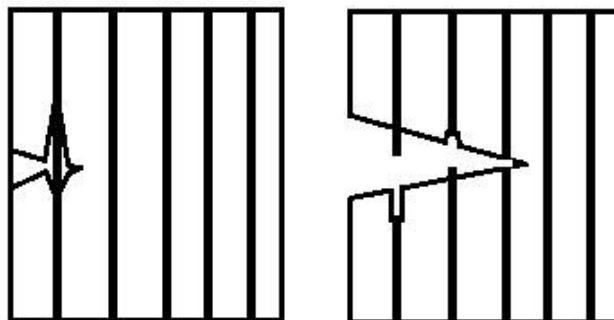
Výsledný kompozit dosahuje vlastností, které nemají jeho jednotlivé složky a to ani jako jejich součet – vzniká synergický efekt. Je to efekt společného působení, součinnosti jed-

notlivých složek kompozitu (na následujícím obrázku představuje fáze A výztuž a fáze B matrici).



Obr. 2. Synergický efekt [6]

Jestliže jsou jak vlákno i matrice samostatně velmi křehké, výsledný kompozit vykazuje určitou houževnatost. Je to způsobeno tím, že šířící se trhlina je brzděna na rozhraní vyztužujících vláken a matrice. Vyskytuje se zde odklonění směru šíření trhliny a také tření na rozhraní matrice a vytahujících se vláken. [10, 11]



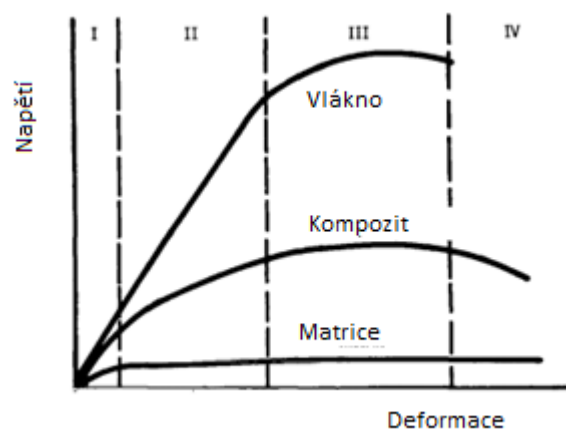
Obr. 3. Odklonění směru šíření trhliny  
a tření při deformaci kompozitu [10]

Výhody kompozitních materiálů:

- vysoká tuhost, pevnost
- tlumící vlastnosti
- nízká hmotnost
- lze použít i u tvarově složitých dílů
- nekorodují

Nevýhody kompozitních materiálů:

- vysoká cena
- složitá výroba a zpracování
- u vláknitých kompozitů horší mechanické vlastnosti v kolmém směru zatížení vzhledem k orientaci vláken
- obtížná oprava
- obtížná recyklace



Obr. 4. Schématické znázornění deformace vlákniny, matrice a kompozitu ve 4 úsecích [7]

## 1.2 Druhy kompozitních materiálů

Kompozitní materiály lze rozdělit do několika kategorií. Nejčastěji se rozdělují dle typu disperzní fáze, použité matrice či výztuže. [5]

### 1.2.1 Rozdělení dle disperzní fáze

Kompozit je vždy složen z matrice, ta je spojitá a určuje výsledný tvar. Ostatní složky jsou v matrici rozptýleny - dispergovány. Většinou se v kompozitu vyskytuje pevná fáze, ale existují i další disperze. [6]

#### - Kompozity prvního typu

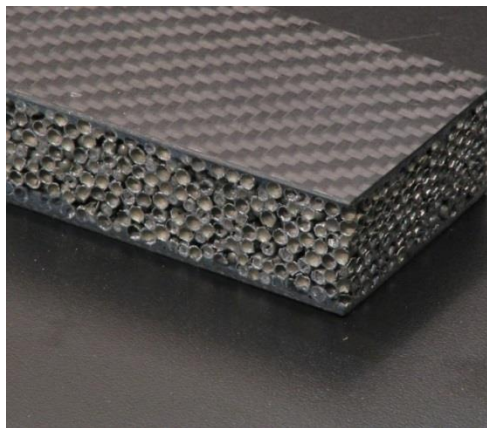
Disperze je vytvořena z pevné fáze. Jsou to nejběžnější a v technice nejdůležitější kompozity. [6]

#### - Kompozity druhého typu

Disperze obsahuje kapalnou fázi. Nejsou běžné, patří sem například některé materiály samomazných ložisek – spěkaný kov s disperzí oleje. Vyskytují se i v přírodě – např. dřevo jako systém trubic s mizou či skořápky mořských živočichů. [6]

#### - Kompozity třetího typu

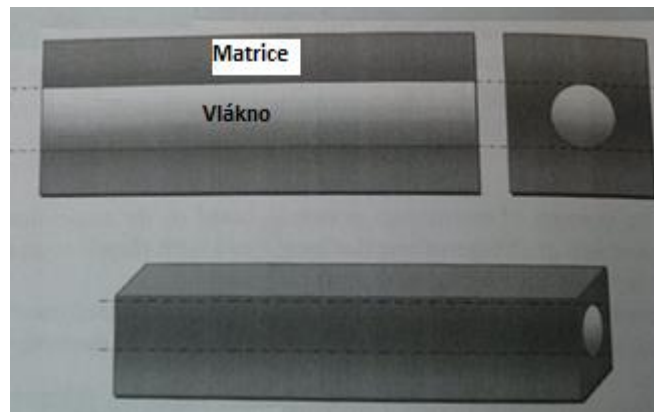
Disperze obsahuje plynnou fázi. Sem řadíme různé pěnové hmoty - pěnoplasty, například pěnový polystyren. Dále kovové pěny a pěnokeramiku. [6]



*Obr. 5. Kovová pěna [8]*

### 1.2.2 Rozdělení dle výztuže

Výztuž v kompozitu zajišťuje zlepšení mechanických vlastností. Může být z různých materiálů a různých velikostí. Nanokompozity mají velikost výztuže v řádu 100 nm. Používají se například ve zdravotnictví, výpočetní technice. Mikrokompozity mají velikost příčného rozměru vlákna v rozmezí  $10^0$  až  $10^2$   $\mu\text{m}$  a v průmyslu nachází největší využití. Makrokompozity mají velikost příčného rozměru  $10^0$  až  $10^2$  mm (například železobeton). [3]



Obr. 6. Schéma složení kompozitu [9]

### a) Rozdělení dle tvaru výztuže

Tvar jednotlivých částic disperze výrazně ovlivňuje anizotropii. Dle tvaru výztuže můžeme kompozity dělit na částicové nebo vláknové.



Obr. 7. Rozdělení kompozitů podle výztuže [10]

#### - Částicové výztuže

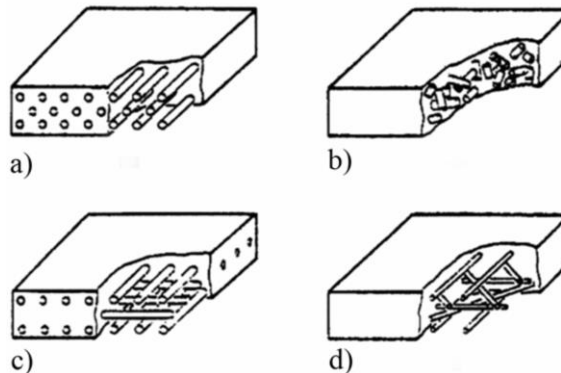
Částice jsou minerálního původu nebo původu, kdy je mletím meleme na určitou velikost a tvar, nebo jsou chemicky vyráběné z přírodních zdrojů, kdy na druhu a způsobu výroby závisí jejich velikost a tvar. Dle tvaru je můžeme dělit na izometrické (tvar elipsoidu nebo koule) nebo na anizometrické (tvar jehlic nebo destiček). Tyto výztuže nám neovlivňují výsledné vlastnosti v různých směrech (nezpůsobují anizotropii). Nejčastější jsou keramické částice. [1, 3]

#### - Vláknové výztuže

U jednovrstvých kompozitů jsou rozměry vláknové výztuže takové, že jeden rozměr je vždy mnohem větší než zbývající. V matrici jsou vlákna uspořádána náhodně nebo orien-



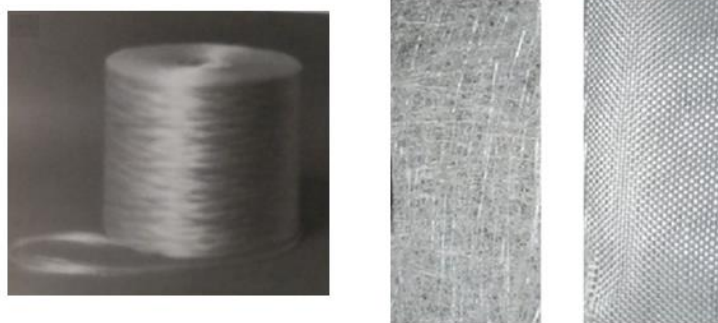
tovaně. U orientovaných vláken se výrazně liší pevnost ve směru vláken oproti pevnosti ve směru kolmém na orientaci vláken. A to mnohdy velmi výrazně. Projevuje se zde tedy vliv anizotropie (jiné vlastnosti v každém směru). Vlákná mohou být nepřerušené po celé délce výrobku nebo krátké. Dle Obr. 8. jejich orientace může být jednosměrně dlouhovláknová uspořádaná (a), krátkovláknová náhodně uspořádaná (b), dlouhovláknová dvousměrná uspořádaná (c), dlouhovláknová náhodně uspořádaná (d). [1, 3]



Obr. 8. Orientace vláken v kompozitu [12]

Vyztužující vlákna se samostatně používají jen výjimečně. Sdružením elementárních vláken vzniknou prameny. Kvůli zpracovatelským důvodům se používají upravené produkty - polotovary.

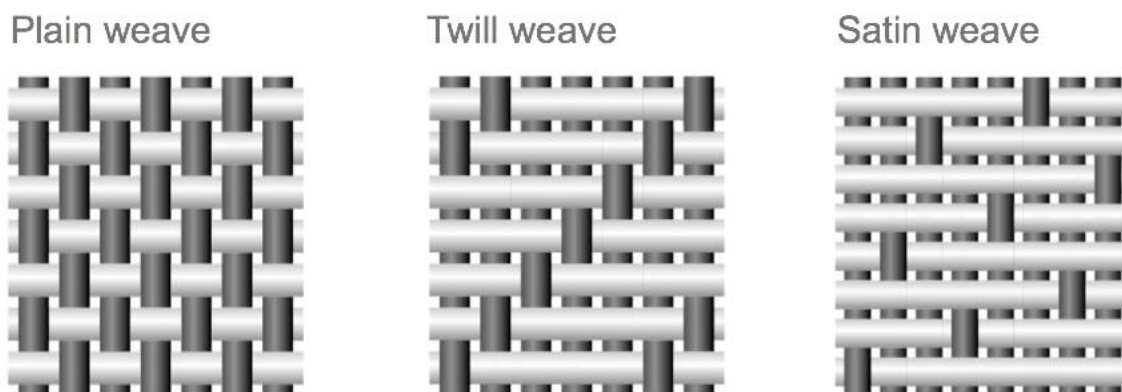
- vlákno: příčný rozměr vlákna je většinou v rozmezí  $10^0$  až  $10^2$   $\mu\text{m}$
- roving (pramenec): skládá se z určitého počtu sdružených vláken s malým (méně než 40 zákrutů na 1 m délky) nebo žádným počtem zákrutů
- rohože: netkané plošné výrobky, nepravidelně uspořádané 50 mm vlákna pojena pojivem
- tkaniny: plošné výrobky z vláken nebo pramenců uložených pravouhle v útku a osnově, čímž působí vyztužně ve dvou směrech [1, 3]



Obr. 9. Vláknité vyztuže - roving, rohož a tkanina [13, 14]

Tkaniny mají různé uspořádání osnovy a útku - různou vazbu. Volba závisí zejména na požadované pevnosti a tvarové členitosti formy. Běžně se vyskytuje vazba plátňová (obtížné tvarování a vysoké zvlnění, ale má největší pevnost), keprová (střední tvarovatelnost i zvlnění) a atlasová (dobrá tvarovatelnost a malé zvlnění, ale nejméně pevná). [3]

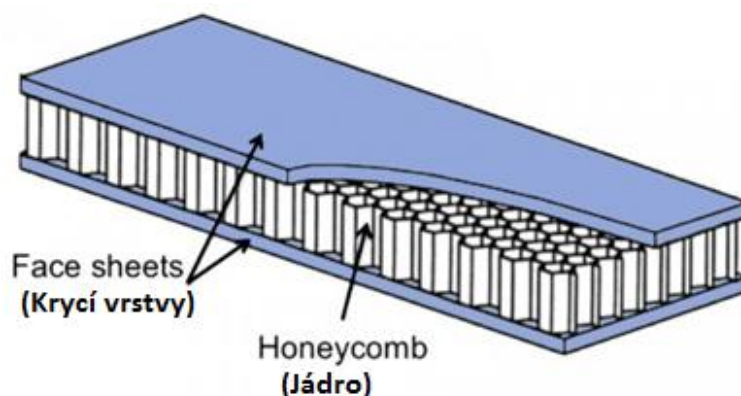
Vlákna lze v tkanině kombinovat s jinými typy vyztužujících vláken. Pak se jedná o hybridní tkaniny. [3]



Obr. 10. Druhy vazeb tkanin – plátňová (plain), keprová (twill) a atlasová (satin) [15]

Dále se často vyskytují vícevrstvé kompozity, kam patří zejména lamináty (několik vrstev ze stejného nebo různého materiálu) a sendviče (dvě vnější vrstvy mezi kterými je jádro).

Velmi rozšířené jsou HPL lamináty (high pressure laminate). Povrchová (dekorová) vrstva je tvrdá, odolná proti poškrábání a poskytuje dlouhodobou barevnou stálost. Dnes existuje velmi široká škála dekoračních motivů. Používají se jak v interiéru (obklady stěn, desky stolů a další nábytek) tak v exteriéru (fasády, balkóny).



Obr. 11. Sendvič s voštinovým jádrem [16]

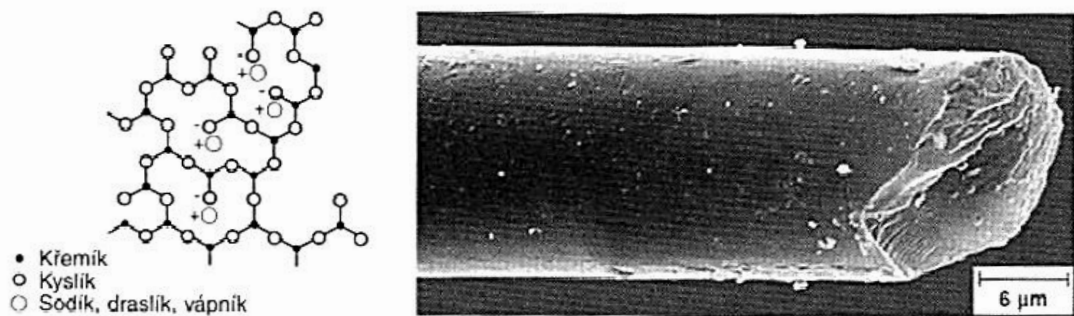
**b) Rozdělení dle druhu vláken****- Skelná vlákna**

Tyto tenká vlákna mají  $\varnothing$  3,5 – 24  $\mu\text{m}$ . Pro výrobu se nejčastěji používá bezalkalická sklovina, tzv. E–sklo a označují se jako E–vlákna. Pro mechanicky více namáhané výrobky se používají tzv. S–vlákna. Ty mají vyšší pevnost. Dále se pro výrobu používá tzv. C–sklovina (vysoká chemická odolnost), ECR–sklovina (vysoká dielektrická konstanta) a AR–sklovina (odlišné složení oproti E–vláknům, vysoká odolnost proti alkáliím). Jejich srovnání je v následující tabulce. [1, 3, 17]

Tab. 1. Složení a vlastnosti jednotlivých sklovin [1]

| Sklovina   | E                   | R nebo S            | C                   | ECR                 | AR                    |
|--|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|
| <b>Složení [%]</b>                                 |                     |                     |                     |                     |                       |
| SiO <sub>2</sub>                                   | 54                  | 60                  | 60 až 65            | 54 až 62            | 62                    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                     | 14 až 15            | 25                  | 2 až 6              | 12 až 13            | -                     |
| CaO  | -                   | 14                  | 14                  | 21                  | 5 až 9                |
| MgO  | 20 až 24            | 3                   | 1 až 3              | 4,5                 | 1 až 4                |
| B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                      | 6 až 9              | < 1                 | 2 až 7              | < 0,1               | < 0,5                 |
| K <sub>2</sub> O                                   | < 1                 | < 1                 | 8                   | 0,6                 | ZrO <sub>2</sub> : 17 |
| Na <sub>2</sub> O                                  | -                   | -                   | -                   | -                   | 12 až 15              |
| <b>Vlastnosti</b>                                  |                     |                     |                     |                     |                       |
| Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]                       | 2,6                 | 2,53                | 2,52                | 2,72                | 2,68                  |
| Mez pevnosti v tahu [N/mm <sup>2</sup> ]           | 3400                | 4400                | 2400                | 3440                | 3000                  |
| E-modul [N/mm <sup>2</sup> ]                       | 73000               | 86000               | 70000               | 73000               | 73000                 |
| Poměrné prodloužení při přetržení [%]              | < 4,8               | < 4,6               | < 4,8               | < 4,8               | < 4,4                 |
| Součinitel teplotní roztažnosti [K <sup>-1</sup> ] | $5,0 \cdot 10^{-6}$ | $4,0 \cdot 10^{-6}$ | $6,3 \cdot 10^{-6}$ | $5,9 \cdot 10^{-6}$ | $6,5 \cdot 10^{-6}$   |
| Teplota měknutí [°C]                               | 850                 | 980                 | 750                 | 880                 | 770                   |

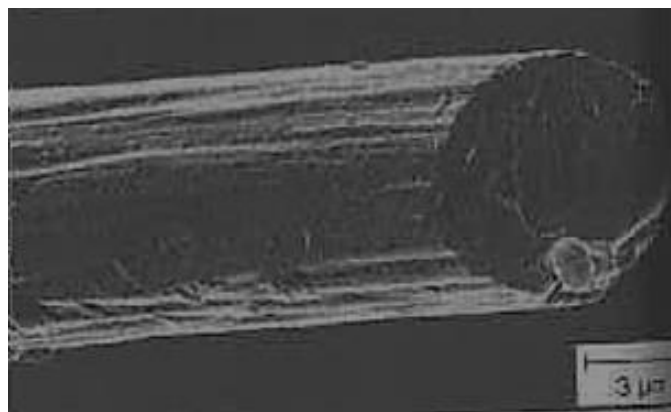
Modul pružnosti skleněných vláken je přibližně stejný jako u hliníku, což je cca 1/3 hodnota oceli. Pevnost v tahu je vyšší než u oceli. Mez průtažnosti se pohybuje kolem 3 % a deformace je elastická. Skleněná vlákna jsou nehořlavá a dlouhodobě odolávají teplotnímu namáhání až 250 °C. Mají amorfní strukturu a oproti aramidovým a uhlíkovým vláknům jsou izotropní. Skelné rohože se používají např. jako izolace proti žáru, tkaniny pak jako primární výztuž laminátů používaných v dopravě, letectví atp. [1, 3, 17]



Obr. 12. Struktura skleněného vlákna [1]

### - Uhlíková vlákna

Tyto vlákna mají  $\varnothing$  5 – 10  $\mu\text{m}$ . Jsou tvořena zejména uhlíkem (více než 90%), dále a dusíkem, kyslíkem a vodíkem. Pro jejich výrobu se používá jako prekurzoru hlavně polyakrylonitril nebo smoly. Vyznačují se vysokou pevností (až 3500 N/mm<sup>2</sup>) a modulem pružnosti (až 500 000 N/mm<sup>2</sup>). Jsou odolná vůči vysokým teplotám, v neoxidujícím prostředí si zachovávají pevnost do teploty 2000 °C, v oxidačním prostředí jejich pevnost klesá od 500 °C. Mají nízkou hustotu, vysokou korozní odolnost, dobrou elektrickou a tepelnou vodivost. Jsou krystalická a silně anizotropní. V osovém směru mají záporný součinitel délkové teplotní roztažnosti (stejně tak aramidová vlákna). Ale v příčném směru mají větší součinitel teplotní roztažnosti než skelná vlákna. Nevýhodou je křehkost vlákna. Využívají se u automobilů, lodí, letadel, ovšem jen pro špičkové výrobky. Většímu využití brání vysoká cena těchto vláken. [1, 3, 17, 40]



Obr. 13. Struktura uhlíkového vlákna [1]

### - Aramidová vlákna

Tyto vlákna mají průměr kolem 12  $\mu\text{m}$ . Často jsou označovány jako kevlar (obchodní název firmy DuPont). Jsou to vlákna na bázi lineárních organických polymerů, jejich kovalentní vazby jsou orientovány dle osy vlákna. Jedná se o nejlehčí vyztužující vlákno, je hydrofilní. Vykazuje silnou anizotropii. Předností je vysoká pevnost, houževnatost (nedochází ke křehkému lomu jako u uhlíkových nebo skleněných vláken) a tepelná odolnost (teplota rozkladu 480°C). Mez pevnosti v tlaku je výrazně nižší než mez pevnosti v tahu. Používají se např. jako protipožární obleky (ve formě kompozitu odolávají teplotě až 300 °C) nebo neprůstřelné vesty. [1, 3, 17, 40]



Obr. 14. Aramidové vlákno s roztřepením v místě lomu [1]

Vyrábí se v různých druzích, lišících se tažností a modulem pružnosti v tahu (Tab. 2.). [1]

Tab. 2. Vlastnosti aramidových vláken [1]

| Aramid            | Hustota<br>[g/cm <sup>3</sup> ] | Průměr<br>[ $\mu\text{m}$ ] | E-modul<br>v tahu<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | Mez pevnosti<br>v tahu<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | Tažnost<br>[%] |
|-------------------|---------------------------------|-----------------------------|---|--|----------------|
| Vysokotažný       | 1,45                            | 12                          | 80000                                     | 3600   | 4,0            |
| S vysokou tuhostí | 1,45                            | 12                          | 131000                                    | 3800   | 2,8            |
| Ultratuhy         | 1,45                            | 12                          | 186000                                    | 3400   | 2,0            |

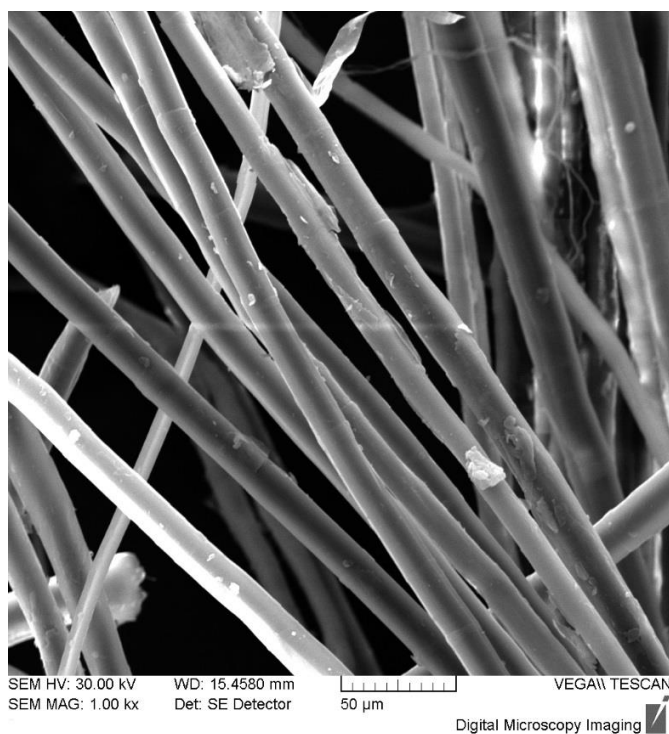
### - Borová vlákna

Tyto vlákna jsou cylindrická a mají poměrně velký průměr (0,1 mm). Vyrábí se metodou CVD (Chemical Vapor Deposition). Tato technologie spočívá v kondenzaci plynného bóru na vláknovém podkladu (wolframové nebo uhlíkové vlákno). Pevnost v tahu těchto vláken dosahuje 3,6 – 4 GPa a modulu pružnosti 400 GPa. Jejich pevnost v tlaku je větší než v tahu (okolo 6,9 GPa). Používají se ve formě filamentu (vlákno neomezené délky) na výro-

bu prepregů. Hlavní aplikační oblastí je zpevnění tlakem namáhaných dílů zejména v letectví. Překážkou pro větší využití je vysoká cena výroby (dnes okolo 300 \$/kg). [3]

#### - Přírodní vlákna

Jsou to vlákna většinou na bázi celulózy jako len, konopí, bavlna, juta. Jedná se o obnovitelných zdroj a pro svou nízkou cenu se využívají jako náhrada či alternativa skleněných vláken. Jsou vhodné pro méně pevnostně náročné a lehké díly například v interiérech dopravních prostředků. Velkou výhodou je přírodní vzhled povrchu, recyklovatelný odpad a nízká hustota. Nevýhodou je závislost vlastností vláken na podmínkách jejich růstu, jsou navlhavé, malá teplotní odolnost (do 200 °C) – omezená volba matrice. [1, 3]

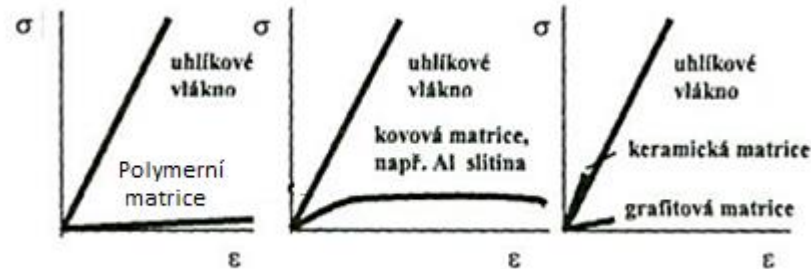


Obr. 15. Mikroskopický snímek vlákna lnu [19]

#### 1.2.3 Rozdělení dle matrice

Matrice je materiál, jímž je prosycen celý systém vláken a po konečném zpracování nám udržuje kompozit tvarově stálý. Úkolem matrice je přenést zatížení na vlákna, zajištění polohy vláken a tvar výrobku a ochranu vláken před okolními vlivy. Zásadním pro výsledné mechanické vlastnosti kompozitu je zajištění co nejlepší adheze na rozhraní matrice a vlákna. Matrice musí mít potřebnou viskozitu a povrchové napětí, aby vlákno smočila celé

(bez bublin). Nejčastěji se používá polymerní matrice reaktoplastická nebo termoplastická. [1, 2]



Obr. 16. Porovnání tahové zkoušky různých matic  
a uhlíkového vlákna [18]

#### - Termoplastické matrice

Termoplasty jsou při pokojové teplotě pevné látky, proto je před zpracováním musíme zahřát nad teplotu tečení (amorfní) nebo tání (semikrystalické), většinou přes 200 °C. Po zpracování se musí zase zchladit. Termoplasty jsou opakovaně tavitelné a při zvýšené teplotě tak ztrácí tuhost a měknou. Naopak výhodou je možnost kompozit s termoplastickou matricí dodatečně svařovat, tvarovat. Dále při správné volbě termoplastu je matrice houževnatá, skvěle chemicky odolná a neabsorbuje vodu. Nejběžněji používaným materiálem je polypropylen a polyamidy. [1, 3]

#### - Reaktoplastické matrice

Jedná se o nejpoužívanější typ matrice, v praxi se používají zejména reaktivní polyesterové (UP – R), epoxidové (EP – R), vinylesterové (VE – R) pryskyřice. Hlavní výhodou je, že při normální teplotě jsou oproti termoplastům tekuté – mají nižší viskozitu a to i v případě, že jsou zpracovávány ve formě taveniny. Proto reaktoplasty lépe smáčejí a prosycují vlákna a hlavně se jednodušeji zpracovávají. [1, 3]

U reaktoplastů je nezbytné provést vytvrzovací proces přidáním katalyzátoru a urychlovače, případně dodáním tepelné energie. Dojde k vytvoření husté, prostorově zesíťované struktury (vytvrzení), je to nevratný děj. Během vytvrzování dochází k exotermní reakci – vývoji tepla, zvýšení viskozity a zmenšení objemu. Během zpracování musíme tato specifika brát v potaz. [1, 3]

Při vytvrzovacím procesu je velice důležitá doba gelace. Po uplynutí této doby se viskózní pryskyřice mění na tuhou elastickou hmotu. Což způsobí, že pryskyřice již není schopna protékat mezi vyztužujícími vlákny. [1, 3]

Výhodou reaktoplastické matrice je vysoká tuhost a pevnost, naopak nevýhodou je její křehkost. [1]

Tab. 3. Srovnání vyztužených termoplastů a termosetů [1]

|                               | <b>Termoplasty</b>   | <b>Termosety</b>  |
|-------------------------------|--|---|
| Matrice                       | Polymerovaná, vysokoviskózní tavenina, špatně se spojuje lepením               | Nevytvrzená, nízkoviskózní, dobře se spojuje lepením a opatřuje nátěrem |
| Cena matrice                  | Nízká, ale i vysoká  | Nízká   |
| Předimpregnace                | Obtížné smáčení a prosycování  | Snadné  |
| Cena předimpregnace           | Vysoká   | Nízká   |
| Skladování                    | Neomezeně skladovatelné  | Omezená skladovatelnost (v chladu), reakce pomalu pokračuje             |
| Polotovar                     | Termoplasty vyztužené skleněnou rohoží (GMT), pásy                             | Lisovací hmoty SMC (prepregy)   |
| Přímé zpracování              | Granulát (krátká vlákna), přímo zpracovatelný dlouhovláknitý polotovar (D-LFT) | Výztuž a reaktivní pryskyřice   |
| Teplota při zpracování        | Teplota taveniny   | Teplota okolí   |
| Tvarování                     | Vhodné pro velké série   | Nevhodné  |
| Ruční kladení                 | Nevhodné   | Vhodné pro velkoplošné díly   |
| Kladení pásů                  | Vysoká automatizace, malá lepivost, svařování                                  | Vysoká automatizace, dobrá lepivost, citlivé vytvrzování                |
| Teplota nástroje při lisování | Teplota taveniny 150 - 180 °C  | Reakční teplota 140 - 160 °C  |
| Lisovací tlak                 | GMT: 200 až 300 N/mm <sup>2</sup><br>D-LFT: 30 až 100 N/mm <sup>2</sup>        | SMC: 20 až 50 N/mm <sup>2</sup>   |
| Plocha povrchu                | Přiměřená, svařitelná  | Dobrá, tvrdá; lze ji lepit a natírat                                    |
| Mechanické chování            | Houževnaté, sklon ke krípu   | Dynamicky zatížitelné, křehký lom                                       |
| Chování za tepla              | Výrazné změknutí při T <sub>g</sub>  | Méně závislé na teplotě   |
| Stárnutí                      | Málo odolné až odolné  | Velmi odolné proti stárnutí   |
| Možnost opravy                | Omezená  | Dobrá   |



Dále se používají tyto typy matic:

- kompozity s keramickou maticí (ceramic matrix composites – CMCs)
- kompozity s kovovou maticí (Metal Matrix Composites – MMC)
- kompozity se skleněnou maticí [5, 6]

## 2 VÝROBA KOMPOZITŮ

Volba správné technologie, která se zvolí pro výrobu kompozitu, je velmi důležitá. Můžeme tak ovlivnit výsledné vlastnosti kompozitu jako jsou jeho mechanické vlastnosti, kvalita povrchu a celková cena výroby. Existuje značné množství technologií. Konkrétní technologie výroby se určuje zejména s ohledem na charakter konečného výrobku. [3]

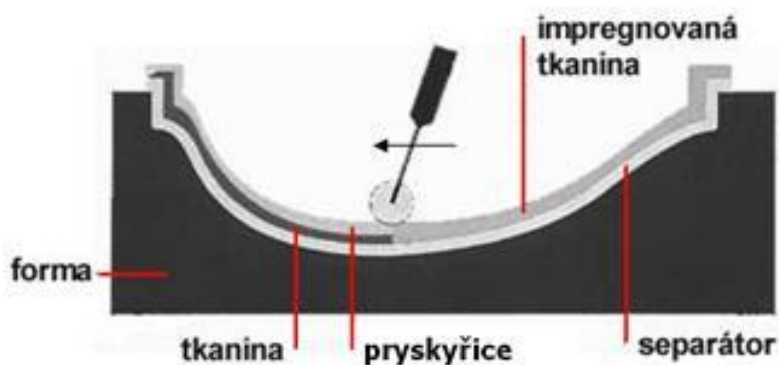
Zvolená technologie musí zohledňovat tyto podmínky:

- velikost výrobku
- členitost výrobku
- sériovost výroby
- kvalitou povrchu
- ekonomičnost výroby [21]

### 2.1 Ruční laminace

Principem je ruční nanášení pryskyřice a výztuže na upravený povrch formy separačním prostředkem. Výztuž se prosycuje pryskyřicí nejčastěji válečkem, štětcem nebo stěrkou. Často se používá i gelcoatová vrstva. Jedná se o vrstvu (0,3 – 1 mm), která zabezpečuje estetický povrch dílce a jeho ochranu proti okolnímu prostředí. Po jejím částečném vytvrzení se kladou jednotlivé vrstvy výztuže, které se prosycují pryskyřicí. Začíná se tak, že na vrstvu pryskyřice se položí výztuž, po níž následuje další vrstva pryskyřice. Touto pryskyřicí prosycujeme výztuž (například pomocí válečku). Požaduje se co nejdokonalejší prosycení, kvůli zamezení vzniku bublinek vzduchu. Ty snižují výslednou kvalitu výrobku. Další vrstvy pryskyřice a výztuže se nanášejí do požadované tloušťky výrobku. Pak následuje vytvrzení, které většinou probíhá při pokojové teplotě a atmosférickém tlaku. [1, 3, 20, 21]

Jako výztuž se většinou používají skleněná, uhlíková nebo aramidová vlákna ve formě tkanin nebo rohoží. Jako pojivo se používají polyesterové nebo epoxidové pryskyřice. Touto technologií se vyrábí hlavně malé série, různé prototypy či velkorozměrné díly (například rotorové listy větrné elektrárny). [1, 3, 20, 21]



Obr. 17. Princip ručního laminování [20]

Mezi výhody této technologie patří jednoduchost samotné výroby, malé náklady na výrobu formy a nástroje, možnost vyrábět velké výrobky a prototypy.

Výhody technologie ručního laminování:

- jednoduchost samotné výroby
- malé náklady na výrobu formy a nástroje
- možnost výroby různých tvarů
- výroba velkých výrobků
- výroba prototypů [1, 21]

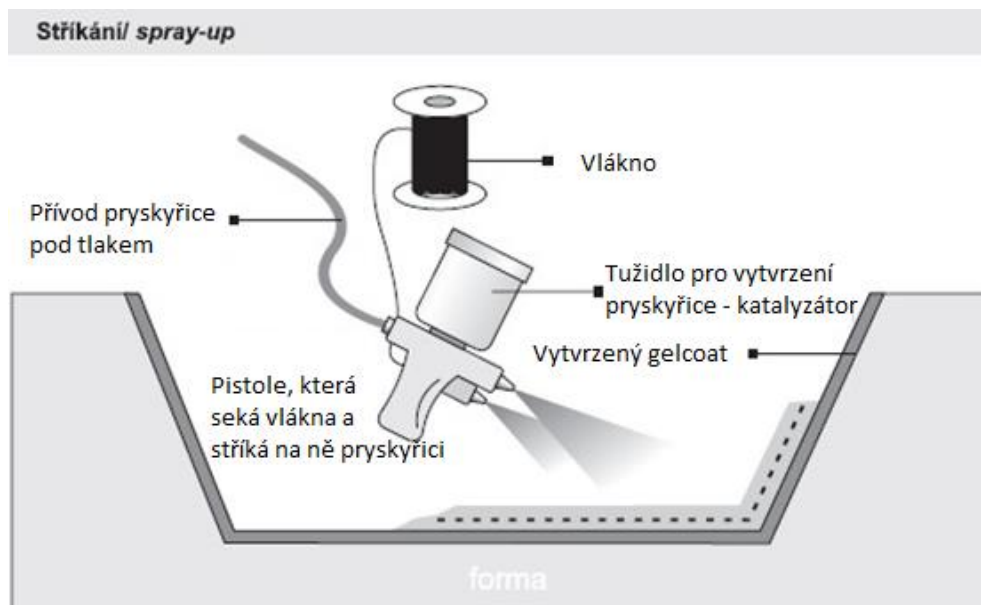
Nevýhody technologie ručního laminování:

- malá produktivita – vhodné jen pro malosériovou výrobu
- tvorba vzduchových bublin
- jen jeden kvalitní, hladký povrch
- výsledná kvalita výrobku je závislá zejména na schopnostech pracovníka [1, 21]

## 2.2 Nanášení sprejem

Jedná se o částečně mechanizovanou metodu ruční laminace. Principem je nanášení směsi pryskyřice a výztuže - nasekaných vláken na povrch formy. Nanášení je prováděno pomocí stříkací pistole, ve které se vlákna (nejčastěji skelný roving) nasekají na délku 20 – 50 mm.

Jako pojivo se používá většinou polyesterová pryskyřice. Tato metoda se používá například při výrobě lodí, zásobníků nebo van. [1, 21]



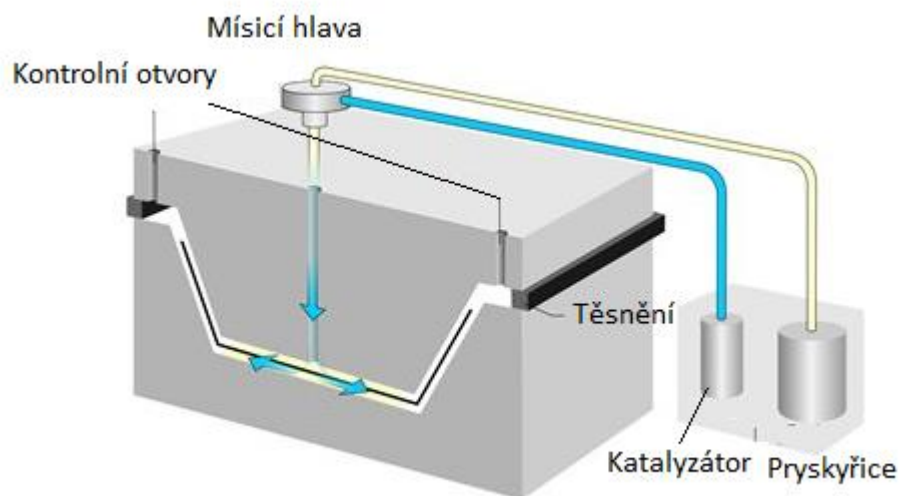
Obr. 18. Princip nanášení sprejem [21]

Mezi výhody patří možnost automatizace, neomezená velikost výrobků, dobrá produktivita a neomezená velikost výrobků. [1, 21]

Mezi nevýhody patří hlavně to, že krátká vlákna omezují vlastnosti konečného výrobku, dále potřeba kvalitní pracovní síly, obtížné dosahování přesných tolerancí a poměrně vysoká hmotnost výrobku v důsledku velkého množství pryskyřice. [1, 21]

### 2.3 Vysokotlaké vstřikování

Principem je dopravení ohřáté pryskyřice a tvrdidla pomocí čerpadel do mísící hlavy bezprostředně před vstříknutí směsi do formy (ocelové, hliníkové). Vstřikování trvá, dokud není výztuž (nejčastěji tkanina) plně prosycena, to nastane, když vstřikovaná směs začne vytékat z kontrolních otvorů. Po té se nechá výrobek ve formě vytvrdit při pokojové teplotě, nebo může být dutina temperována. Tato technologie je často označována zkratkou RTM - Resin Transfer Moulding. Jako výztuž se většinou používají skelné nebo uhlíkové tkaniny a rohože. Jako pojivo se používají nejčastěji polyesterové pryskyřice. Jedná se o rozšířenou technologii, vyrábí se tak např. díly pro automobilový a letecký průmysl. [1, 3, 21]



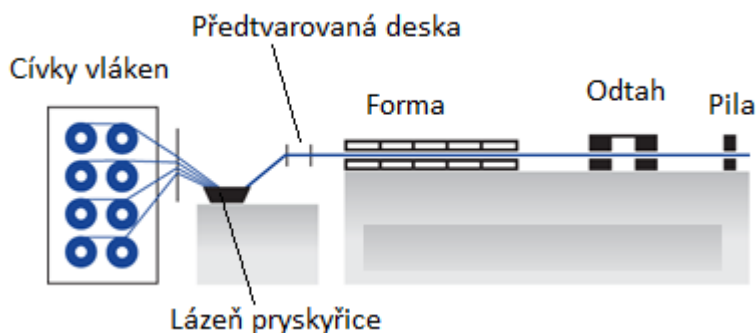
Obr. 19. Princip vysokotlakého vstřikování [22]

Mezi výhody patří poměrná jednoduchost technologie, přesnost, kvalitní povrch z obou stran, dobrá produktivita. [1, 21]

Hlavní nevýhodou je nemožnost vyrobit výrobky s negativním úhlem kvůli odformování. [1, 21]

## 2.4 Tažení (Pultruze)

Jedná se o kontinuální proces, kterým lze vyrábět různé plné či duté profily. Principem je tažení výztuže přes lázeň pryskyřice, po které následuje vyhřívaná forma, kde dojde k vytvarování žádaného profilu a vytvrzení. Profil se pak řeže na žádanou délku. Výztuží jsou většinou skelné nebo uhlíkové rovingy či pásy. Jako pojivo se používají nízkoviskózní polyesterové, vinylesterové nebo epoxidové pryskyřice. Vyrábí se tak například nosníky, výztuhy hokejek. [1, 3, 21]

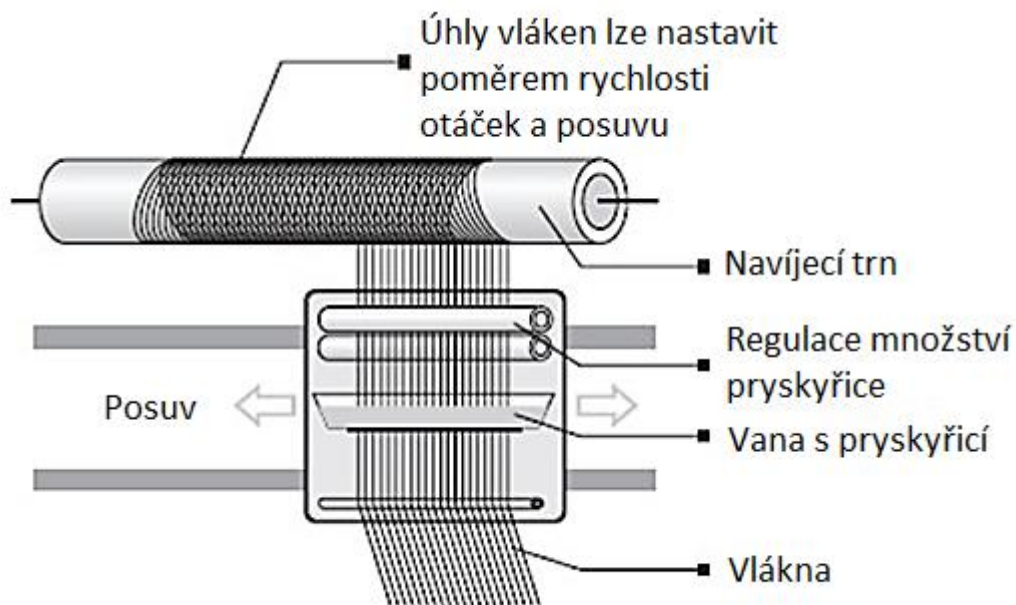


Obr. 20. Princip pultruze [23]

Výhodou je hlavně produktivita a automatizace výroby. Nevýhodou je zejména cena výrobního zařízení. [1, 21]

## 2.5 Navíjení

Principem je navinutí svazku vláken, která jsou prosycena pryskyřicí, na rotační jádro. Jádro je vyhříváno, aby došlo k vytvrzení. Samotné jádro může být součástí výrobku nebo je vyjímatelné. Jako výztuž se většinou používá skelná, aramidová nebo uhlíková vlákna. Pojivo je většinou polyesterová, vinylesterová nebo epoxidová pryskyřice. Vyrábí se tak například potrubí, zásobníky paliva, rybářské pruty. [1, 3, 21]



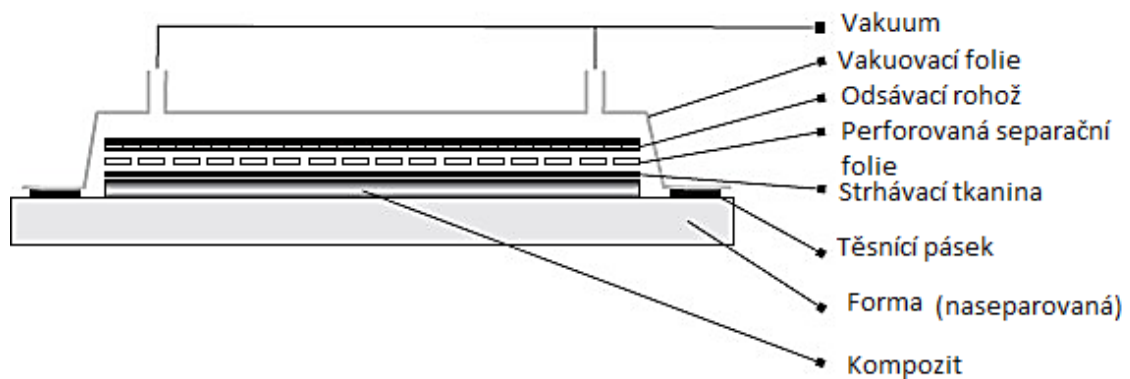
Obr. 21. Princip navíjení [21]

Mezi výhody patří rychlost a produktivita technologie, automatizace. Mezi nevýhody patří zejména výroba jen omezených tvarů výrobků a nekvalitní vnější povrch výrobku. [1, 3]

## 2.6 Lisování za pomoci vakua

Principem je umístění prosycené výztuže do formy obdobně jako u ruční laminace. Na poslední konstrukční vrstvu se umísťuje strhávací tkanina, která nám pomáhá při dalších operacích jako lepení, laminování a různé povrchové úpravy. Tu lze po vytvrzení lehce strhnout. Dále se klade separační vrstva a odsávací rohož (pohlcuje přebytečné pojivo). Nakonec se položí vakuovací folie, která se přilepí po obvodu formy kvůli zajištění vakua.

Dále se připojí vývěva a vytvoří se vakuum, čímž se vrstvy slisují. Vytvrzení probíhá nejčastěji při normální teplotě. Výztuž je nejčastěji skleněná a uhlíková tkaniny. Pojivo se bývá polyesterová nebo epoxidová pryskyřice. Vyrábí se tak například díly pro letecký a vojenský průmysl. [1, 21]

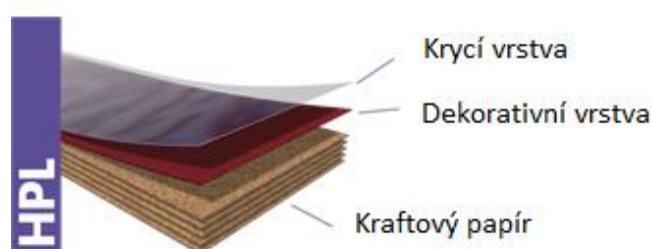


Obr. 22. Princip lisování vakuem [21]

Mezi výhody patří zejména vysoký podíl výztuže (zlepšení mechanických vlastností), použití i pro velké výrobky a oboustranně kvalitní povrch. Mezi nevýhody patří náročná a dlouhá doba přípravy výroby. [1, 21]

## 2.7 Výroba HPL laminátů

HPL (High Pressure Laminate) lamináty se vyrábí ve stacionárních lisech, kde se slisují jednotlivé vrstvy laminátu za vysokého tlaku (7 – 10 MPa) a teploty (cca 150 °C) po dobu přibližně 75 minut. Laminát se skládá z podkladu, dekorační vrstvy z papíru a ochranné krycí vrstvy. Jako podklad se používá speciální (kraftový) papír impregnovaný pryskyřicí. Tato vrstva zajišťuje mechanické vlastnosti výsledného laminátu. Běžné tloušťky HPL jsou 0,6 – 2 mm. Celkově se HPL lamináty vyznačují vysokou pevností, tvrdostí povrchu, vysokou odolností vůči teplotě, vlhkosti a mají poměrně příznivou cenu. [24, 25]



Obr. 23. Schéma HPL laminátu [26]

### 3 ŘEZÁNÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Obrábění kompozitních materiálů je kvůli jejich specifickým vlastnostem často obtížné. Nejčastější obráběné kompozity jsou s polymerní matricí a vyztužujícími vlákny, která jsou většinou uhlíková, skelná nebo aramidová. Výsledné mechanické vlastnosti jednotlivých kompozitů tedy mohou být velmi rozdílné, což je nutné brát v potaz při volbě rezného nástroje. Například uhlíkové kompozity jsou velmi abrazivní a je tedy nutné použít co nejvíce odolný nástrojový materiál. Naproti tomu kompozit vyztužený aramidovou tkaninou je měkký a lehce se poddá tlaku nástroje. Ten tedy musí mít hlavně správnou geometrii tvaru nástroje. Neřeže-li nástroj správně, může docházet k delaminaci materiálu či k poškození vláken. Nutné je brát ohled také na poměrně malou teplotní odolnost (cca 200 - 300 °C), pak může docházet k degradaci polymerní matrice. Stále více se pro obrábění kompozitních materiálů využívá tzv. nekonvenčních technologií, což jsou technologie založené na fyzikální a chemické povaze dějů při opracování materiálů. [27]

Jelikož se v praktické části budu zabývat řezáním vybraných kompozitních materiálů pomocí technologie laserového a vodního paprsku a následně jejich srovnání, bude se další popis týkat těchto technologií.

#### 3.1 Laser

Slovo „laser“ vzniklo z anglického „**L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation“, což v překladu znamená zesílení světla pomocí stimulované emise záření. Zesílení světla je způsobeno opakovanými průchody fotonů médii se specifickými vlastnostmi. Vzniká zvláštní druh světla, jež se v přírodě nevyskytuje. Světlo je monochromatické (jednobarevné) a je vyzářené ve formě úzkého směrového paprsku s malou rozbíhavostí. Tyto vlastnosti způsobují, že jej lze zaostřit na velmi malý průměr. [28, 29, 30]

Laser má dnes široké uplatnění, využívá se v průmyslu (řezání, vrtání, svařování, tepelné zpracování aj.) vědě, výzkumu a v mnoha zařízeních běžné domácnosti moderní společnosti. [28]

##### 3.1.1 Princip laseru

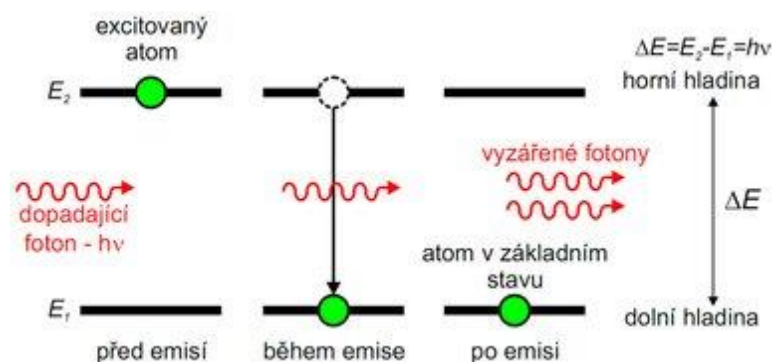
Součásti laseru můžeme rozdělit na budící zařízení, aktivní prostředí, rezonátor a příslušenství. [28]



Budící zařízení dodává energii aktivnímu prostředí, tzn., že je buzeno (opticky, elektricky, radiofrekvenčně) a zajišťuje přebytek částic ve vyšším energetickém stavu (vybuzení atomů aktivního prostředí ze základní energetické hladiny  $E_1$  do vyšší energetické hladiny  $E_2$ ). [28, 29, 31]

Při opětovném přechodu atomu z vyšší na nižší energetickou hladinu dojde k vyzáření fotonů (kvantum elektromagnetického záření). Tento přechod se děje samovolně, prostředí má snahu být vždy ve stavu s co nejnižší energií. Pomocí buzení tento stav porušíme a aktivní prostředí převedeme do excitovaného stavu (většina elementů je ve stavu s vyšší energií) a vzniká tak inverze populace. [28, 29, 31]

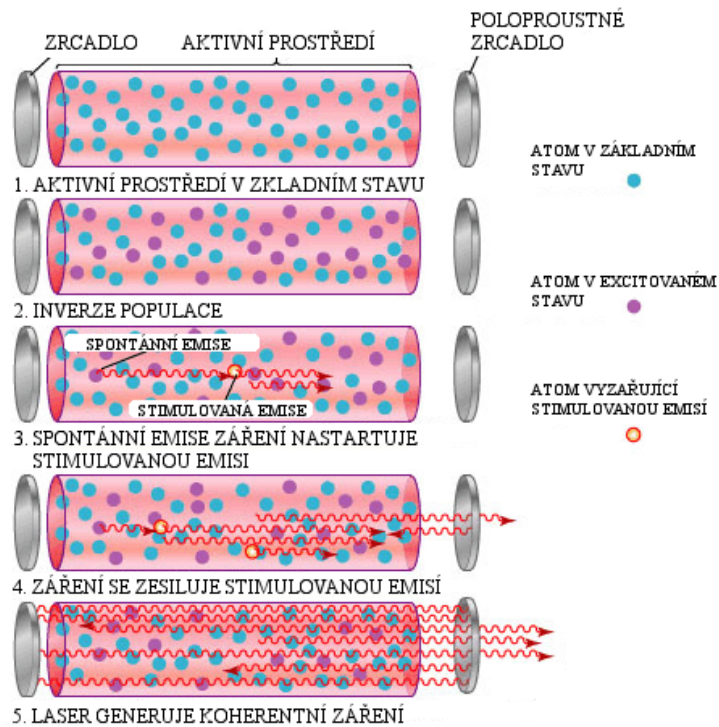
Vyzářený foton dopadne na excitovaný atom, což způsobí jeho přechod z vyšší do základní energetické hladiny, přičemž dojde k emisi dalšího fotonu. Tím vzniká proces stimulované emise. Kvůli dosažení vyššího počtu stimulovaných přechodů se musí použít rezonátor. [28, 29, 31]



Obr. 24. Stimulovaná emise (22)

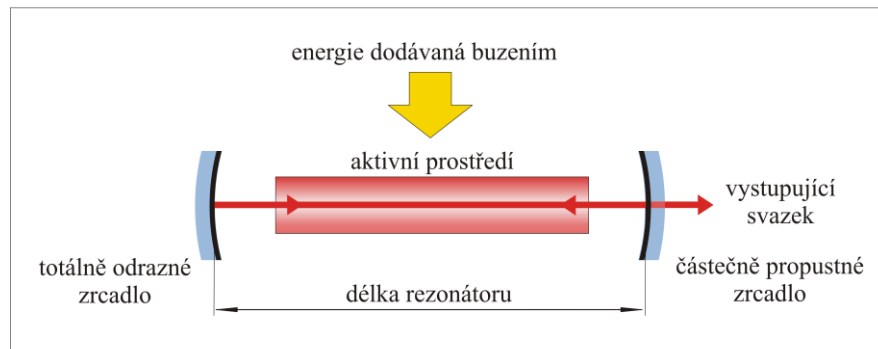
Aktivní prostředí se nachází v rezonátoru. Jedná se o látku, ve které se částice dají vybudit na požadovanou pracovní hladinu. Může se jednat o plyn, pevnou látku, polovodič nebo kapalinu. Záření, které vychází z aktivního prostředí, se odráží od zrcadla zpátky do aktivního prostředí, což dále podporuje stimulovanou emisi. Tím se laserové záření zesiluje a po dosažení žádané intenzity paprsek světla opouští rezonátor polopropustným zrcadlem. [28, 29]

Rezonátor je součást, která je tvořena dvěma zrcadly, přičemž jedno je odrazné a druhé polopropustné. Fotony putují od jednoho zrcadla k druhému, jejich počet výrazně roste a dochází k uvolnění energie v podobě svazku (proud fotonů). [28, 29]



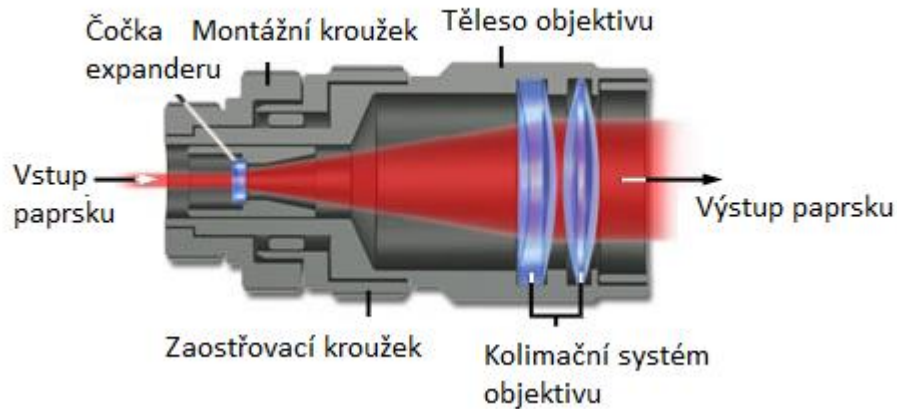
Obr. 25. Princip laseru [31]

Mezi příslušenství řadíme chladicí zařízení, řídicí počítač, kalibrace zařízení. [28]



Obr. 26. Součásti laseru [28]

U průmyslových laserů je vystupující svazek z rezonátoru potřeba dále upravit pomocí expanderu, což je systém čoček a clon. Tím se dosáhne zvýšení kvality výstupního svazku a upravení jeho průměru. Při průchodu svazku expanderem vznikají velké energetické ztráty, což snižuje výslednou účinnost laserového zařízení. V mnoha aplikacích je však kvalita svazku upřednostňována oproti jeho výkonu. [28]



Obr. 27. Expander laseru [32]

Tento svazek je dále veden soustavou čoček a zrcadel do laserové hlavy, ze které svazek dopadá na požadované místo. [28]

### 3.1.2 Dělení laserů

Lasery lze dělit z hlediska typu aktivního prostředí, vlnové délky, pracovního režimu, výkonu a dalších parametrů. Lasery běžně používané v průmyslu jsou popsány na následujícím obrázku.

| Laser           | Vlnová délka (nm) | Buzení | Efek. <sup>a</sup> | Režim <sup>b</sup> | Výkon / Energie | Typické aplikace <sup>c</sup> | Údržba | Život. (h) |
|-----------------|-------------------|--------|--------------------|--------------------|-----------------|-------------------------------|--------|------------|
| Nd:YAG          | 1064              | LD     | ~7%                | CW                 | až 6kW          | Ř,S                           | ano    | ~10 000    |
|                 |                   | lampy  | ~3%                | pulsní*            | ~ mJ@ns (~100W) | Z,G                           |        | ~1000      |
| CO <sub>2</sub> | 10 600            | RF     | ~10%               | CW / pulsní        | 10-250W         | Z,G, Ř nk.                    | ano    | ~20 000    |
|                 |                   |        |                    |                    | až 5kW (Slab)   | Ř,S                           |        |            |
|                 |                   | El.    | ~25%               | až 20kW (průtočné) | Ř,S             | --                            |        |            |
| Diskový         | 1070              | LD     | ~15%               | CW                 | až 16 kW        | Ř,S                           | ano    | ~10 000    |
| Vláknový        | 1070              | LD     | ~30%               | CW                 | až 80 kW        | Ř,S                           | ne     | ~100 000   |
|                 |                   |        |                    | QCW                | ~ J@ms (~1,2kW) | Z,G,M                         |        |            |
|                 |                   |        |                    | Pulsní             | ~ mJ@ns (~100W) | Z,G,M                         |        |            |
| Diodový         | 808-980           | El.    | ~60%               | CW                 | až 10kW         | S,K,N                         | ne     | ~15 000    |

Základní přehled průmyslových laserů.

<sup>a</sup> Efektivita (účinnost) přeměny elektrické energie na světelnou (optickou)

<sup>b</sup> U pulsních laserů se udává energie v pulsu a doba pulsu, případně střední výkon (v závorce). CW - kontinuální, QCW - kvazi kontinuální.

<sup>c</sup> Ř – řezání, S - svařování, Z – značení, G – gravírování, K – kalení, N – nanášení vrstev, M - mikro-oblábění, nk – nekovů.

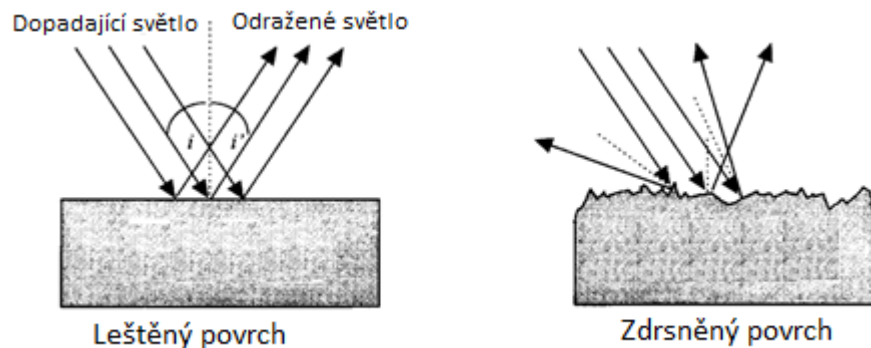
Buzení: LD - laserové diody, RF - radio frekvenčně, El. - elektricky (výboj, proud).

Obr. 28. Základní průmyslové lasery [33]

### 3.1.3 Interakce materiálu s laserovým paprskem

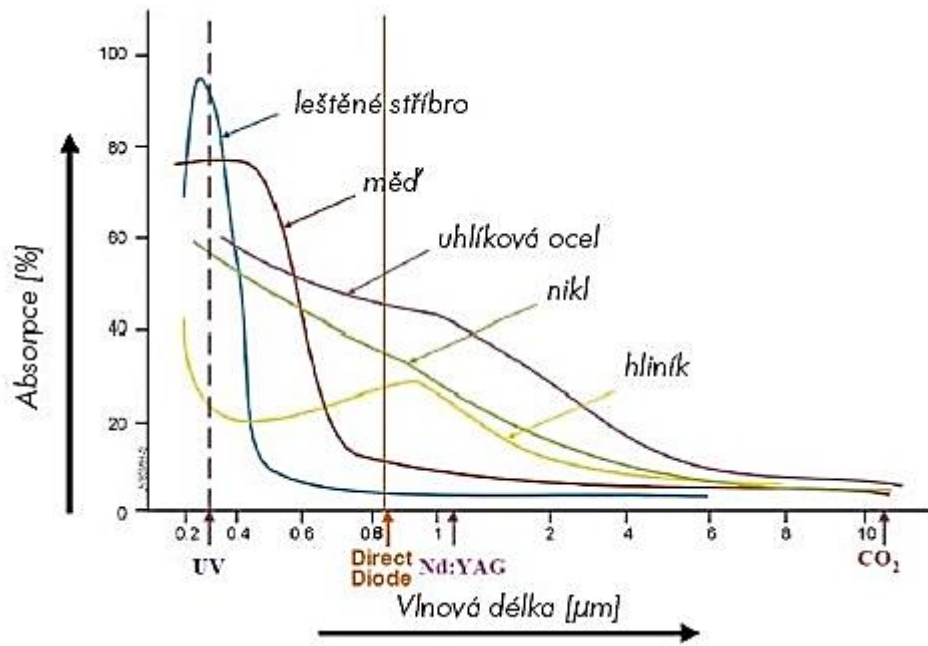
Volba laseru závisí na obráběném materiálu. Materiál má tyto vlastnosti, které ovlivňují interakci materiálu s laserem:

- koeficient odrazu pro danou vlnovou délku
- koeficient absorpce pro danou vlnovou délku
- drsnost povrchu (drsnější povrch u stejného materiálu absorbuje více energie – větší plocha a různé interakce v důsledku odrazů od povrchu)
- tepelnou vodivost
- tepelnou kapacitu [29, 34]



Obr. 29. Vliv jakosti povrchu na odrazivost [34]

Všeobecně se dá říct, že odrazivost kovů se zvyšující se vlnovou délkou roste. Při interakci povrchu kovu  $\text{CO}_2$  laserem je odrazivost při pokojové teplotě velmi vysoká. Se zvyšováním teploty povrchu ale klesá a při dosahuje minimální hodnotu při teplotě tavení kovu. Graf absorpce často obráběných materiálů je na následujícím obrázku. [29, 36]



Obr. 30. Graf absorpce materiálu v závislosti na vlnové délce [35]

Při ozáření povrchu kovů CO<sub>2</sub> laserem je při pokojové teplotě odrazivost paprsku velmi vysoká. Se zvyšující se teplotou povrchu odrazivost klesá až na minimální hodnotu při teplotě tavení kovů. [29]

Pro řezání dřeva, plastů, skla, papíru se používá CO<sub>2</sub> laser. U těchto materiálů není vlnová délka okolo 1 μm téměř pohlcována. [36]

| KOVOVÉ MATERIÁLY           | PLASTY         | PŘÍRODNÍ A UMĚLÉ MATERIÁLY  |
|----------------------------|----------------|-----------------------------|
| Železné kovy (1, 2)        | PA (1, 3)      | Krystal (1)                 |
| Nástrojové oceli (1, 2)    | PMMA (1, 3)    | Keramika (1, 2, 3)          |
| Legované oceli (1, 2)      | PE (1, 3)      | Dřevo (1)                   |
| Korozivzdorné oceli (1, 2) | PVC (1, 3)     | Grafit (1)                  |
| Čisté železo (1, 2)        | PS (1, 3)      | Textil (1)                  |
| Zinek (1, 2)               | PU (1, 3)      | Kompozitní materiály (2, 3) |
| Kadmium (1, 2)             | Sklotextil (1) | Překližka (1, 2)            |
| Hliník (1, 2)              | Silikon (1, 3) | Dřevotřísková (1)           |
| Měď (2)                    |                |                             |
| Mosaz (1, 2)               |                |                             |
| Bronz (1, 2)               |                |                             |
| Spékané karbidy (2)        |                |                             |

1 - CO<sub>2</sub> laser, 2 - Nd-YAG laser, 3 - Excimerový laser

Obr. 31. Doporučený výběr laseru pro určitý materiál [29]

### 3.1.4 Princip řezání laserem

Laserové řezání patří mezi nejčastější využití laserové technologie. První laserový systém na řezání ocelových plechů byl uveden v roce 1967 ve Velké Británii. Poté následovaly systémy pro řezání nekovových materiálů. [29, 35]

Při řezání laserem se vykytují tyto procesy:

- sublimační řezání
- tavné řezání
- řezání plamenem
- chemická degradace

V praxi většinou dochází ke kombinaci některých z těchto procesů. [35]

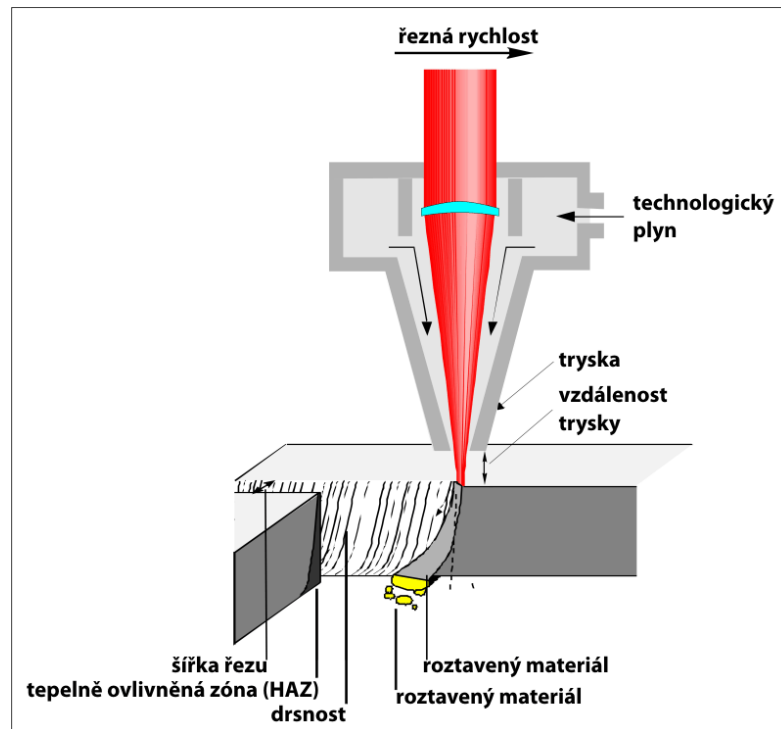
U sublimačního řezání je materiál v místě řezu odpařován. K tomu je nutná vysoká intenzita laserového paprsku. Vytvořené páry jsou odfukovány z řezu pomocným plynem (většinou dusík nebo argon). Samotný řez je kvalitní, hladký a bez otřepů protože skoro nedochází k tavení materiálu. Tato metoda je používána hlavně pro netavitelné materiály jako dřevo, uhlík. Pro řezání kovů je tato metoda zbytečně energeticky náročná. [28, 29, 35]

U tavného řezání je potřeba menší výkon než u sublimačního - u stejné tloušťky asi 1/10 výkonu. Dochází jen k tavení materiálu, který je z řezu vyfukován inertním (nepodléhá chemické reakci) plynem. [28, 35]

U řezání plamenem se používá asistenční plyn kyslík. Materiál je zahřátý na vyšší než zápalnou teplotu, díky čemuž dojde k exotermické reakci. Ta dodává energii samotnému procesu řezání. Kvalita řezu je horší než u sublimačního a tavného řezání, ale rezná rychlost je asi 2x vyšší. [35]

Chemická degradace (vyskytuje se u nekovových materiálů) vzniká vlivem vysoké teploty a nestejnorodosti složení materiálu. Laserový paprsek láme chemické vazby a integritu materiálu (typické pro dřevo, některé kompozitní materiály a některé plasty). Při řezání kompozitů je vhodné volit laser s ohledem na použitá vlákna, ne matrice. Teploty potřebné k odpaření vláken jsou velmi vysoké, 3300 °C pro uhlíková vlákna, 950 °C pro aramidová vlákna a 2300 °C pro E-skelná vlákna. Výkon potřebný pro řezání vláken chemicky degraduje hlavně polymerní matrici. Vliv vysoké teploty na materiál u laserového řezání ale může způsobit problém zejména u dobře tepelně vodivých vláken. U zóny řezu se může

vyskytnout tepelně ovlivněný či poškozený okraj. U kompozitních materiálů, u nichž se tyto problémy nevyskytují, je řezání laserem stále rozšířenější. [29, 41]



Obr. 32. Princip řezání laserem [37]

Mezi výhody řezání laserem patří malá řezná mezera, žádné opotřebení nástroje, vysoká přesnost, možnost řezání složitých tvarů. [29]

Mezi nevýhody patří zejména vysoké pořizovací náklady na zařízení, tepelné ovlivnění materiálu v místě řezu, malá účinnost zařízení. [29]

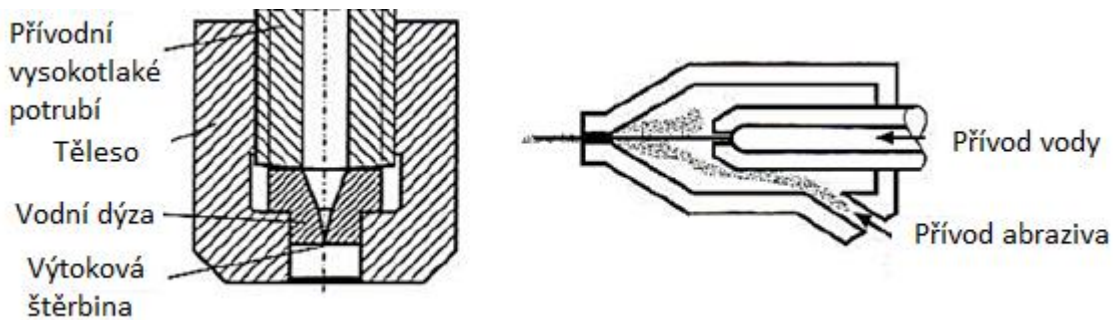
### 3.2 Vodní paprsek

Dělení a řezání materiálů pomocí technologie vodního paprsku se stabilně používá od roku 1970. Ze začátku se používal hlavně pro dělení dřeva a plastů. Nyní se používá pro řezání, soustružení, frézování, vrtání, řezání závitů zejména u těžkoobrobitelných materiálů. [29, 30]

Principem je využití úzkého, vysokotlakého (kolem 350 MPa) a vysokorychlostního (600 – 900 m/s) proudu vody jako řezného nástroje. Pro zvýšení účinnosti řezání se přidává jemné

brusivo, díky čemuž je možné tuto technologii použít i pro další materiály. Dle použitého pracovního média rozlišujeme dvě základní metody:

- WJM (Water Jet Mechanig): obrábění čistým vodním paprskem, používá se hlavně pro nekovové materiály – plasty, dřevo, potraviny
  - AWJM (Abrasive Waterjet Machining): obrábění vodním paprskem s přísadou jemného brusiva, používá se pro tvrdé a velmi tvrdé materiály – keramika, titan.
- [29, 30]

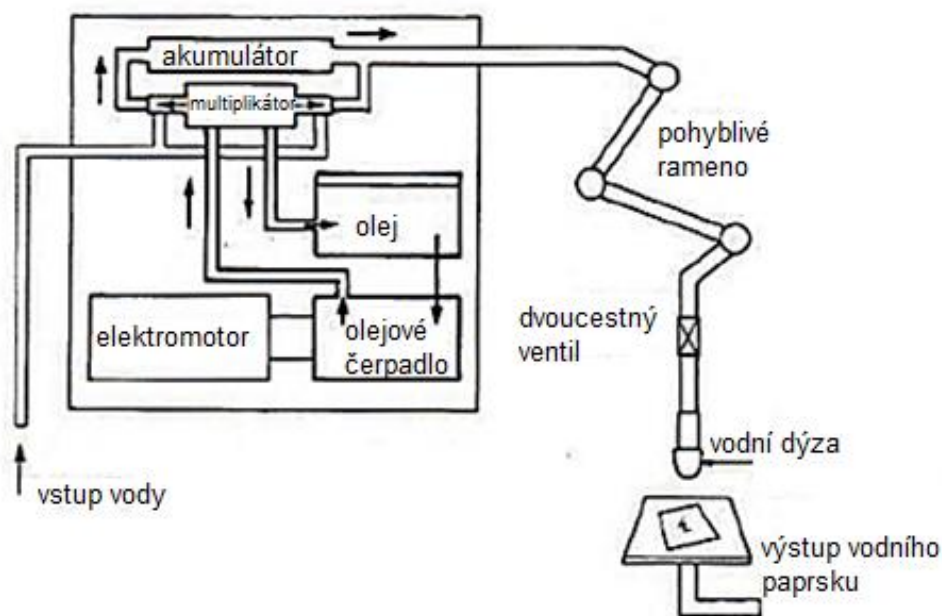


Obr. 33. Schéma dýzy pro WJM (vlevo) a pro AWJM (vpravo) [29]

Hlavní prvky zařízení vodního paprsku jsou:

- hydraulická jednotka: pomocí hydraulických pump vytvoří vysoký tlak vodního paprsku
- multiplikátor: součást hydraulické jednotky, zvyšuje tlak vody na 380 MPa
- akumulátor: tlumí rázy v kapalině, které způsobuje pulzace paprsku
- filtry: filtrují kapalinu a odstraňují nečistoty, čímž chrání štěrbinu dýzy před poškozením
- dýza: nejdůležitější část, ovlivňuje kvalitu řezu, výtokový otvor má průměr od 0,075 mm
- další nutné části jsou potrubí, dvoucestný ventil a nádoba na zachytávání vody [29]



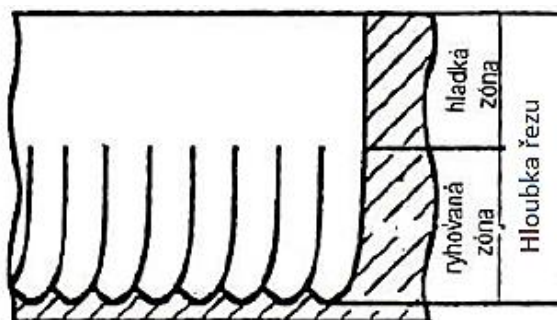


Obr. 34. Hlavní prvky zařízení vodního paprsku [29]

### 3.2.1 Princip řezání vodním paprskem

Principem je odebrání materiálu účinkem mechanického dopadu úzkého proudu vody na jednotku plochy. Jedná se o vysokorychlostní erozivní proces, kde abrazivní rezné médium je usměrněné do úzkého paprsku. Proud vody proniká do obrobku, kde postupně ztrácí kinetickou energii a vychyluje se – vznikají dvě zóny:

- relativně hladká zóna: je v horní části řezu, materiál je řezaný nebo mikrořezaný – vzniká tzv. mikrorytí, částice naráží na materiál a vyrývá v něm trajektorii
- rýhovaná zóna: vzniká důsledkem deformačního opotřebení, materiál je nejdříve zpevněn nárazem částice a další jej vyštípne (vylomí) a následuje úběr materiálu vyplavením – eroze [29]



Obr. 35. Povrch po řezání AWJM [29]

V praxi se používají nejčastěji systémy pulzujícího, kontinuálního a kavitačního paprsku. Úběr materiálu ovlivňují zejména tyto parametry: tlak vody, rychlost proudění a velikost výtokového otvoru dýzy, vzdálenost dýzy a obrobku, druh a velikost brusiva pokud se používá. [29]

Mezi výhody této technologie patří zejména to, že řez probíhá bez tepelného působení, takže materiál nevykazuje fyzikální ani chemické změny, možnost řezat téměř všechny konstrukční materiály technologií AWJM, energetická účinnost až 80 %, vysoká rychlost a přesnost řezu, bezprašnost. Pro řezání kompozitních materiálů je to velmi rozšířená technologie. [29]

Mezi nevýhody patří zejména kontakt obráběného materiálu s vodou (většinou i s abrazivním materiálem), což bez okamžitého ošetření znamená rychlý nástup povrchové koroze, u nasákavých materiálů delší vysoušení, možnost změny barvy, apod. Dále dochází při řezání tlustších materiálů k méně kvalitnímu řezu u spodní hrany a vzniku úkosu. Při řezání kompozitů může nastat problém s delaminací. Výsledný povrch řezu závisí na vlastnostech vyztužujících vláken. Dále nesmí být přehlížena možnost absorpce vody. [29, 41]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 4 CÍL PRÁCE

Cílem diplomové práce je porovnání technologií řezání u vybraných kompozitních materiálů. Vybrané materiály jsou aramidový a uhlíkový kompozit a HPL laminát. Z těchto materiálů se vyřezaly vzorky pomocí laserového a vodního paprsku. Na vzorcích byla zkoumána a následně vyhodnocena struktura a vzhled řezu, jeho drsnost, šířka řezné meze-ry a ovlivnění mechanických vlastností

Cíle diplomové práce:

1. Vypracujte studii na dané téma.
2. Vytvořte vzorky z různých materiálů pro experiment.
3. Proveďte experiment.
4. Proveďte vyhodnocení experimentu.

## 5 POPIS VYBRANÝCH KOMPOZITŮ

Vybrané materiály jsou aramidový a uhlíkový kompozit a HPL laminát. Na výrobu uhlíkového a aramidového kompozitu byly použity následující tkaniny:

Specifikace aramidové tkaniny:

- vazba: kepr 2/2
- hmotnost: 173 g/m<sup>2</sup>
- vlákno (v osnově i útku stejné): aramid 121 tex, typ 2200

Specifikace uhlíkové tkaniny:

- vazba: plátňová
- hmotnost: 200 g/m<sup>2</sup>
- vlákno (v osnově i útku stejné): Toray 3K 200 tex

Tex značí jemnost vlákna, konkrétně udává hmotnost 1 km vlákna v gramech [g/km].

HPL laminát a uhlíkový kompozit již byly dodány hotové. Uhlíkový kompozit byl vyroben metodou lisování za pomoci vakua z výše uvedené tkaniny a pro prosycení byla použita epoxidová pryskyřice L 285.

Aramidový kompozit jsem vyráběl metodou ruční laminace. Oproti metodě lisování pomocí vakua se jedná o rychlou a ekonomickou metodu, ovšem výsledné vlastnosti kompozitu závisí hlavně na zkušenostech.

## 5.1 Výroba aramidového kompozitu

Nejprve bylo zapotřebí připravit formu, tzn. opatřit povrch vyčištěné formy vrstvou separačního vosku (Oskar's M700/C).



*Obr. 36. Separací vosk*

Vosk se nanese na povrch formy a následně rozleští (vytvoří se film). Tato vrstva usnadňuje odformování vytvrzeného kompozitu z formy.



*Obr. 37. Povrch formy opatřený separacím voskem*

Poté bylo zapotřebí nastříhat samotnou tkaninu na přibližně stejně velké kusy. Co se týče samotného stříhání, tak aramidová tkanina se stříhá poměrně obtížně. Je velmi poddajná a bylo zapotřebí použít speciální nůžky. Tyto nastříhané kusy se následně pomocí válečku prosycovaly epoxidovou pryskyřicí a kladly na sebe do připravené formy. Celkově bylo použito 6 vrstev aramidové tkaniny.



*Obr. 38. Ustřížený kus aramidové tkaniny*

K prosycení byla použita epoxidová pryskyřice L 285 smíchaná s tužidlem 285 od firmy MGS. Míchací poměr je 100 : 40 (hmotnostně) nebo 100 : 50 (objemově) a doba zpracovatelnosti je přibližně 30 minut. Tato pryskyřice se používá například pro výrobu kluzáků, lodí a sportovního náradí. Vyznačuje se skvělou fyziologickou kompatibilitou s prosycovanými materiály, dobrými mechanickými vlastnostmi. Viskozita namíchané směsi zaručuje dobré prosycení vláken. Teplotní odolnost výrobků vyrobených bez tepelného vytvrzení je od -60 °C do +50 °C. Kompletní specifikace pryskyřice a tužidla je v příloze (Příloha P VI). [38, 39]

Kolik pryskyřice přesně použít není nikde předepsáno, ale z praxe je ověřeno, že pryskyřice má být hmotnostně stejně jako tkaniny, plus cca 40 g na ztráty (vsáknutí pojiva válečkem). Po namíchání směsi pryskyřice s tužidlem proběhlo samotné ruční laminování, při teplotě 21 °C. První vrstva pryskyřice se nanasla válečkem na připravený povrch formy. Na tuto vrstvu se položila první vrstva tkaniny, na kterou se nanasla další vrstva pryskyřice a

pomocí válečku se tkanina dokonale prosytila. U dalších kladených vrstev se opakuje stejný postup a po dokončení se kompozit nechal vytvrdit. Po 2 dnech se kompozit odformoval.



*Obr. 39. Ruční laminování aramidové tkaniny*

Rozměry vyrobené aramidové desky byly 70 x 37 cm a uhlíkové desky 50 x 25 cm. HPL laminát byl v rozměru 34 x 30 cm (3 kusy).

Tloušťka aramidového kompozitu je cca 2,1 mm, uhlíkového kompozitu cca 1,5 mm a HPL laminát má tloušťku 0,8 mm.

Z těchto desek byly následně vyřezány zkušební vzorky.



## 6 ŘEZÁNÍ VZORKŮ Z KOMPOZITŮ

Řezání připravených materiálů bylo provedeno na laseru a vodním paprsku. Nařezány byly vzorky o rozměrech 150 x 20 mm.

Řezání laserem probíhalo na CO<sub>2</sub> laseru od firmy Rofin-Sinar (USA), přesné označení: Rofin DC025. Tento laser má radiofrekvenční buzení, max. výkon 2500 W a vlnovou délku 10,6 μm.

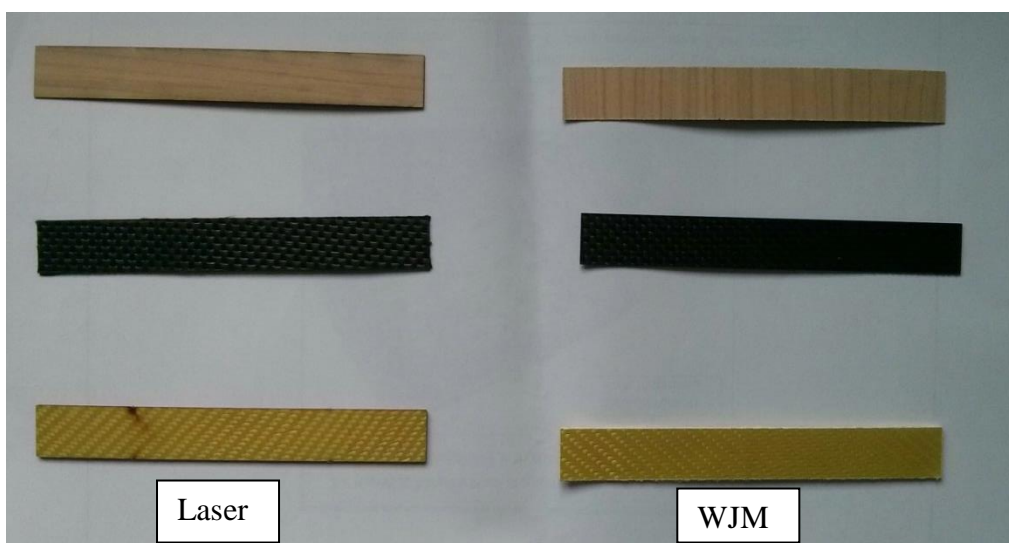
Řezné podmínky byly stejné pro všechny 3 materiály:

- výkon: 60% (1500 W)
- řezná rychlost: 2 m/min
- kontinuální režim

Řezání vodním paprskem (WJM) probíhalo na stroji od firmy Elcede (SRN). Tato firma stroj „jen sestaví“ z nakoupených komponent. Nejdůležitějším komponentem stroje je pumpa. Ta je od firmy Jet Cut Power (Ch), přesné označení: JCP 7.5 LC.02.20 (rok výroby 2011). Její výkon je 7,5 kW, pracuje v rozsahu tlaku 500 – 3800 bar (50 – 380 MPa) a disponuje max. přepraveným objemem 1 l/min.

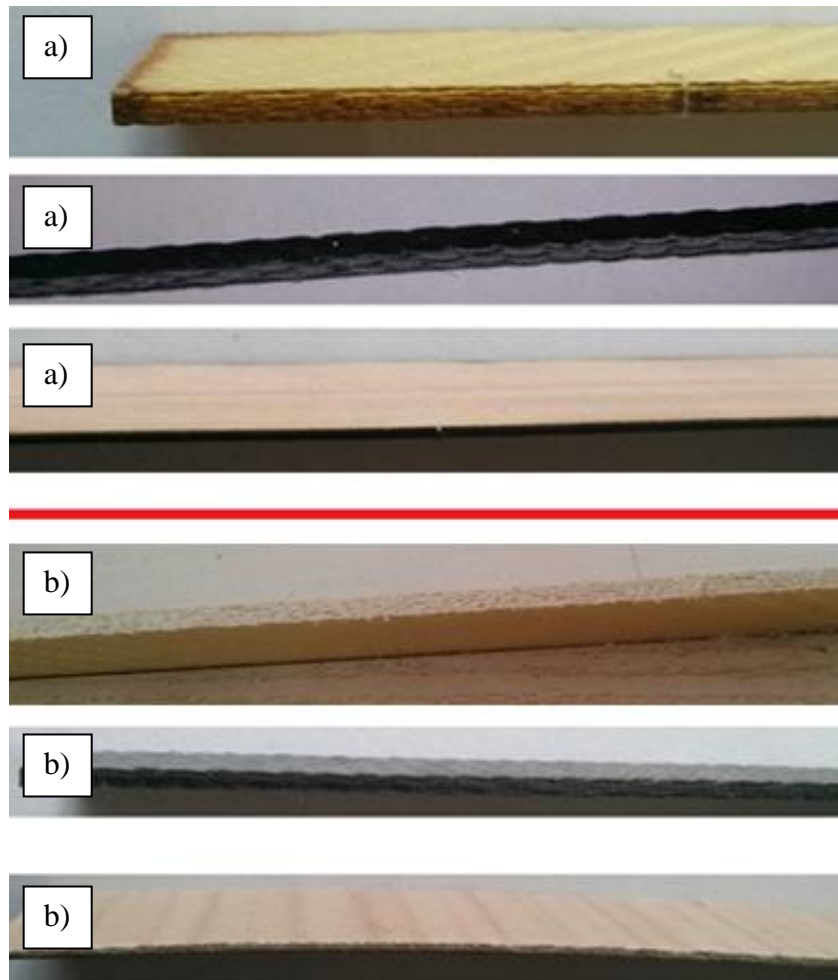
Řezné podmínky byly stejné pro všechny 3 materiály:

- čistý vodní paprsek bez abraziva
- výkon: 3200 bar (320 MPa)
- řezná rychlost: 0,9 m/min
- průměr vodní dýzy: 0,12 mm



Obr. 40. Ukázka vyřezaných vzorků – vlevo laserem, vpravo vodním paprskem

Na následujícím obrázku je vyfocen vzhled řezu u jednotlivých kompozitů - nahoře řez laserem (a), dole vodní paprskem (b).



*Obr. 41. Vzhled řezu kompozitů*

Pro porovnání je na *Obr. 42.* vyfocen řez aramidového (a) a hybridního (b) kompozitu (uhlík + aramid) na strojní kotoučové pile.



*Obr. 42. Řez kompozitu kotoučovou pilou*

## 7 VIZUÁLNÍ ZKOUMÁNÍ ŘEZU

Na vzorcích byla zkoumána struktura a vzhled řezu. Pozorování probíhalo na mikroskopu Carl Zeiss Jena - 11261 (SRN), digitalizovaným okulárovou kamerou Dino-Eye AM423B. Zvětšení bylo 15násobné. Před pozorováním bylo nutné vzorek osvětlit a zaostřit. Poté pomocí PC a softwaru DinoCapture byly pořízeny snímky vzorků.



Obr. 43. Zkoumání řezu mikroskopem

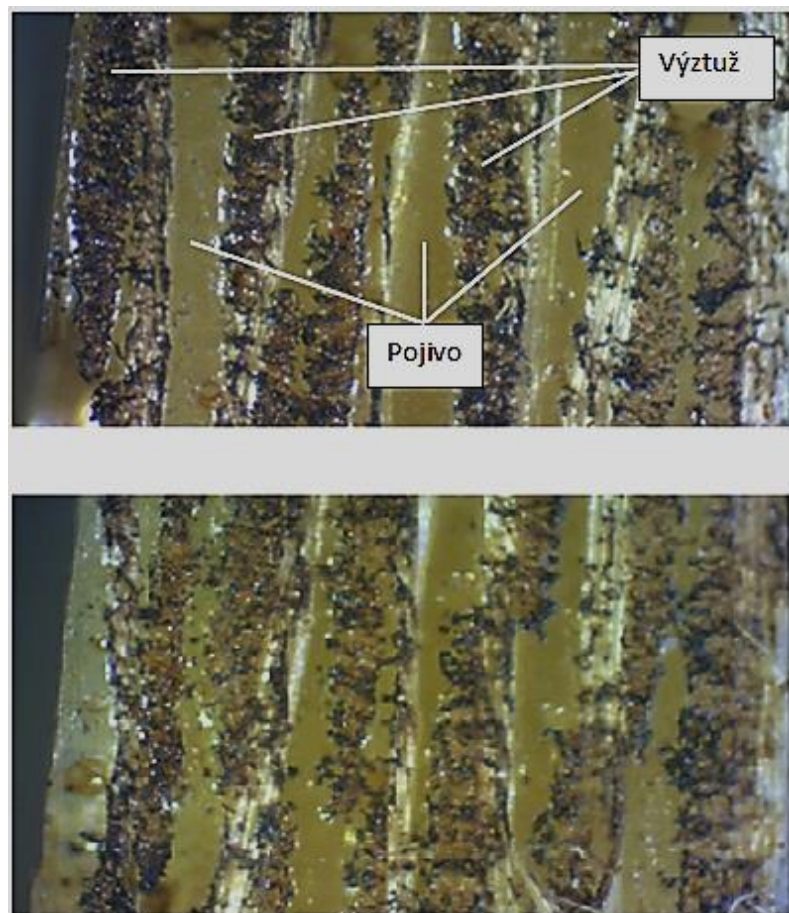
Tab. 4. Specifikace okuláru AM423B

|                             |  |
|-----------------------------|--|
| Model                       | AM423B Dino-Eye (USB)                        |
| Rozhraní                    | USB 2.0                                      |
| Rozlišení                   | 1.3 Megapixels (SXGA)                        |
| Snímková frekvence          | Až 30 fps                                    |
| Funkce měření               | Ano  |
| Podporovaný operační systém | Windows 7, Vista, XP a MAC OS 10.4 a novější |

První obrázky v následujících kapitolách (7.1 – 7.6) zobrazují různá místa řezu na vzorcích. Na dalších obrázcích, kde je horní a spodní hrana/strana vzorku je nahoře vždy horní strana/hrana vzorku.

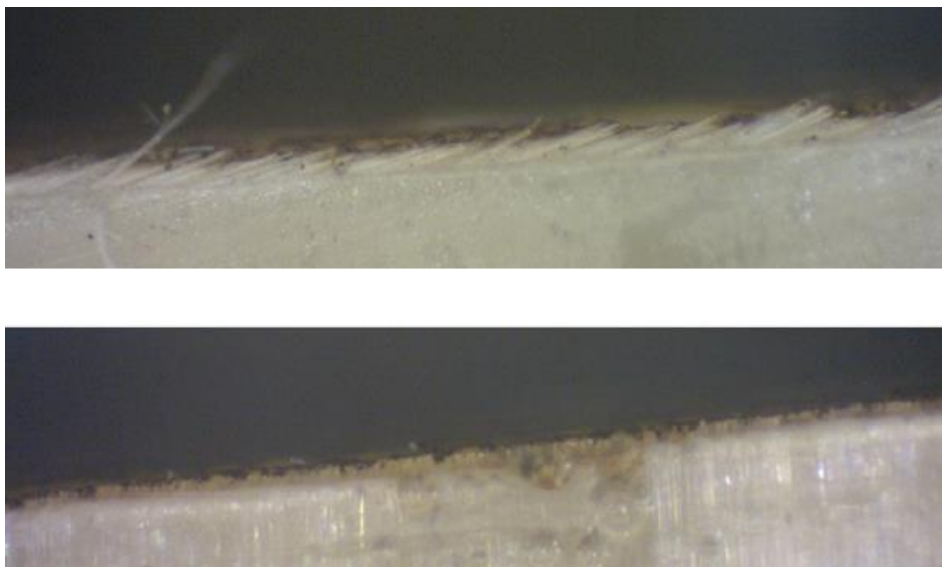
## 7.1 Aramidový kompozit řezaný laserem

Dle *Obr. 44.* lze vidět, že vrstvy výztuže (aramidová tkanina) jsou od řezu lehce opálené, zatímco na pojivu (epoxidová pryskyřice) řez nezanechává vizuální ovlivnění. Pojivo vypadá po řezu velmi hladce, zatímco na výztuži vidíme členitý povrch – různě zdegradovaná aramidová vlákna po působení laseru. Orientace vláken se špatně hledá, příčná i podélná vypadají po řezu stejně. Celkově vypadá řez po celé šířce stejně.



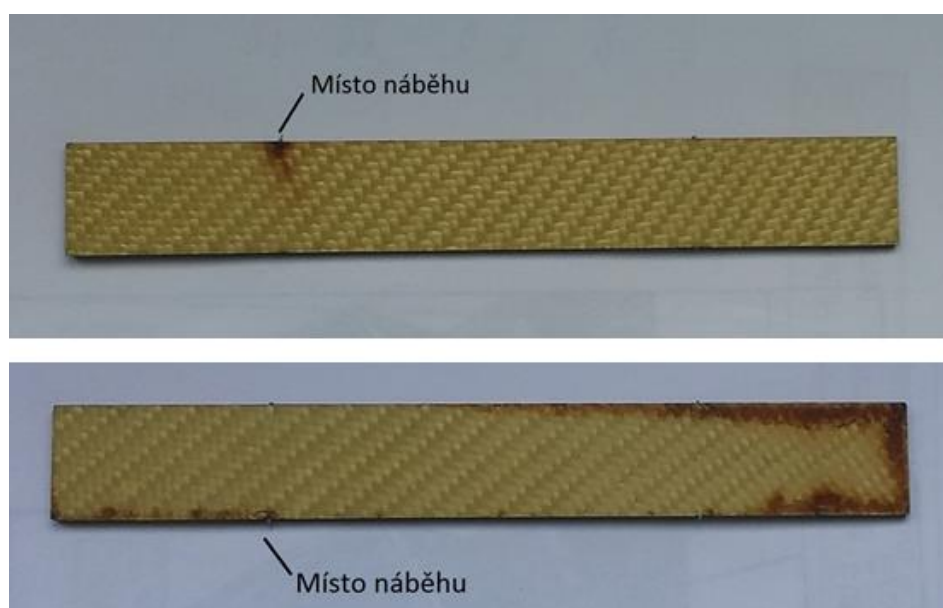
*Obr. 44. Aramidový kompozit řezaný laserem*

Na *Obr. 45.* lze vidět horní a spodní hranu vzorku. Spodní hrana se vyznačuje hladším řezem, zatímco na horní hraně jsou vidět roztřepená vlákna. To je zřejmě způsobeno vypáleným pojivem, jelikož na horní straně kompozitu je menší vrstva pojiva než na spodní.



*Obr. 45. Horní a spodní hrana aramidového kompozitu řezaného laserem*

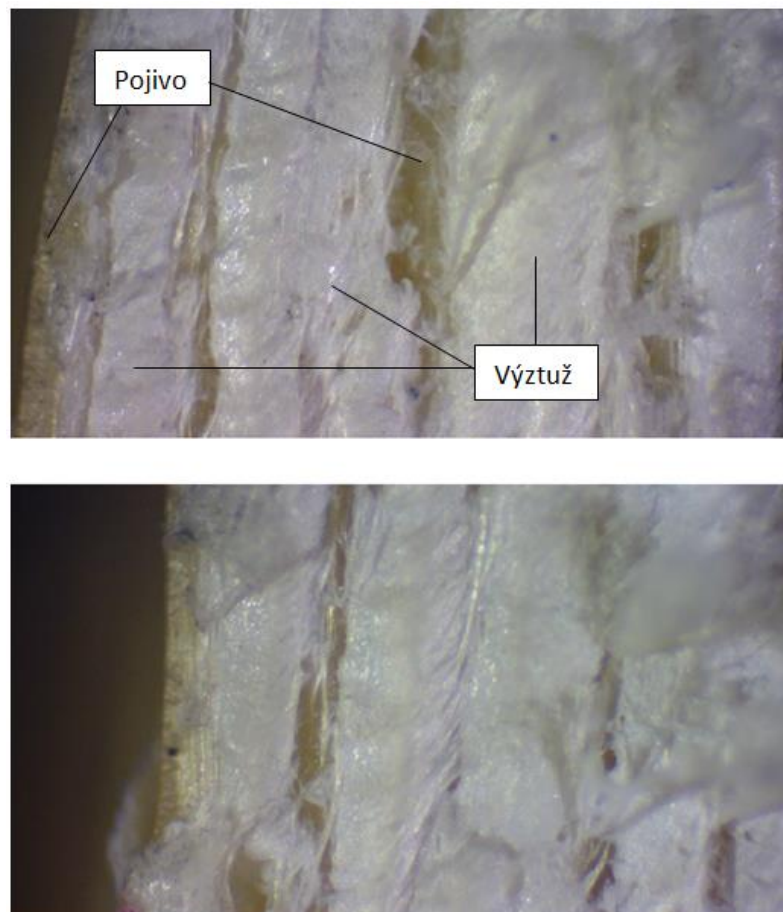
Dále lze pozorovat (*Obr. 46.*), že na spodní straně je zdegradované pojivo (hnědá místa) v mnohem větší oblasti, než na horní straně. To může být způsobeno větší vrstvou pojiva na spodní straně, či jejím větším tepelným zatížením. Na horní straně se tyto místa vyskytují jen v místě náběhu laseru.



*Obr. 46. Horní a spodní strana aramidového kompozitu řezaného laserem*

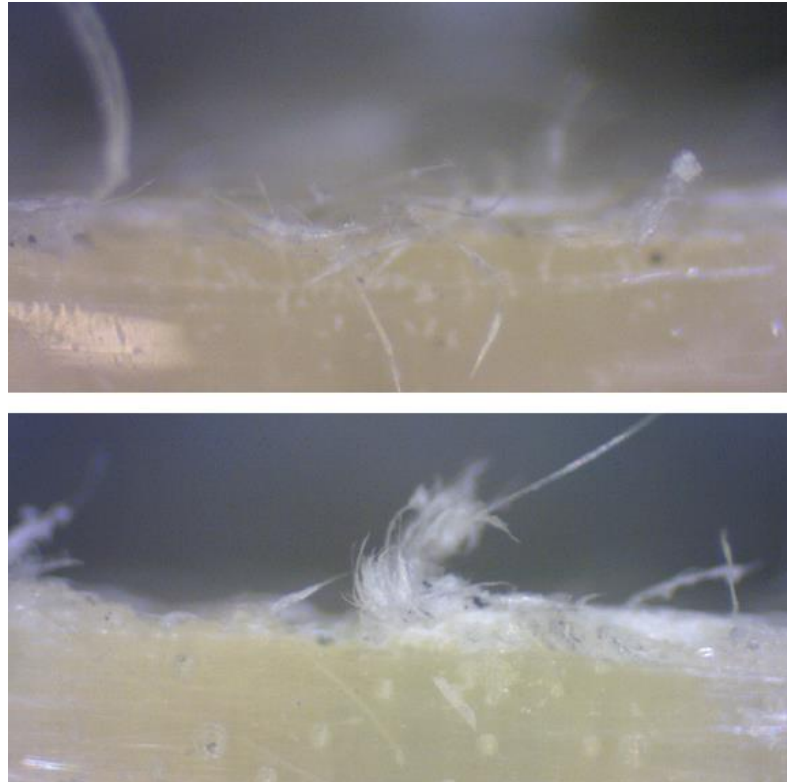
## 7.2 Aramidový kompozit řezaný vodním paprskem

Dle Obr. 47. Aramidový kompozit řezaný vodním paprskem Obr. 47. lze vidět, že povrch po řezu vodním paprskem je mnohem členitější oproti řezu laserem. Vlákná aramidové tkani-ny jsou po řezu vodním paprskem různě přetrhaná a povytahaná z pojiva (matrice). To je způsobeno účinkem dopadajícího vysokotlakého a vysokorychlostního proudu vody. Řez pojivem vypadá čistě, ovšem u laseru vypadá ještě lépe. Řez vypadá po celé šířce stejně, ovšem tloušťka vzorků je pouze kolem 2,1 mm. Orientace vláken není výrazně čitelná, příčná i podélná vypadají na snímcích podobně.



Obr. 47. Aramidový kompozit řezaný vodním paprskem

Na *Obr. 48.* je horní a spodní hrana vzorku. Na hranách řezu se vyskytují malé otřepy. Celkově vypadá horní i spodní hrana vzorku podobně. Pouze spodní strana vzorku má po nestálých délkových rozestupech drobné vychýlení aramidových vláken z pojiva (délka vychýlení cca 1 – 2 mm), zakroužkováno na *Obr. 49.* Logicky to jsou místa s příčnou orientací vláken vůči směru řezu (větší namáhání vláken při řezání vodním paprskem). Na horní straně tohle vidět není.



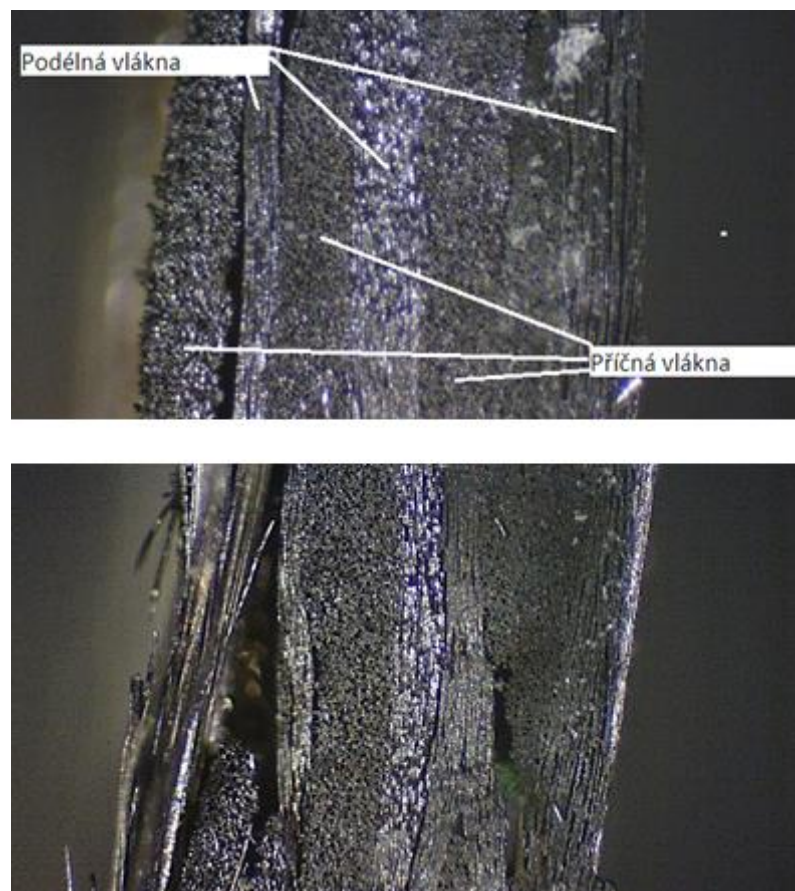
*Obr. 48. Horní a spodní hrana aramidového kompozitu  
řezaného vodním paprskem*



*Obr. 49. Spodní strana aramidového kompozitu  
řezaného vodním paprskem*

### 7.3 Uhlíkový kompozit řezaný laserem

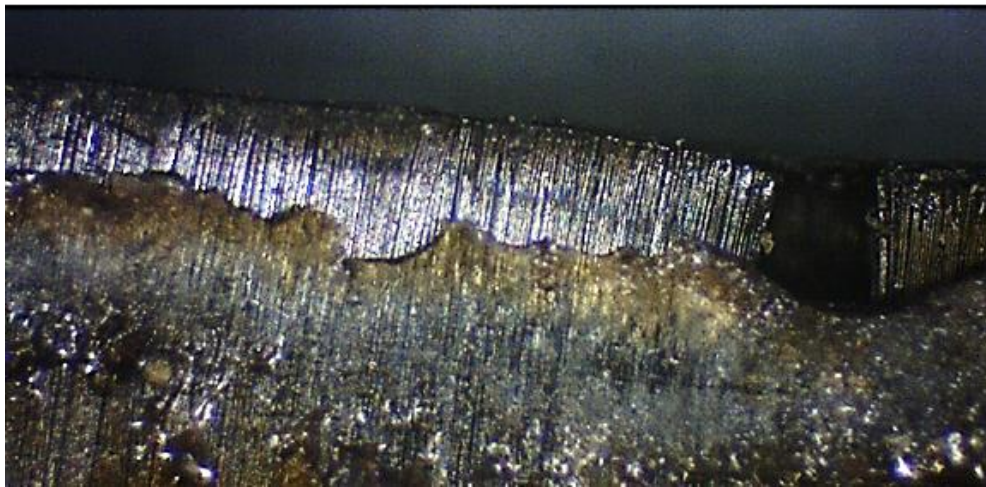
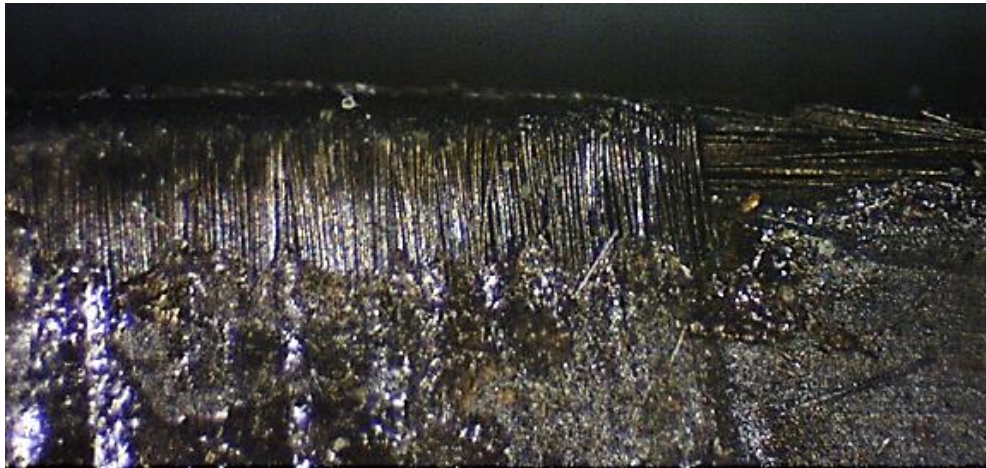
Snímek řezu pořízený mikroskopem je vidět na *Obr. 50*. U uhlíkového kompozitu se rozpozná příčná a podélná orientaci vláken, což u aramidového kompozitu vidět nelze. Vzhled řezu podélnými i příčnými vlákny je velmi hladký, bez otřepů a po celé šířce podobný. Pojivo na snímcích z mikroskopu nejde příliš rozeznat, u okraje řezu je vypálené, což je nejlépe vidět na *Obr. 51*. Různé odstíny barev na snímku jsou způsobené nasvícením vzorku při pozorování.



*Obr. 50. Uhlíkový kompozit řezaný laserem*

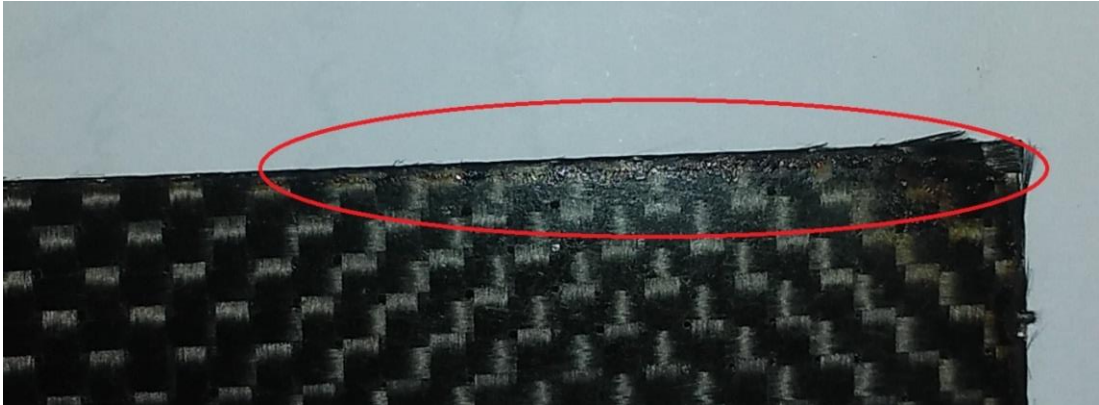


Na *Obr. 51.* jsou snímky horní a spodní hrany vzorku. Zde již lze vidět pojivo, které je kus od hrany řezu vypálené (cca 0,5 mm), což u aramidového kompozitu nenastalo (aramidová vlákna mají nižší tepelnou vodivost). Dále lze rozpoznat orientaci vláken. Celkově však horní i spodní hrana vzorku vypadá podobně.



*Obr. 51. Horní a spodní hrana uhlíkového kompozitu řezaného laserem*

Na *Obr. 52.* a *Obr. 53.* lze vidět stejně jako u aramidového kompozitu, že na spodní straně je u okrajů zdegradované pojivo (výrazné oblasti červeně zakroužkovány). Na horní straně tohle vidět téměř není, jen zcela minimálně v některých rozích. To může být způsobeno stejně jako u aramidového kompozitu větší vrstvou pojiva na spodní straně, či větším tepelným zatížením spodní strany.



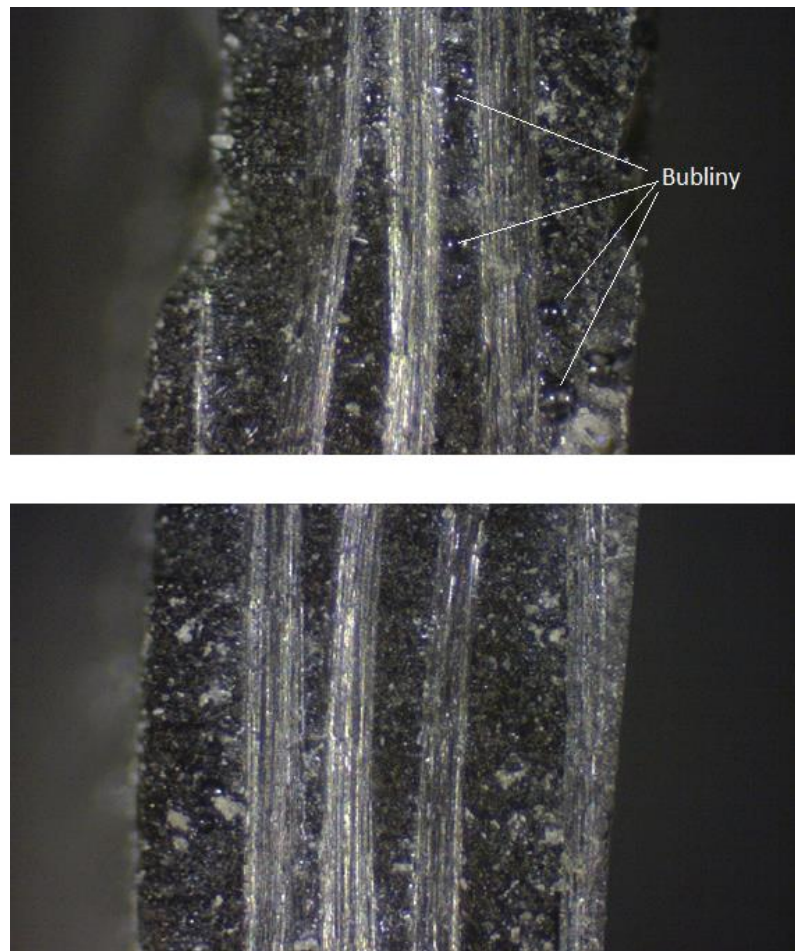
*Obr. 52. Spodní strana uhlíkového kompozitu řezaného laserem*



*Obr. 53. Spodní strana uhlíkového kompozitu (desky) řezaného laserem*

#### 7.4 Uhlíkový kompozit řezaný vodním paprskem

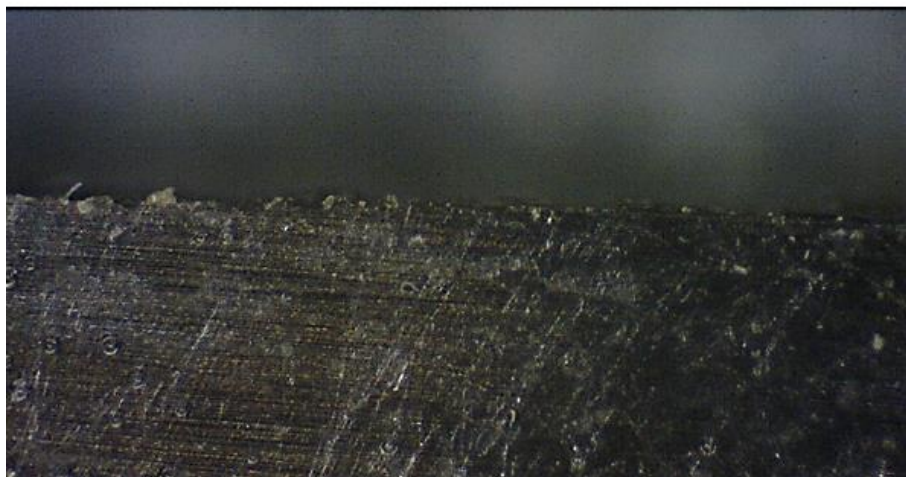
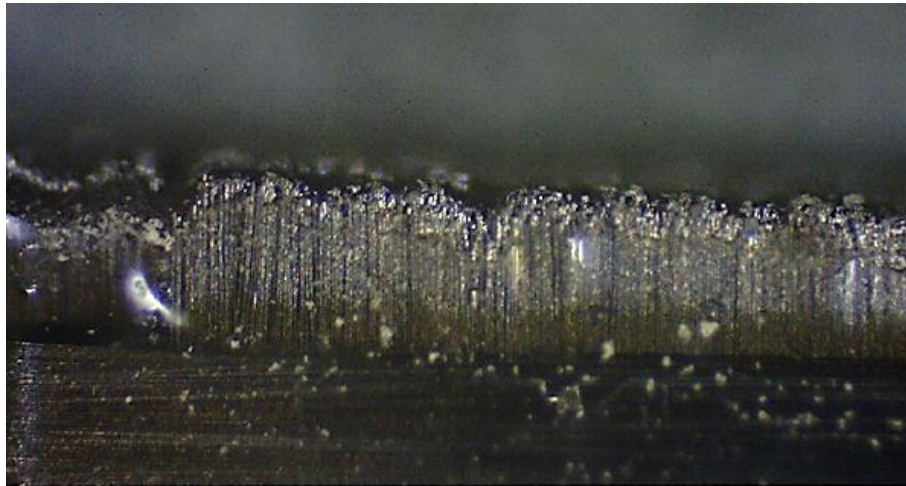
Na *Obr. 54.* lze rozeznat podélná vlákna (stříbrné „pruhy“). Celkově vypadá řez po celé šířce hladce a bez povytaháných vláken (oproti aramidovému kompozitu). Ale tloušťka kompozitu je pouze kolem 1,5 mm. Samotné pojivo zde již lze rozeznat a u příčných vláken můžeme vidět bubliny (některé označeny v *Obr. 54.*).



*Obr. 54. Uhlíkový kompozit řezaný vodním paprskem*

Na *Obr. 55.* je zobrazena horní a spodní hrana vzorku. Na jeho horní straně je dobře čitelná orientace vláken, zatímco na spodní straně vzorku se orientace vláken obtížně rozeznává. Povrch pojiva lze dobře vidět, pojivo dosahuje až po okraj vzorku.

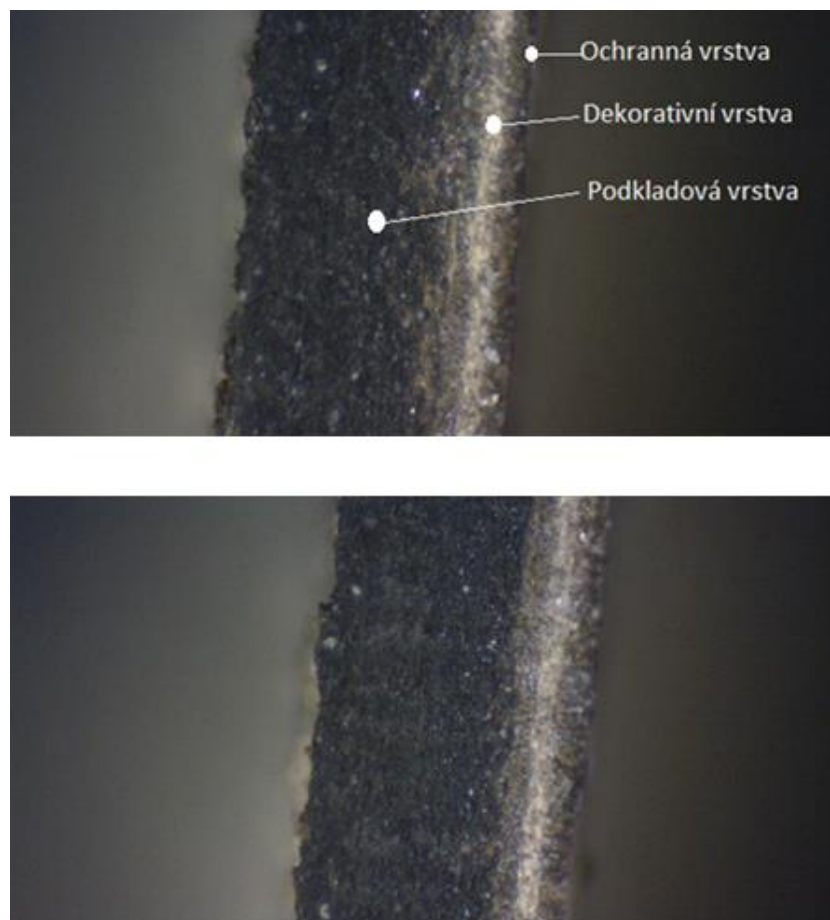
Celkově vypadá horní a spodní strana vzorku podobně, není zde vidět žádné ovlivnění kompozitu po řezu, ani vychýlení vláken z pojiva jako u aramidového kompozitu.



*Obr. 55. Horní a spodní hrana uhlíkového kompozitu  
řezaného vodním paprskem*

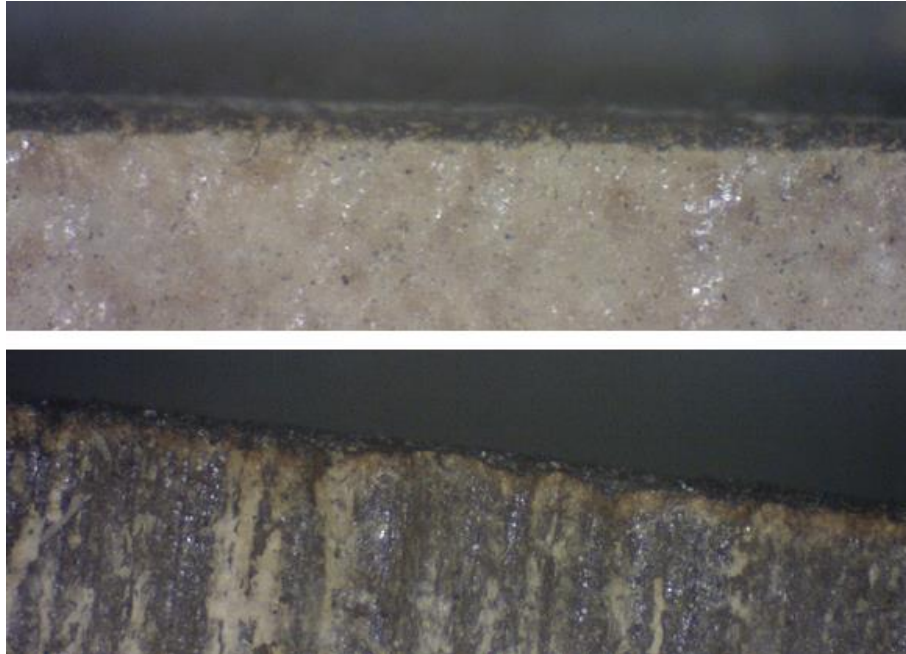
## 7.5 HPL laminát řezaný laserem

Dle *Obr. 56*. lze vidět, že laminát je tvořen ze tří vrstev (podkladová vrstva a tenká dekorativní vrstva s její ochrannou vrstvou). Dekorativní a ochranná vrstva je od laseru mnohem méně opálená oproti vrstvě podkladové. Jelikož se jedná o průmyslový výrobek, je řez po celé délce stejný, nejsou vidět žádné rozdíly nebo vady.



*Obr. 56. HPL laminát řezaný laserem*

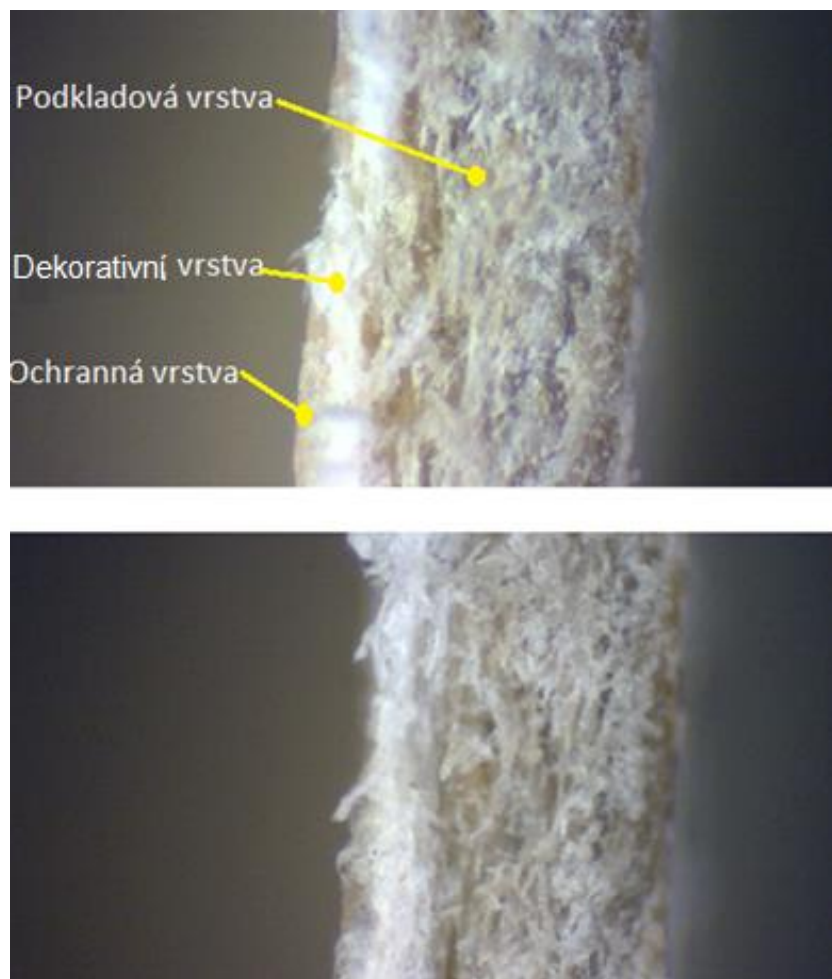
Při pohledu na horní hranu řezu (vzorku) nevidíme žádné opálení či více vypálená místa apod., ale při pohledu na spodní hranu řezu (vzorku) je vidět opálený okraj do vzdálenosti cca 1 mm (*Obr. 57*).



*Obr. 57. Horní a spodní hrana HPL laminátu řezaného laserem*

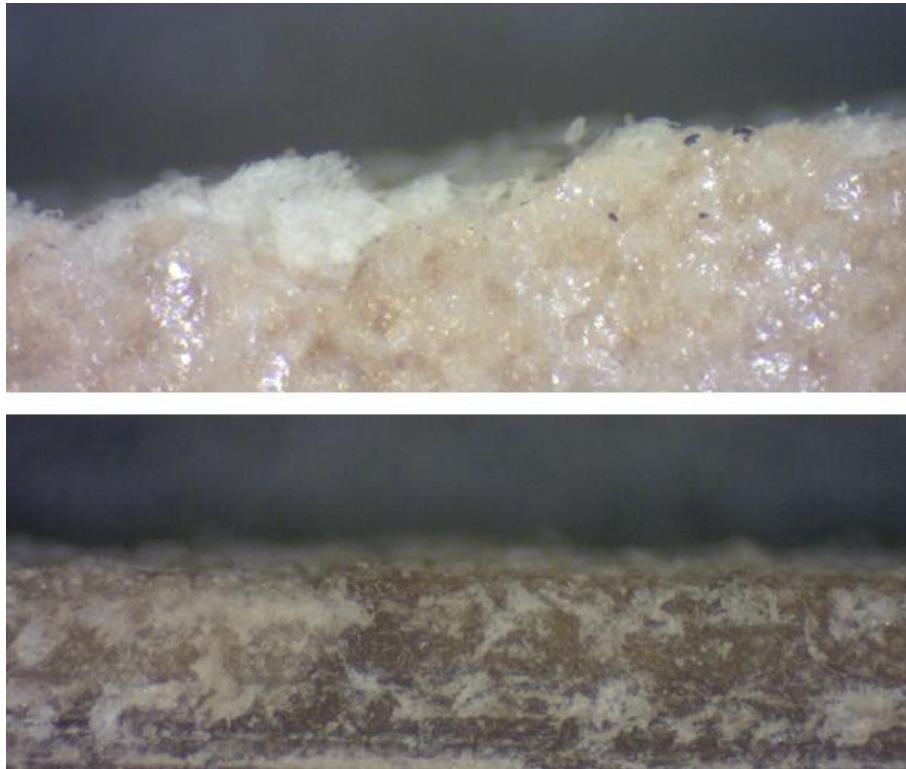
## 7.6 HPL laminát řezaný vodním paprskem

Povrch po řezu vodním paprskem je stejně jako v případě aramidového kompozitu mnohem členitější ve srovnání s laserovým řezem (*Obr. 58.*). Dekorativní a podkladová vrstva je různě povytahaná a přetrhaná. Pouze řez ochrannou vrstvou je hladký (je to nejtvrdší vrstva laminátu).



*Obr. 58. HPL laminát řezaný vodním paprskem*

Na *Obr. 59.* lze spatřit horní a spodní hranu řezu (vzorku). Na horní hraně vidíme malé vylomené části ochranné krycí a dekorativní vrstvy (při detailním zkoumání jde vidět i okem). Na spodní hraně řezu (vzorku) nejsou vidět žádné vylomené části, hrana je čistá po celé délce řezu.



*Obr. 59. Horní a spodní hrana HPL laminátu  
řezaného vodním paprskem*



## 8 MĚŘENÍ DRSNOSTI ŘEZU

Dosažení potřebné drsnosti obrobeného povrchu patří mezi hlavní cíle při obrábění. Úkolem bylo zjištění drsnosti povrchu jednotlivých kompozitů po řezu laserovým a vodním paprskem. Měření probíhalo v podélném směru na bezkontaktním drsnoměru Talysurf CLI 500 s CLA (Chromatic Length Aberration) konfokální hlavou. Výrobce je firma Taylor Hobson (GB).



Obr. 60. Drsnoměr Talysurf CLI 500

Tab. 5. Specifikace přístroje Talysurf CLI 500

| Talysurf CLI 500               |                   |
|--------------------------------|-------------------|
| Prostor měření (X, Y, Z)       | 50 x 50 x 50 mm   |
| Délka posuvu v osách X – Y – Z | 50 mm             |
| Osové rozlišení                | 0,5 $\mu\text{m}$ |
| Nosnost                        | 10 kg             |

## 8.1 Postup měření

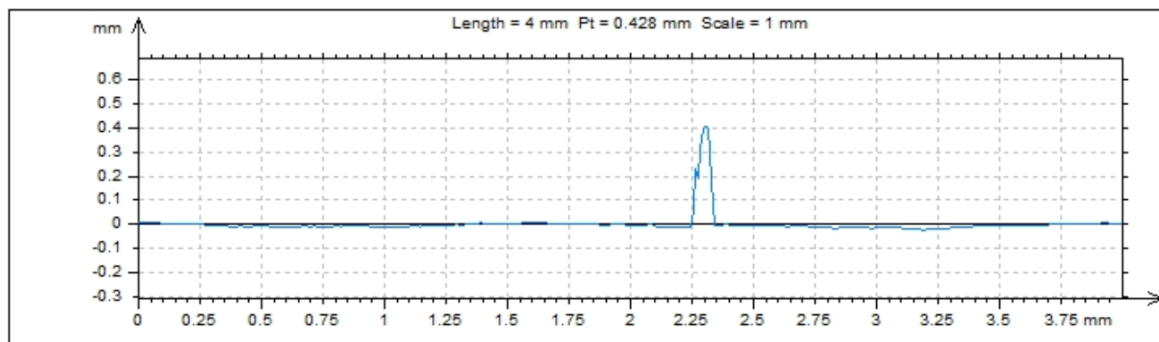
Po umístění vzorku na drsnoměr (*Obr. 60.*) se spustí software TalyMap Gold (verze 5.1.1.5374), kterým se ovládají pracovní funkce drsnoměru. Prvním krokem byla kalibrace přístroje, poté následovalo nastavení parametrů měření (*Obr. 61.*) a nastavení odrazivosti.

The screenshot displays the TalyMap Gold software interface with the following sections:

- Gauge selection:** Gauge to use: CLA Gauge. Includes an image of the CLA Gauge.
- Range selection:** Range to use: CLA-1000 - (1 mm - 84 pm) - (20 Hz). Status: linearized, calibrated.
- Gauge adjustment:** Radio buttons for Adjust to top of range, Adjust to middle of range (selected), and Adjust to bottom of range.
- Gauge measurement direction:** Radio buttons for East-West or South-North measurement (selected), Bi-directional measurement, and West-East or North-South measurement.
- Gauge lifting security settings:**  Lift the gauge between scans (0 mm),  Activate also when moving to begin/end point.
- Advanced Gauge Settings:** Background Noise Cancellation (Dark): done. Sampling rate: 20 Hz. Measurement mode: Maximum Interface. A Show Spectrum button is also present.

*Obr. 61. Parametry měření*

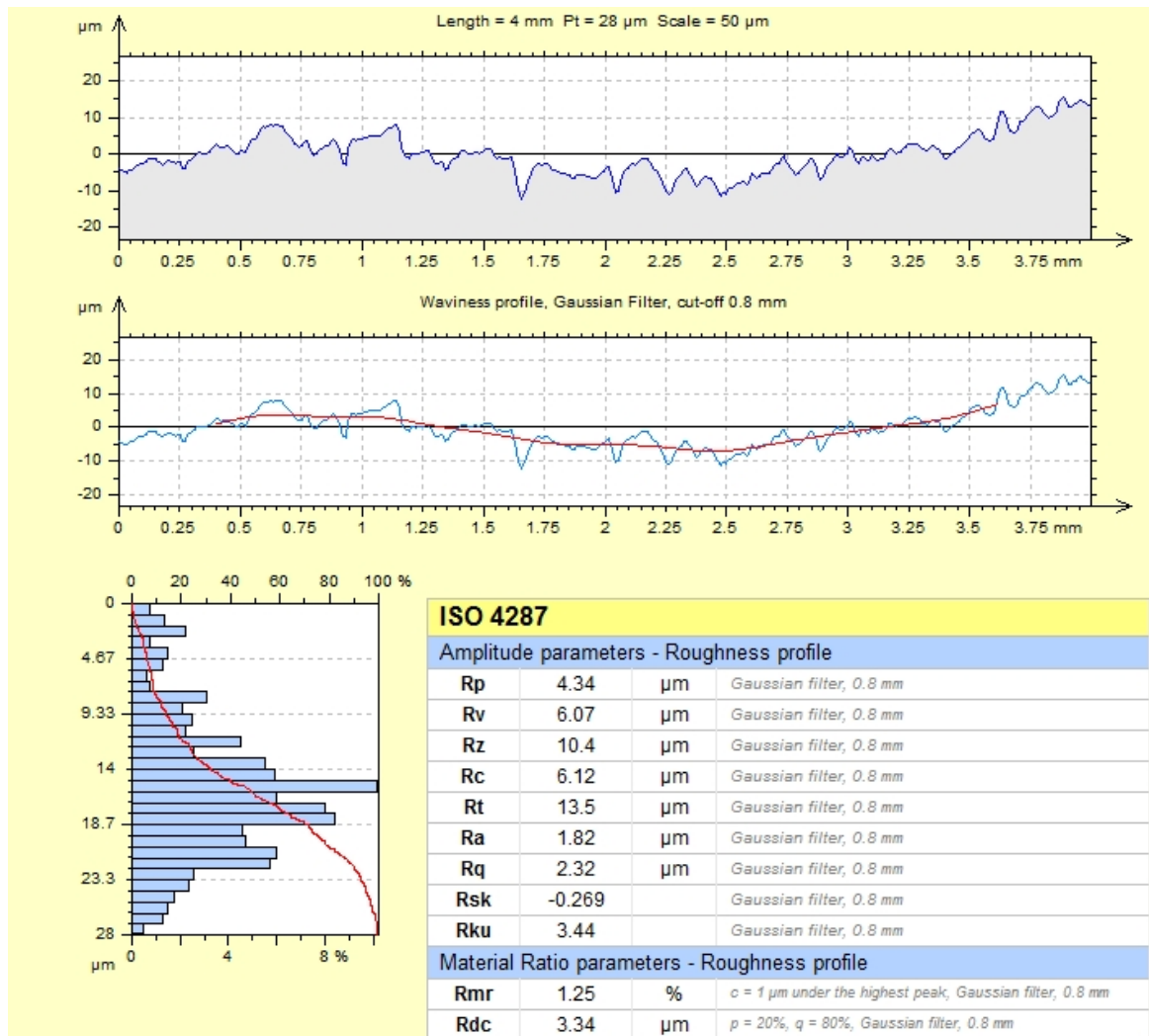
Vyhodnocovaná délka byla nastavena na 4 mm a základní délka byla 0,8 mm. Pro každý kompozit a druh řezu bylo provedeno několik měření. Ovšem z důvodu velmi členitého povrchu po řezu u kompozitů (např. různé vady materiálu způsobené výrobou a řezem) bylo vždy několik měření nepoužitelných pro vyhodnocení (např. jako na *Obr. 62.*).



*Obr. 62. Vyloučené měření*

Po dokončení měření jsem provedl vyhodnocení pomocí softwaru TalyMap Gold. Podle normy ČSN EN ISO 4287 byly naměřeny parametry Ra a Rz. Naměřené hodnoty drsnosti jsou uvedeny v příloze (Příloha P I – P III).

Parametr Ra představuje průměrnou aritmetickou úchytku profilu v rozsahu základní délky, parametr Rz představuje největší výšku profilu v rozsahu základní délky.



Obr. 63. Měření z programu TalyMap Gold (Uhlík – laser)

## 8.2 Vyhodnocení naměřených hodnot

Zobrazení naměřených dat bylo provedeno v programu Minitab (verze 17.1) pomocí boxplot diagramů, na kterých jsem ještě vizualizoval vychýlené hodnoty (Obr. 65. - Obr. 70.). Následně jsem u každého materiálu porovnal naměřené hodnoty (parametr Ra a Rz) mezi řezem laserovým a vodním paprskem. K tomu byl použit F-test (rovnost rozptylů) a T-test

(rovnost středních hodnot). Popisná charakteristika naměřených hodnot (výběrového souboru) je na následujícím obrázku.

Vysvětlivky k *Obr. 64.*: Mean je aritmetický průměr, SE Mean je nejistota měření typu A, STDev je směrodatná odchylka, Variance je rozptyl, CoefVar je variační koeficient, Minimum je minimální hodnota, Q1 je 1. kvartil, Median je medián, Q3 je 3. kvartil, Maximum je maximální hodnota, Range je variační rozpětí, IQR je interkvartilové rozpětí.)

### Descriptive Statistics: Ra a Rz

| Variable                          | Mean   | SE Mean | StDev | Variance | CoefVar | Minimum | Q1     |
|-----------------------------------|--------|---------|-------|----------|---------|---------|--------|
| Aramid laser Ra [ $\mu\text{m}$ ] | 5,810  | 0,303   | 1,284 | 1,649    | 22,10   | 3,650   | 4,635  |
| Aramid WJM Ra [ $\mu\text{m}$ ]   | 6,634  | 0,607   | 2,577 | 6,641    | 38,85   | 3,430   | 4,417  |
| Aramid laser Rz [ $\mu\text{m}$ ] | 33,66  | 2,22    | 9,40  | 88,42    | 27,93   | 20,70   | 25,65  |
| Aramid WJM Rz [ $\mu\text{m}$ ]   | 36,57  | 3,46    | 14,68 | 215,49   | 40,14   | 16,10   | 23,62  |
| Uhlik laser Ra [ $\mu\text{m}$ ]  | 2,208  | 0,108   | 0,456 | 0,208    | 20,66   | 1,600   | 1,793  |
| Uhlik WJM Ra [ $\mu\text{m}$ ]    | 5,794  | 0,204   | 0,864 | 0,747    | 14,92   | 3,390   | 5,488  |
| Uhlik laser Rz [ $\mu\text{m}$ ]  | 12,459 | 0,718   | 3,048 | 9,289    | 24,46   | 8,600   | 10,550 |
| Uhlik WJM Rz [ $\mu\text{m}$ ]    | 30,41  | 1,15    | 4,86  | 23,65    | 16,00   | 18,50   | 27,68  |
| HPL laser Ra [ $\mu\text{m}$ ]    | 2,137  | 0,126   | 0,534 | 0,285    | 25,00   | 1,180   | 1,645  |
| HPL WJM Ra [ $\mu\text{m}$ ]      | 9,436  | 0,629   | 2,667 | 7,113    | 28,26   | 5,340   | 7,920  |
| HPL laser Rz [ $\mu\text{m}$ ]    | 11,485 | 0,724   | 3,073 | 9,441    | 26,75   | 6,920   | 8,652  |
| HPL WJM Rz [ $\mu\text{m}$ ]      | 56,19  | 3,87    | 16,41 | 269,33   | 29,21   | 27,60   | 43,50  |

| Variable                          | Median | Q3     | Maximum | Range  | IQR   |
|-----------------------------------|--------|--------|---------|--------|-------|
| Aramid laser Ra [ $\mu\text{m}$ ] | 5,930  | 6,675  | 8,960   | 5,310  | 2,040 |
| Aramid WJM Ra [ $\mu\text{m}$ ]   | 6,030  | 9,138  | 11,300  | 7,870  | 4,720 |
| Aramid laser Rz [ $\mu\text{m}$ ] | 32,75  | 39,27  | 54,80   | 34,10  | 13,62 |
| Aramid WJM Rz [ $\mu\text{m}$ ]   | 37,15  | 47,32  | 69,80   | 53,70  | 23,70 |
| Uhlik laser Ra [ $\mu\text{m}$ ]  | 2,060  | 2,577  | 2,970   | 1,370  | 0,785 |
| Uhlik WJM Ra [ $\mu\text{m}$ ]    | 5,970  | 6,325  | 7,180   | 3,790  | 0,837 |
| Uhlik laser Rz [ $\mu\text{m}$ ]  | 11,450 | 14,275 | 20,100  | 11,500 | 3,725 |
| Uhlik WJM Rz [ $\mu\text{m}$ ]    | 31,40  | 34,03  | 37,00   | 18,50  | 6,35  |
| HPL laser Ra [ $\mu\text{m}$ ]    | 2,060  | 2,577  | 2,970   | 1,790  | 0,932 |
| HPL WJM Ra [ $\mu\text{m}$ ]      | 9,145  | 11,150 | 15,600  | 10,260 | 3,230 |
| HPL laser Rz [ $\mu\text{m}$ ]    | 11,050 | 14,275 | 17,500  | 10,580 | 5,622 |
| HPL WJM Rz [ $\mu\text{m}$ ]      | 55,80  | 69,45  | 84,70   | 57,10  | 25,95 |

*Obr. 64. Popisná charakteristika naměřených hodnot parametrů Ra a Rz*

### 8.3 Porovnání parametru Ra a Rz statistickými hypotézami

Při testování neznáme parametry základního souboru, proto zavedeme nulovou hypotézu, kterou ověříme statistickými testy.

Postup při testování statistických hypotéz.

- a) Stanovení nulové ( $H_0$ ) a alternativní ( $H_A$ ) hypotézy. Nulová hypotéza vyjadřuje rovnovážný stav, proto je vyjádřena znaménkem rovnosti. Alternativní hypotéza popírá nulovou hypotézu.
- b) Stanovení hladiny významnosti  $\alpha$ , nejčastěji se volí 0,05 nebo 0,01.
- c) Výpočet testovacího kritéria (P-Value), na základě čehož provedu rozhodnutí o zamítnutí/nezamítnutí  $H_0$ . Pokud  $P < \alpha$ , pak zamítám  $H_0$ . Pokud  $P > \alpha$ , pak nezamítám  $H_0$ . [42]

Pomocí F-testu testujeme významnost rozdílu dvou rozptylů a pomocí T-testu rozdíl dvou středních hodnot. Předpokladem je, že výběrový soubor  $n$  o parametrech  $\bar{x}$  a  $s^2$  pochází ze základního souboru  $N(\mu, \sigma^2)$ .

Zde je uvedena ukázka stanovení hypotéz pro F-test a T-test pro porovnání parametru  $R_a$  u aramidového kompozitu mezi řezem laserem a WJM:

Konfidenční úroveň  $1 - \alpha = 0,95$ ;  $\alpha = 0,05$ . Postup je stejný u všech testovaných parametrů  $R_a$  a  $R_z$ , výsledky jsou zobrazeny v *Tab. 6.* a *Tab. 7.*

### F-test:

Nulová hypotéza  $H_0$ :

$$\sigma_{Aramid\_Ra\_laser}^2 = \sigma_{Aramid\_Ra\_WJM}^2 \quad (1)$$

Alternativní hypotéze  $H_A$ :

$$\sigma_{Aramid\_Ra\_laser}^2 \neq \sigma_{Aramid\_Ra\_WJM}^2 \quad (2)$$

Dle Minitab je P-Value 0,002. Ukázka z Minitab:

| Method | DF1 | DF2 | Statistic | P-Value |
|--------|-----|-----|-----------|---------|
| Bonett | 1   | -   | 9,21      | 0,002   |

Tedy:  $P = 0,002 < \alpha = 0,05$ , proto zamítám  $H_0$ . Rozptyl hodnot  $R_a$  u aramidového kompozitu při řezu laserem a vodním paprskem (WJM) je statisticky výrazně rozdílný.

**T-test:**

Nulová hypotéza  $H_0$ :

$$\mu_{Aramid\_Ra\_laser} = \mu_{Aramid\_Ra\_WJM} \quad (3)$$

Alternativní hypotéza  $H_A$ :

$$\mu_{Aramid\_Ra\_laser} \neq \mu_{Aramid\_Ra\_WJM} \quad (4)$$

P-Value je 0,237, ukázka z Minitab:

T-Test of difference = 0 (vs ≠): T-Value = -1,21 P-Value = 0,237 DF = 24

Tedy:  $P = 0,237 > \alpha = 0,05$ , proto nezamítám  $H_0$ . U aramidového kompozitu nezáleží na technologii řezání, protože průměrné Ra při řezu laserem a WJM není statisticky výrazně rozdílné (nezamítá se jejich rovnost).

Výsledky všech testovaných hypotéz jsou v následujících dvou tabulkách. Zamítnutí  $H_0$  u F-testu lze interpretovat tak, že rozptyl testovaných hodnot (Ra nebo Rz) u daného materiálu při řezu laserem a vodním paprskem (WJM) je statisticky výrazně rozdílný. Pokud  $H_0$  nezamítám, pak rozptyl testovaných hodnot u daného materiálu při řezu laserem a WJM není statisticky výrazně rozdílný.

Tab. 6. Testování hypotéz pomocí F-testu

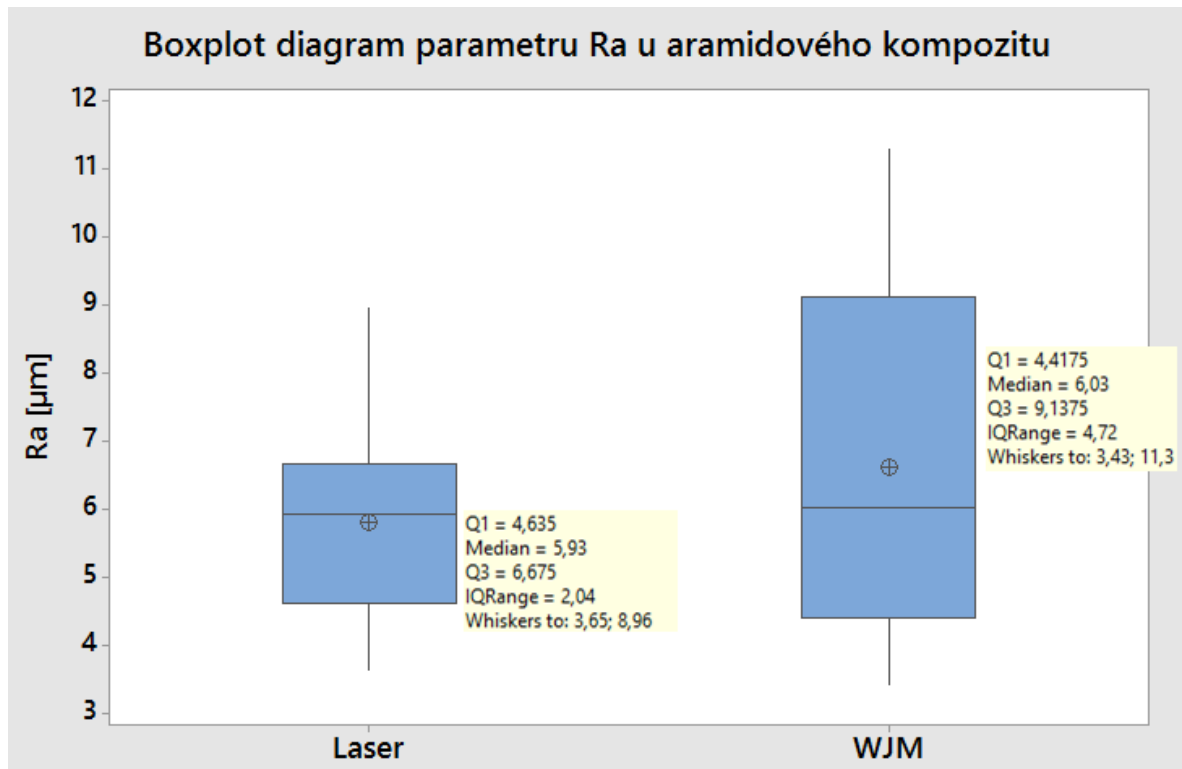
| F-Test    |             |                |
|-----------|-------------|----------------|
| Parametr  | P-Value [-] | Hypotéza $H_0$ |
| Aramid Ra | 0,002       | Zamítám        |
| Aramid Rz | 0,079       | Nezamítám      |
| Uhlík Ra  | 0,120       | Nezamítám      |
| Uhlík Rz  | 0,157       | Nezamítám      |
| HPL Ra    | 0,000       | Zamítám        |
| HPL Rz    | 0,000       | Zamítám        |

Analogicky zamítnutí  $H_0$  u T-testu lze interpretovat tak, že průměrná hodnota (Ra nebo Rz) u daného materiálu při řezu laserem a WJM je statisticky výrazně rozdílná (záleží na technologii řezání). Pokud  $H_0$  nezamítám, pak průměrné hodnoty (Ra nebo Rz) u daného materiálu při řezu laserem a WJM nejsou statisticky výrazně rozdílné (nezáleží na technologii řezání).

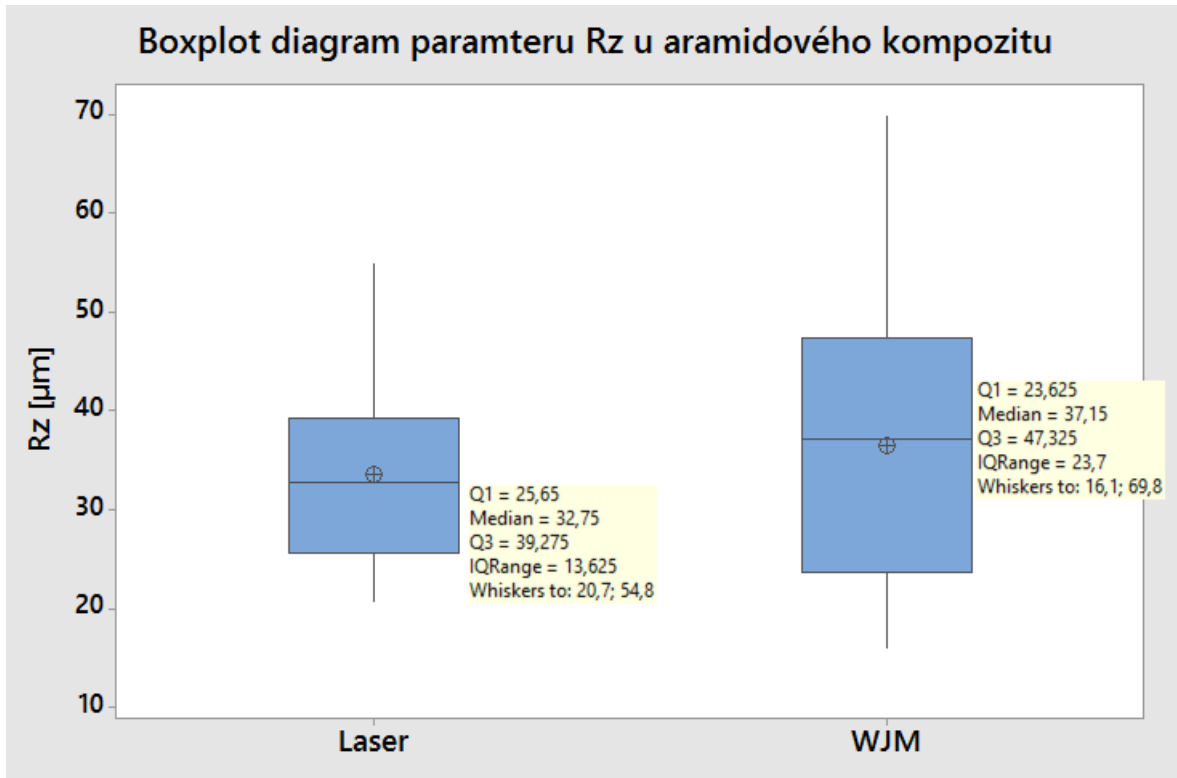
Tab. 7. Testování hypotéz pomocí T-testu

| T-Test    |             |                |
|-----------|-------------|----------------|
| Parametr  | P-Value [-] | Hypotéza $H_0$ |
| Aramid Ra | 0,237       | Nezamítám      |
| Aramid Rz | 0,483       | Nezamítám      |
| Uhlík Ra  | 0,000       | Zamítám        |
| Uhlík Rz  | 0,000       | Zamítám        |
| HPL Ra    | 0,000       | Zamítám        |
| HPL Rz    | 0,000       | Zamítám        |

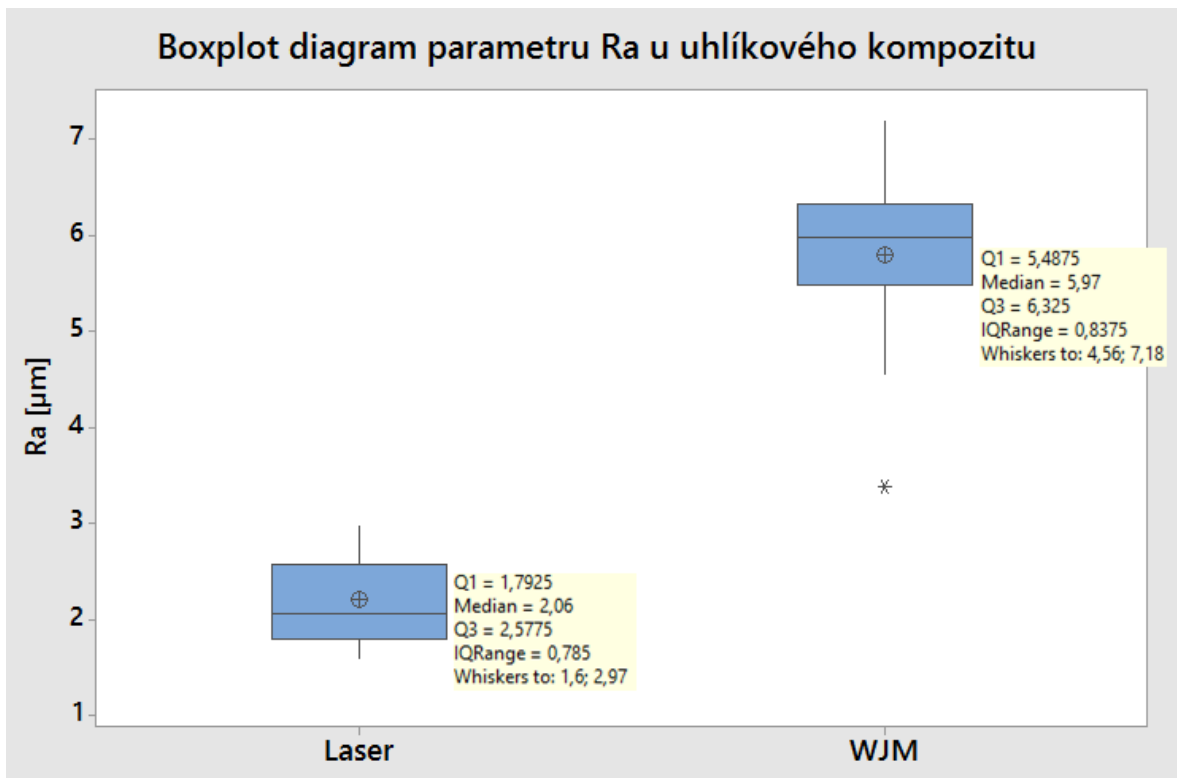
Na následujících obrázcích (Obr. 65. - Obr. 70.) jsou zobrazeny boxplot diagramy pro jednotlivé kompozity (kruh s křížkem zobrazuje aritmetický průměr).



Obr. 65. Boxplot diagram parametru Ra u aramidového kompozitu

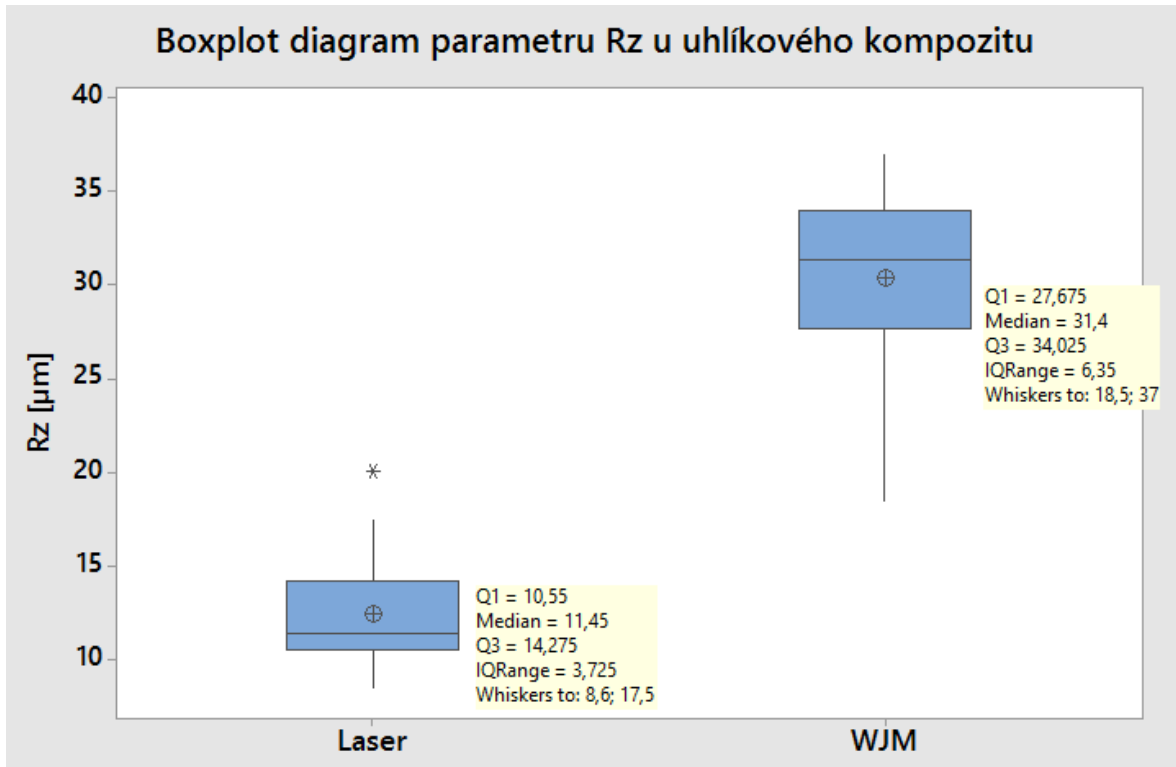


Obr. 66. Boxplot diagram paramteru Rz u aramidového kompozitu

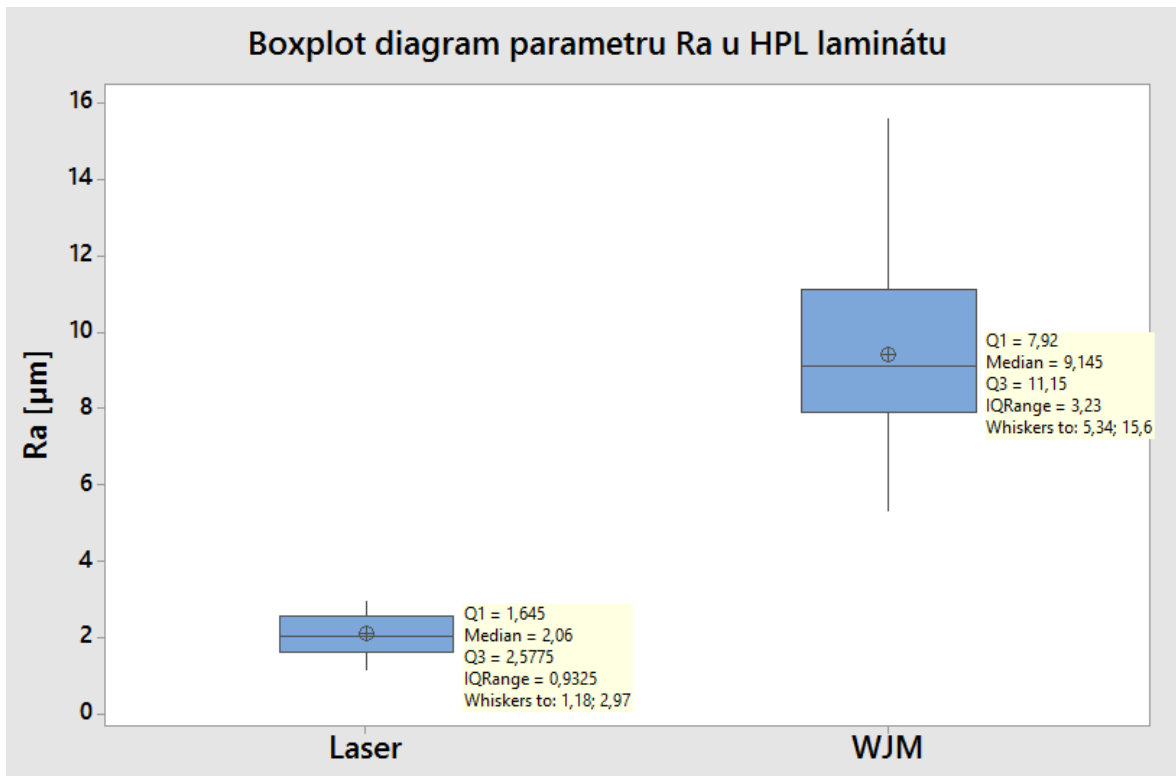


Obr. 67. Boxplot diagram paramteru Ra u uhlíkového kompozitu

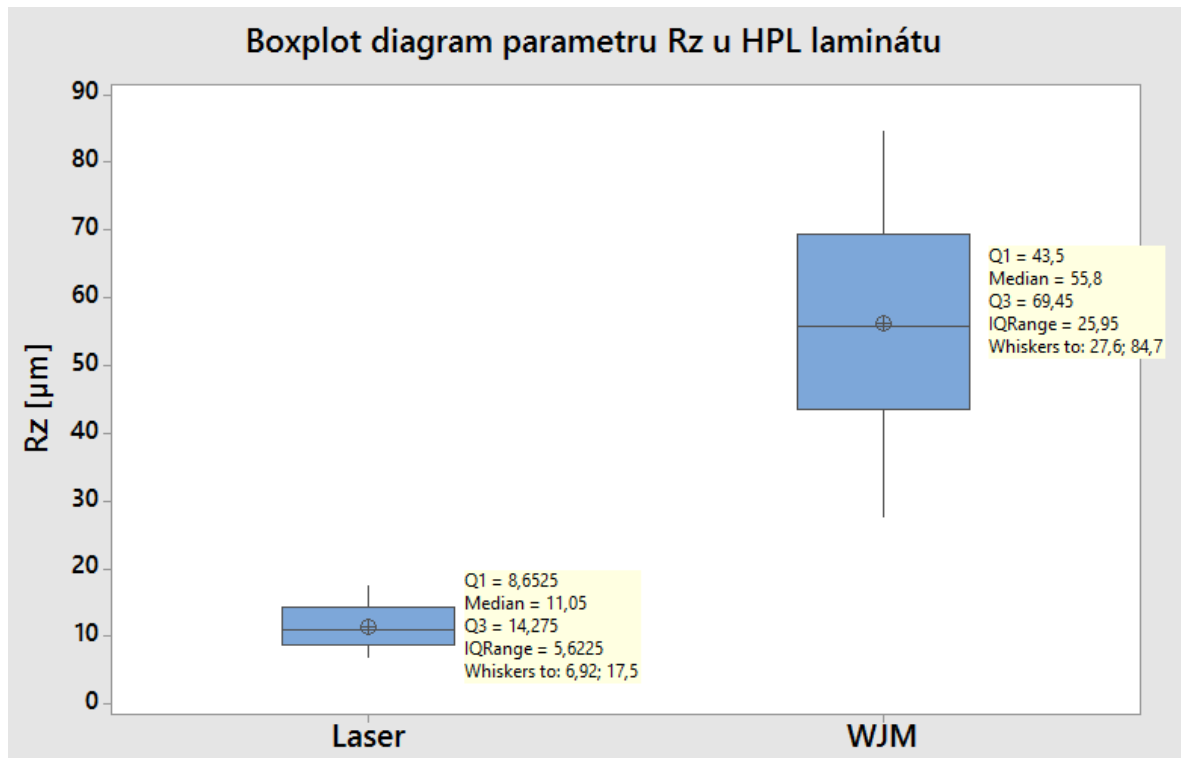




Obr. 68. Boxplot diagram parametru Rz u uhlíkového kompozitu

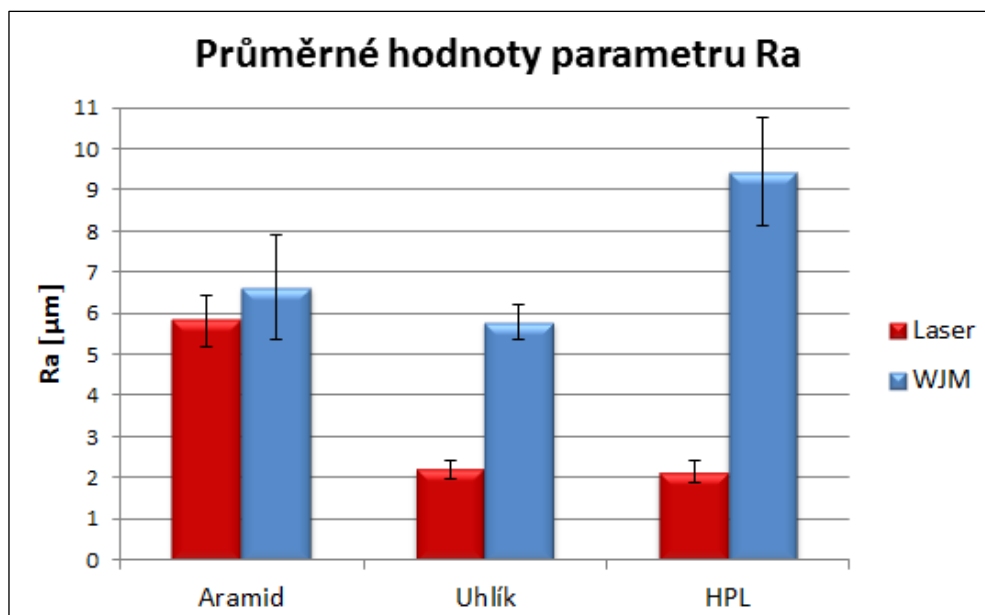


Obr. 69. Boxplot diagram parametru Ra u HPL laminátu



Obr. 70. Boxplot diagram parametru Rz u HPL laminátu

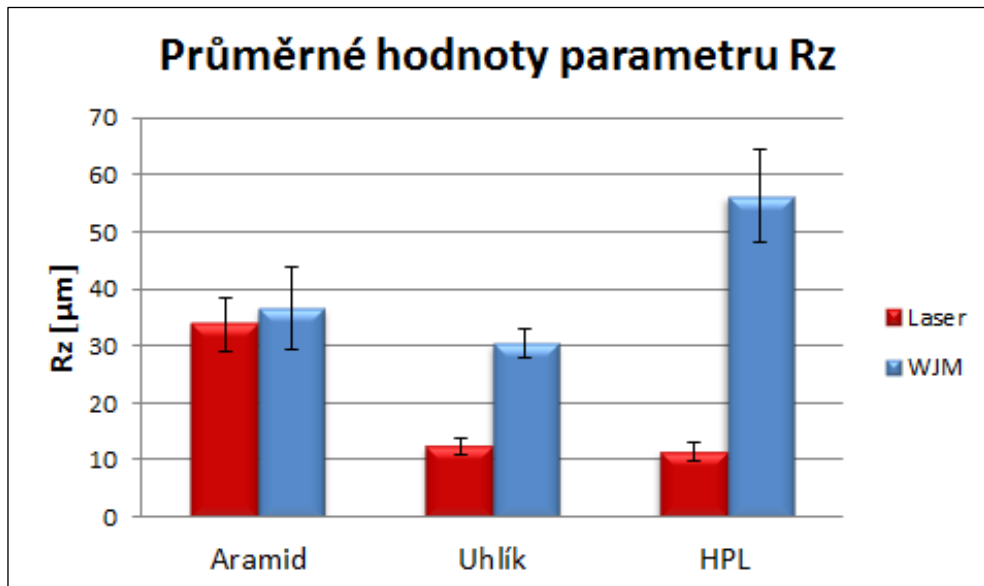
Na následujících dvou grafech je porovnání průměrných hodnot parametru Ra a Rz pro všechny zkoumané materiály. Chybové úsečky zobrazují směrodatnou odchylku.



Obr. 71. Průměrné hodnoty parametru Ra

U každého materiálu je vždy dosaženo nižší průměrné hodnoty Ra při řezu laserem (*Obr. 71.*). Největší rozdíl je u HPL laminátu (u řezu laserem je Ra 2,1  $\mu\text{m}$ , u řezu vodním paprskem je Ra 9,4  $\mu\text{m}$ ). U uhlíkového kompozitu je také výrazný rozdíl (Ra 2,2  $\mu\text{m}$  u řezu laserem a Ra 5,8  $\mu\text{m}$  u řezu vodním paprskem). Nejmenší rozdíl je u aramidového kompozitu (Ra 5,8  $\mu\text{m}$  u řezu laserem a Ra 6,6  $\mu\text{m}$  u řezu vodním paprskem).

Analogicky jako u předcházejícího obrázku i na *Obr. 72.* lze vypočítat, že u každého materiálu je vždy dosaženo nižší průměrné hodnoty Rz při řezu laserem. Největší rozdíl je u HPL laminátu (u řezu laserem je Rz 11,5  $\mu\text{m}$  u řezu vodním paprskem je Rz 56  $\mu\text{m}$ ). U uhlíkového kompozitu je také výrazný rozdíl (Rz 12,5  $\mu\text{m}$  u řezu laserem a Rz 30  $\mu\text{m}$  u řezu vodním paprskem). Nejmenší rozdíl je u aramidového kompozitu (Rz 34  $\mu\text{m}$  u řezu laserem a Rz 37  $\mu\text{m}$  u řezu vodním paprskem).



*Obr. 72. Průměrné hodnoty parametru Rz*

## 9 MĚŘENÍ ŠÍŘKY ŘEZNÉ MEZERY

Úkolem bylo změřit šířku řezné mezery ( $t$ ) u kompozitů po řezu laserovým a vodním paprskem. Šířka řezu nemusí být v každém místě stejná. Vlivem vibrací, nedokonalého upnutí, tepelné roztažnosti materiálů atd. se šířka řezu může v průběhu řezání trochu měnit.

Měření nebylo možné provést na mikroskopu, protože kompozitní materiály zejména po řezu vodním paprskem jsou v místě řezu velmi členité (nacházejí se zde různě povytahaná a přetrhaná vlákna) a nelze tak přesně určit hranu řezu. Měření tedy bylo provedeno pomocí posuvného měřítka Mitutoyo Digimatic Caliper CD-15CXR.

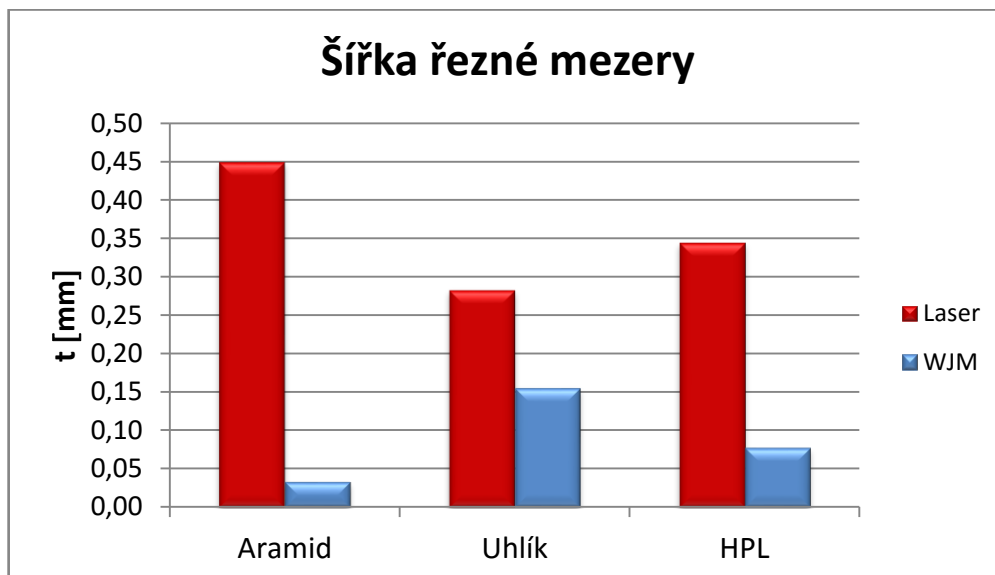
Bylo nutné změřit šířku vyřezaného otvoru v desce a šířku vzorku, který pocházel ze stejného otvoru. Z vyhodnocených hodnot se následně dopočítala šířka řezné mezery. Měření probíhalo u spodní a horní části vzorku a otvoru v desce (do vzdálenosti 1,5 cm). To proto, že mezi vyřezanými otvory v desce je materiál o šířce cca 5 mm, který se velmi snadno prohne.



*Obr. 73. Aramidová deska po vyřezání vzorků vodním paprskem*



vého kompozitu je při řezu vodním paprskem šířka řezu  $t = 0,16$  mm a při řezu laserovým paprskem je  $t = 0,28$  mm.



*Obr. 75. Porovnání šířky řezné mezery*

## 10 MĚŘENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

Pomocí mechanických zkoušek se zjišťuje, jaký vliv má zatěžující síla na zkoušený materiál. U kompozitních materiálů má vliv na jejich chování při mechanickém zatížení zejména použitá matrice a plnivo (jeho orientace a rozložení).

Vyřezané vzorky byly podrobeny tahové zkoušce, která je nejčastěji používaná mechanická zkouška. Principem je deformace zkušebního vzorku jednoosým namáháním do porušení vzorku. Tahová zkouška pro plasty a kompozity je předepsána normou ČSN EN ISO 527 (část 1 až 5). Minimální počet těles pro zkoušku je 5.

Úkolem bylo zjistit, zda vyřezané vzorky laserovým a vodním paprskem z kompozitů budou vykazovat odlišnosti při deformaci a v naměřených hodnotách při tahové zkoušce. Samotná tahová zkouška probíhala na univerzálním zkušebním stroji Zwick 1456, výrobcem je firma Zwick Roell (SRN). Stroj byl osazen pneumatickými čelistmi Shimadzu. Ty se používají pro upínání citlivých materiálů.



Obr. 76. Stroj Zwick 1456 s pneumatickými čelistmi

Vzorky měly délku 150 mm a šířku 20 mm. Před každým jednotlivým měřením byl zkušební vzorek změřen (šířka a tloušťka) a rozměry zapsány do obsluhujícího softwaru. Měření probíhalo při pokojové teplotě 22 °C.

Nastavené hodnoty pro zkoušku tahem:

- rychlost zatížení při měření modulu pružnosti: 5 mm/min
- rychlost zatížení: 20 mm/min
- předzatížení: 5 N
- rychlost předzatížení: 5mm/min
- vzdálenost čelistí: 67 mm

Tab. 8. Specifikace Zwick 1456

| <b>Zwick 1456</b>         |                  |
|---------------------------|------------------|
| Maximální posuv příčnicku | 800 mm/min       |
| Snímače síly              | 2,5 a 20 kN      |
| Teplotní komora           | -80°C až +250 °C |
| TestXpert II Software     | Tah, ohyb, tlak  |

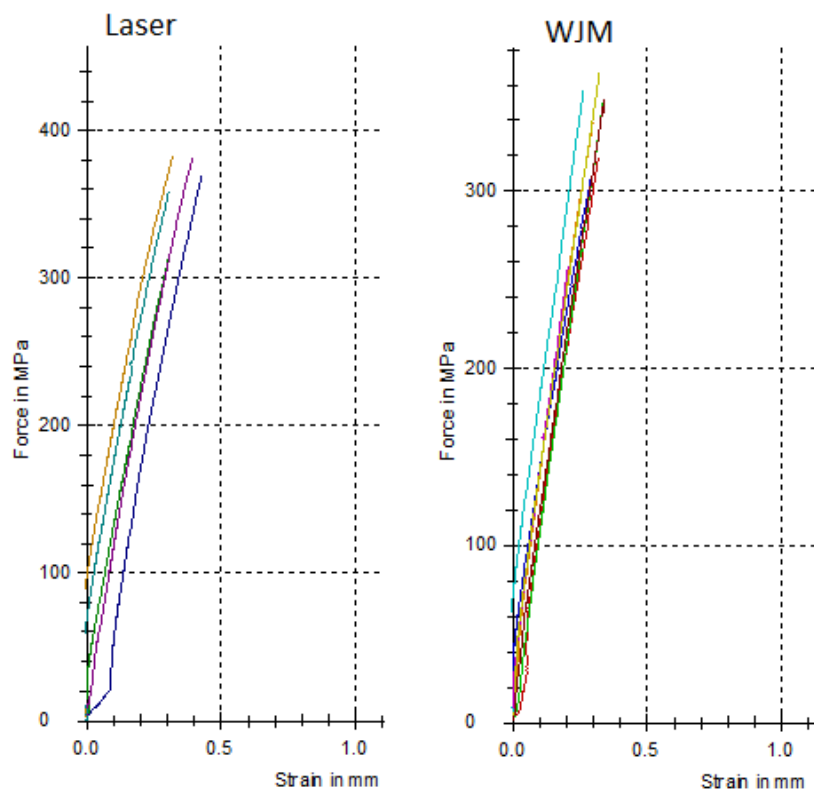
Zaznamenány byly tyto veličiny:

- modul pružnosti v tahu (E)
- pevnost v tahu ( $\sigma_p$ )
- tažnost (A)

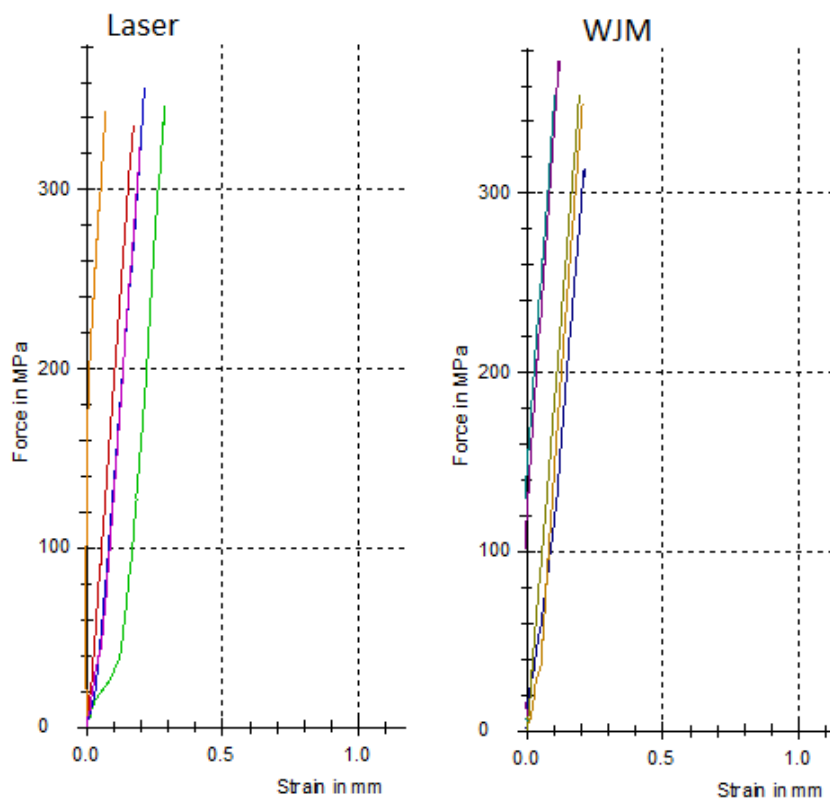
Naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze (Příloha P V). Porovnání průměrných hodnot modulu pružnosti v tahu, pevnosti v tahu a tažnosti je zobrazeno na *Obr. 80.* - *Obr. 82.* (chybové úsečky zobrazují směrodatnou odchylku).

Tahové diagramy jsou na *Obr. 77.* - *Obr. 79.*

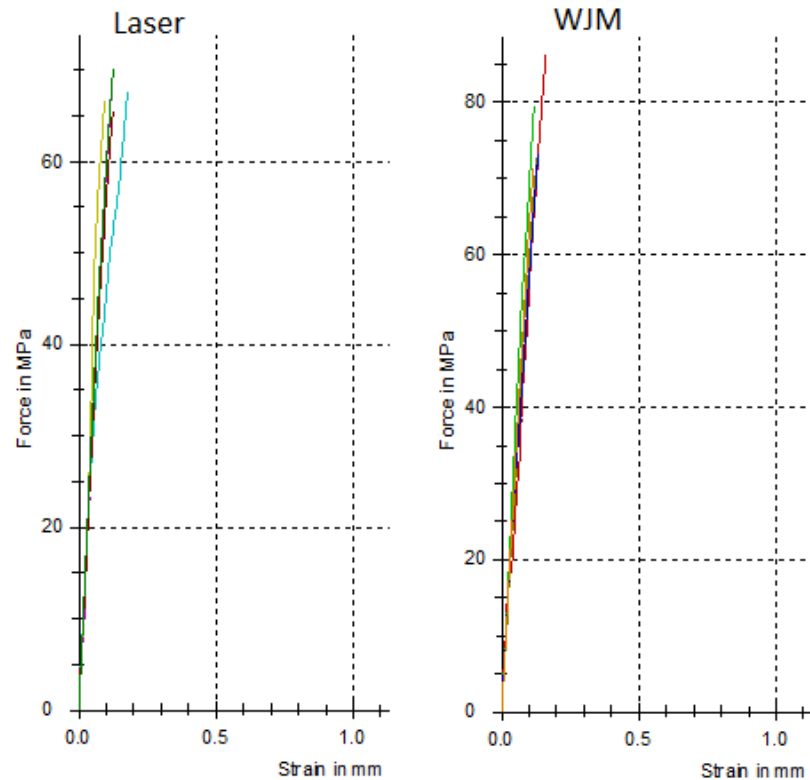




Obr. 77. Tahový diagram aramidového kompozitu



Obr. 78. Tahový diagram uhlíkového kompozitu

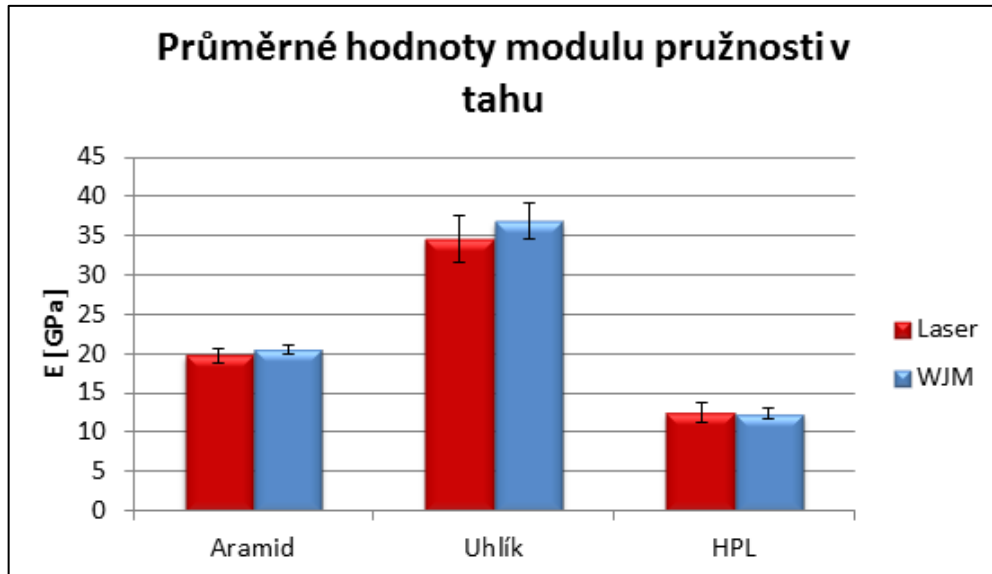


Obr. 79. Tahový diagram HPL kompozitu

### 10.1 Porovnání modulu pružnosti v tahu

Na níže uvedeném grafu (*Obr. 80.*) je porovnání naměřeného modulu pružnosti v tahu. Lze vidět, že technologie řezu má na zkušebních vzorcích zanedbatelný vliv na modul pružnosti v tahu. Největší rozdíl (6 %) je u uhlíkového kompozitu (laser 34,6 GPa, WJM 36,8 GPa). Aramidový kompozit má modul pružnosti v tahu 20 GPa a HPL laminát 12 GPa.

Modul pružnosti byl u aramidového kompozitu počítán z oblasti 0,4 – 0,8 %, u uhlíkového kompozitu a HPL laminátu z oblasti 0,1 – 0,4 % poměrného prodloužení.



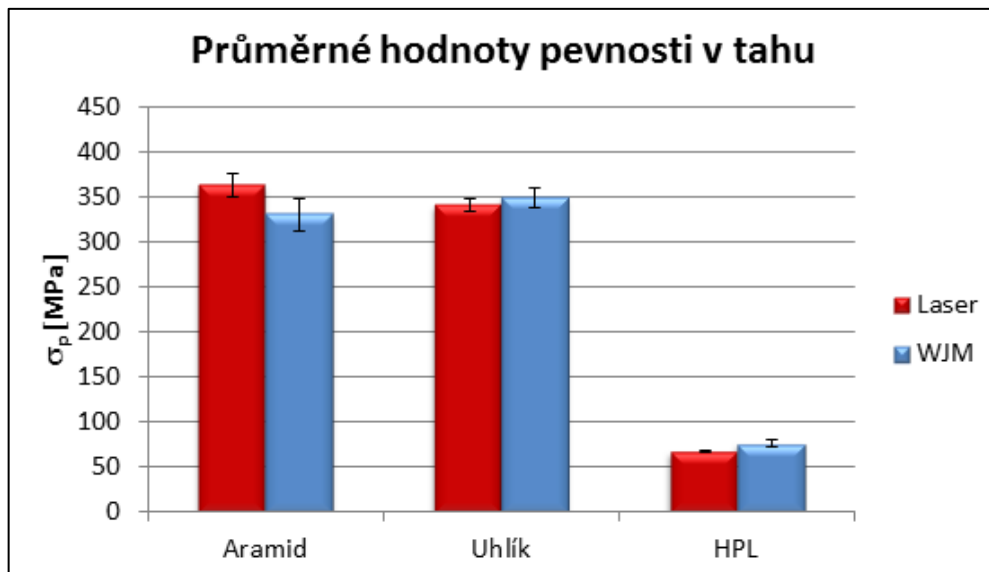
Obr. 80. Porovnání modulu pružnosti v tahu

## 10.2 Porovnání pevnosti v tahu

Porovnání pevnosti v tahu je uvedeno v *Obr. 81*. Největší procentuální rozdíl (12 %) je naměřen u HPL laminátu (laser 68 MPa, WJM 77 MPa). To je zřejmě způsobeno opálením podkladové vrstvy HPL laminátu od laseru. Podkladová vrstva je z kraftového papíru impregnovaného pryskyřicí a při řezu se okraj zřejmě poškodil (*Obr. 57*).

U aramidového kompozitu je rozdíl 9 % (laser 363 MPa, WJM 331 MPa). Nižší hodnota při řezu vodním paprskem může být způsobena různě povytahanými a vychýlenými vlákny z matrice, které se objevují při této technologii řezání.

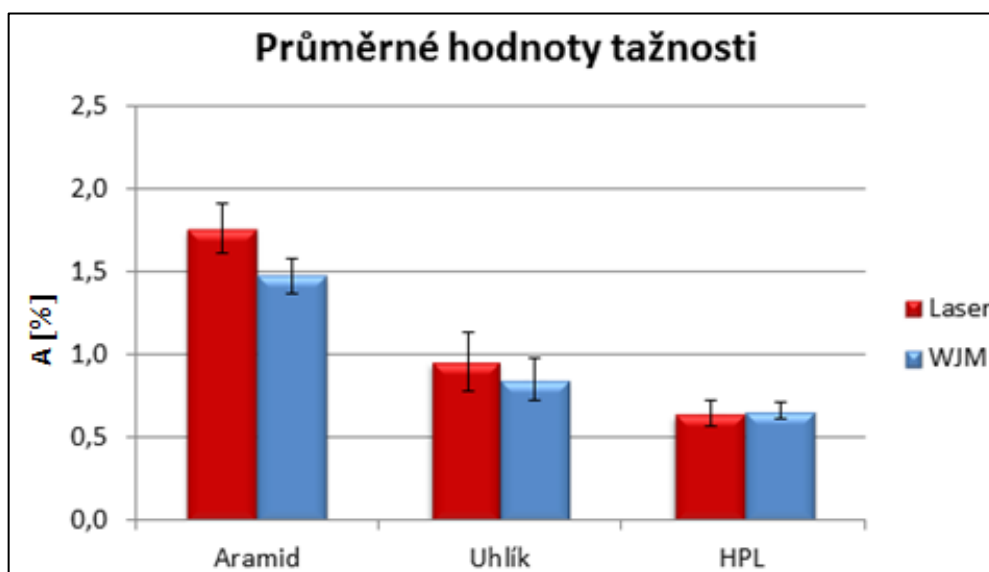
U uhlíkového kompozitu je rozdíl zanedbatelný (2%). Naměřená pevnost v tahu je při řezu laserem 342 MPa a při řezu vodním paprskem 349 MPa.



Obr. 81. Porovnání pevnosti v tahu

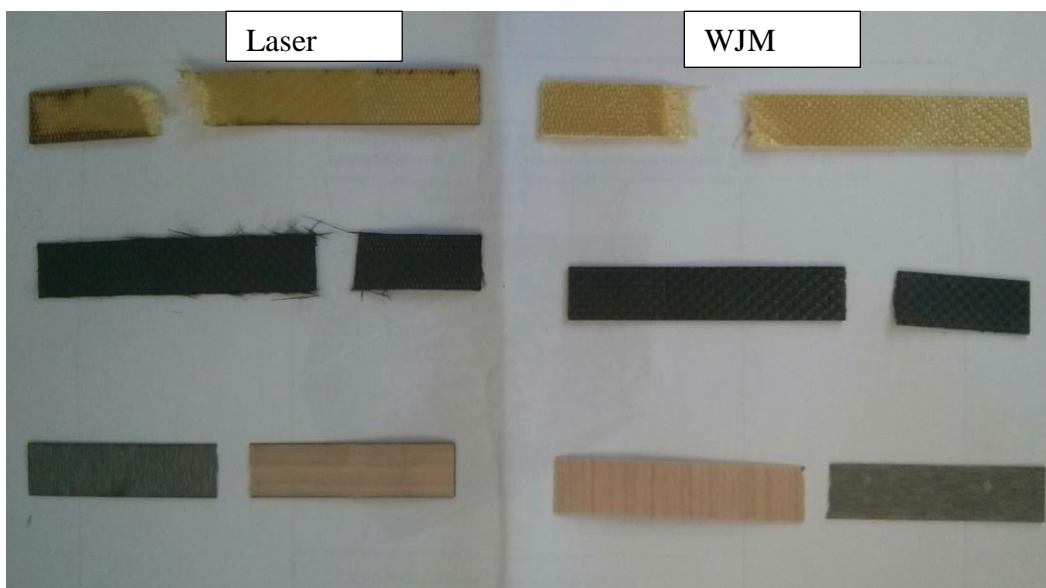
### 10.3 Porovnání tažnosti

Na Obr. 82. je uvedeno porovnání tažnosti vzorků (poměrné trvalé prodloužení vzorků po přetržení). U aramidového a uhlíkového kompozitu vykazují vyšší poměrné prodloužení vzorky řezané laserem. Rozdíl u aramidového kompozitu je 0,3 % (laser 1,8 %, WJM 1,5 %), u uhlíkového kompozitu je rozdíl 0,2 % (laser 1 %, WJM 0,8 %). U HPL laminátu je poměrné prodloužení 0,6 % u vzorků řezaných laserem a 0,7 % u vzorků řezaných vodním paprskem (WJM).



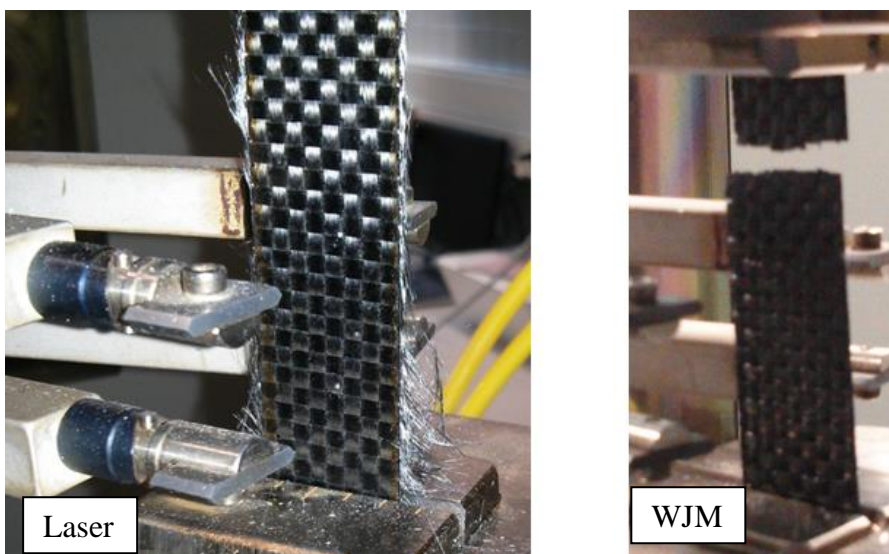
Obr. 82. Porovnání poměrného prodloužení na mezi pevnosti v tahu

Na Obr. 83. jsou vyfoceny vzorky po tahové zkoušce. Vlevo jsou vzorky vyřezané laserem, vpravo vodním paprskem (WJM).



Obr. 83. Ukázka vzorků po tahové zkoušce

Rozdíl mezi vzorky po tahové zkoušce lze vidět pouze u uhlíkového kompozitu. Na vzorcích vyřezaných laserem byly po roztržení vzorku „rozčepýřeny“ krajní vlákna. To je zřejmě způsobeno vypáleným pojivem na okraji řezu (Obr. 51.). Vypálené pojivo způsobí, že krajní vlákna již nejsou dostatečně fixována k matrici a po roztržení vzorku se uvolní. Na vzorcích vyřezaných vodním paprskem se okraj uhlíkového kompozitu po tahové zkoušce nezměnil (porovnání na následujícím obrázku).



Obr. 84. Uhlíkový kompozit po tahové zkoušce

## 11 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Úkolem je cenové srovnání mezi vyřezaným vzorkem pomocí laserového paprsku a mezi vzorkem vyřezaným vodním paprskem.

Zde je uveden výpočet pro aramidový kompozit:

Vstupní hodnoty (ceny uvedeny bez DPH):

- aramidová tkanina: 379,5 Kč/m<sup>2</sup>
- hmotnost aramidové tkaniny: 173 g/m<sup>2</sup>
- epoxidová pryskyřice L285: 569 Kč/kg
- ztráty epoxidové pryskyřice: cca 40 g
- tužidlo 285: 310 Kč/0,5 kg
- hmotnostní poměr pryskyřice s tužidlem: 100 : 40
- držák válečku: 25,5 Kč
- váleček: 18 Kč
- separační vosk Oskar's M700/C: 315 Kč/425g
- řez laserem: 300 Kč/m
- řez vodním paprskem bez abraziva: 40 Kč/m
- rozměry vzorku: 150 x 20 mm [43]

### Výpočet:

Rozměr aramidové tkaniny: 0,7 x 0,37 m

Potřebné množství tkaniny (6 vrstev):  $0,7 \cdot 0,37 \cdot 6 = 1,6 \text{ m}^2$ ,

Cena použité tkaniny:  $1,6 \cdot 379,5 = 607,2 \text{ Kč}$

Hmotnost použité pryskyřice:  $0,173 \cdot 1,6 = 0,277 \text{ kg}$ , po přičtení ztrát: 0,32 kg

Cena použité pryskyřice:  $0,32 \cdot 569 = 182,1 \text{ Kč}$

Hmotnost použitého tužidla:  $0,32 \cdot 0,4 = 0,13 \text{ kg}$

Cena použitého tužidla:  $(0,13 \cdot 310)/0,5 = 80,6 \text{ Kč}$

Množství použitého vosku (odhad): 30 g

Cena použitého vosku:  $(30 \cdot 315)/425 = 22,3 \text{ Kč}$

Cena vyrobené aramidové desky: tkanina + pryskyřice + tužidlo + vosk + držák válečku + váleček:  $607,2 + 182,1 + 80,6 + 22,3 + 25,5 + 18 = 935,7$  Kč

Použitelná plocha vyrobené desky (nepoužitelné cca 2 cm od každého okraje):

$$0,66 \cdot 0,33 = 0,21 \text{ m}^2$$

$$\text{Plocha vyřezaného vzorku: } 0,15 \cdot 0,02 = 0,003 \text{ m}^2$$

$$\text{Cena plochy vzorku na vyrobené desce: } (0,003 \cdot 935,7)/0,21 = \underline{13,4 \text{ Kč}}$$

$$\text{Obvod vyřezaného vzorku: } 0,15 + 0,15 + 0,02 + 0,02 = 0,34 \text{ m}$$

$$\text{Cena za vyřezání 1 vzorku laserem: } 0,34 \cdot 300 = \underline{102 \text{ Kč}}$$

$$\text{Cena za vyřezání 1 vzorku vodním paprskem: } 0,34 \cdot 40 = \underline{13,6 \text{ Kč}}$$

$$\text{Celková cena 1 aramidového vzorku vyřezaného laserem: } 13,4 + 102 = \underline{115,4 \text{ Kč}}$$

$$\text{Celková cena 1 aramidového vzorku vyřezaného vodním paprskem: } 13,4 + 13,6 = \underline{27 \text{ Kč}}$$

## ZÁVĚR

V této diplomové práci byl zkoumán vliv technologie řezu laserem a vodním paprskem na kompozitní materiály.

První část teoretické části popisuje kompozitní materiály (vlastnosti, rozdělení). V druhé části je popsána výroba kompozitních materiálů (rozdělení technologií výroby). Třetí část teoretické části popisuje řezání materiálů laserem a vodním paprskem.

Úkolem praktické části bylo vyřezat vzorky z kompozitů pro experiment. Na vyřezaných vzorcích z aramidového a uhlíkového kompozitu a HPL laminátu byl zkoumán vzhled řezu. Dále se měřily parametry drsnosti řezu Ra a Rz, šířka řezné mezery a vliv technologie řezu na mechanické vlastnosti.

Vzhled vzorků po řezu je detailně popsán v 7. kapitole. Řez laserem vypadá u všech zkoumaných materiálů pod mikroskopem vždy hladší, než řez vodním paprskem. Problém je ale s okolím řezu, kde se vyskytuje opálení pojiva od laseru. To se nejvýrazněji projevilo na vzhledu okolí řezu u aramidového kompozitu, kde se na spodní straně vzorku vyskytují výrazné hnědé oblasti zdegradovaného pojiva. U uhlíkového kompozitu se tento výskyt projevil v menší míře. U HPL laminátu se opálení pohledové strany téměř nevyskytuje, zatímco na podkladové straně vidět jde.

Po řezu vodním paprskem je u aramidového kompozitu a HPL laminátu mnohem členitější povrch oproti řezu laserem, zatímco u uhlíkového kompozitu nikoliv. Okolí řezu vypadá vzhledově u všech materiálů lépe než po řezu laserem. Pouze u okraje řezu HPL laminátu se vyskytují malé vylomené části ochranné krycí a dekorativní vrstvy. U aramidového kompozitu se na spodní hraně vzorku po řezu vodním paprskem vyskytuje v některých místech drobné vychýlení aramidových vláken z pojiva. Tento výskyt se u uhlíkového kompozitu nenachází.

Měření drsnosti řezu ukázalo, že parametry drsnosti Ra a Rz jsou u všech materiálů vždy nižší při řezu laserem. U HPL laminátu je rozdíl nejvýraznější, Ra 2,1  $\mu\text{m}$  a Rz 11,5  $\mu\text{m}$  u řezu laserem oproti Ra 9,4  $\mu\text{m}$  a Rz 56  $\mu\text{m}$  u řezu vodním paprskem. U uhlíkového kompozitu je naměřeno Ra 2,2  $\mu\text{m}$  a Rz 12,5  $\mu\text{m}$  u řezu laserem a Ra 5,8  $\mu\text{m}$  a Rz 30  $\mu\text{m}$  u řezu vodním paprskem. Nejmenší rozdíl je u aramidového kompozitu, Ra 5,8  $\mu\text{m}$  a Rz 34  $\mu\text{m}$  u řezu laserem oproti Ra 6,6  $\mu\text{m}$  a Rz 37  $\mu\text{m}$  u řezu vodním paprskem.



Měření šířky řezné mezery  $t$  ukázalo, že větší šířka řezu je u všech zkoumaných materiálů při řezání laserem. Největší rozdíl je u aramidového kompozitu, kdy při řezu laserem je šířka řezu  $t = 0,45$  mm oproti  $t = 0,03$  mm u řezu vodním paprskem. U HPL laminátu je při řezu laserem  $t = 0,35$  mm oproti  $t = 0,08$  mm u řezu vodním paprskem. U uhlíkového kompozitu je při řezu laserem  $t = 0,28$  mm oproti  $t = 0,16$  mm u řezu vodním paprskem.

Hodnoty, naměřené tahovou zkouškou (modul pružnosti, pevnost v tahu a tažnost), jsou podobné u vzorků vyřezanými laserem a vodním paprskem. Ovšem u vzorků z uhlíkového kompozitu se po roztrhnutí „rozčepýřily“ krajní vlákna v důsledku vypáleného pojiva u okraje řezu. U ostatních materiálů se tyto negativní jevy neprojeví.

Poslední kapitolou praktické části je ekonomického zhodnocení, ze kterého vyplývá, že řez laserovým paprskem je ve srovnání s vodním paprskem mnohem dražší. Řez 1 m řezu laserovým paprskem stál 300 Kč, zatímco 1 m řezu vodním paprskem (bez abraziva) stál 40 Kč.

Z těchto výsledků lze usoudit, že pro aramidový kompozit je lepší volbou technologie řezání vodní paprsek – lepší vzhled pojiva u okraje řezu, mnohem menší šířka a cena řezu při téměř stejných hodnotách parametrů drsnosti  $R_a$ ,  $R_z$  jako při řezu laserem. Nevýhodou jsou vyskytující se malé otřepy na hranách řezu, které se po řezu laserem nevyskytují.

U uhlíkového kompozitu a HPL laminátu nelze jednoznačně prohlásit jednu technologii řezání za lepší, záleží na konkrétních požadavcích na vyřezané díly.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [2] SKOČOVSKÝ, Petr, Petr PALČEK, Radomila KONEČNÁ a Ladislav VÁRKOLY. *Konstrukční materiály*. 1. vydání. Žilina: Žilinská Univerzita, 2000. ISBN 80-7100-608-4.
- [3] KOŘÍNEK, Zdeněk. *Kompozity* [online]. [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: <http://mujweb.cz/zkorinek/>
- [4] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003. ISBN 8021424435.
- [5] *Kompozitní materiály* [online]. DAĐOUREK, Karel. Technická univerzita v Liberci, 2010 [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: [http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady\\_kmt\\_bakalari/ZMI/06kompozityzmi.pdf](http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_bakalari/ZMI/06kompozityzmi.pdf)
- [6] *Kompozitní materiály - definice a rozdělení* [online]. DAĐOUREK, Karel. Technická univerzita v Liberci, 2008 [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: [http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady\\_kmt\\_magistri/KM/Kompozity%20Dad/02defrozd.pdf](http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/KM/Kompozity%20Dad/02defrozd.pdf)
- [7] *Fiber - Metal Composite Materials* [online]. [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19660022065.pdf>
- [8] *Ocel plná bublinek* [online]. [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: [http://www.tajemstvi-vedy.cz/ocel\\_plna\\_bublinek](http://www.tajemstvi-vedy.cz/ocel_plna_bublinek)
- [9] BAZYLAK, Liliya I., Gennady E. ZAIKOV a A. K. HAGHI. *Polymers and polymeric composites: properties, optimization, and applications*. 1st edition. Apple Academic Press, 2014. ISBN 9781771880497.
- [10] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Vyd. 1. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN 80-7080-568-4.
- [11] *Kompozitní materiály* [online]. [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: <http://tpm.fsv.cvut.cz/vyuka/main/MI11.pdf>

- [12] VRBKA, Jan. *Mechanika kompozitů* [online]. Brno, 2008 [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/priloha.php?dpid=83340](https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=83340)
- [13] *Casemodding: Kompozitní zážrak - laminát* [online]. [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: [http://pctuning.tyden.cz/navody/upravy-modding/12243-casemodding-kompozitni\\_zazrak-laminat](http://pctuning.tyden.cz/navody/upravy-modding/12243-casemodding-kompozitni_zazrak-laminat)
- [14] KRISHAN KUMAR CHAWLA. *Composite materials science and engineering*. 3rd ed. New York: Springer, 2012. ISBN 9780387743653.
- [15] *Modelling of woven composites* [online]. [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: <http://www.xcomposites.com/woven.html>
- [16] *The Space Between – Additive Manufacturing for Building the Ideal Void* [online]. GLADYSZ, Gary a Krishan K. CHAWLA. 2014 [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: <http://scitechconnect.elsevier.com/space-additive-manufacturing-building-ideal-void/>
- [17] *Kompozitní materiály* [online]. [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: [http://www.ateam.zcu.cz/download/kompozity09\\_10.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/download/kompozity09_10.pdf)
- [18] *Kompozitní materiály* [online]. [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: [http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/6\\_kompozitni-materialy.pdf](http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/6_kompozitni-materialy.pdf)
- [19] *Vývoj materiálů z českých luhů a hájů počítá i s ovčí vlnou a bambusem* [online]. 2014 [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: <http://www.materialtimes.com/vsimame-si/vyvoj-materialu-z-ceskych-luhu-a-haju-pocita-i-s-ovci-vlnou-a-bambusem.html>
- [20] *Výroba rotorového listu větrné elektrárny* [online]. [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/en/clanky/vyroba-rotoroveho-listu-vetrne-elektrarny/315#prettyPhoto>
- [21] *Technologie výroby kompozitů* [online]. [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/76-Technologie-jejich-popis-a-schemata.html>
- [22] *Resin transfer moulding* [online]. [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: [http://www.nuplex.com/composites/getmedia/e8e6ac3a-e002-4189-ba1e-52e1ac8321f7/Process\\_resintransfermolding?width=400&height=233](http://www.nuplex.com/composites/getmedia/e8e6ac3a-e002-4189-ba1e-52e1ac8321f7/Process_resintransfermolding?width=400&height=233)

- [23] *Pultrusion Method* [online]. [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: <http://unipullc.com/about-us/pultrusion-method.htm>
- [24] *High-Pressure vs. Low-Pressure Laminate Furniture* [online]. DOLL, Jerry. 2012 [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: <http://www.novadesk.com/blog/bid/50596/High-Pressure-vs-Low-Pressure-Laminate-Furniture>
- [25] *Lamináty pro truhláře: Časté dotazy* [online]. [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: <http://www.laminatyprotruhlare.cz/caste-dotazy/caste-dotazy.aspx>
- [26] *Laminate Industry (Overlay)* [online]. [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: <http://www.mbpapers.com/products/laminate-industry-overlay/>
- [27] *Nástroje pro obrábění kompozitních materiálů* [online]. SEDLÁČEK, Jan. 2006 [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nastroje-pro-obrabeni-kompozitnich-materialu.html>
- [28] *Laserové technologie v praxi* [online]. LAPŠANSKÁ, Hana. Univerzita Palackého v Olomouci, 2010 [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf>
- [29] MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie*. 1. vyd. Košice: Viena, 2000. ISBN 8070994304.
- [30] GELETA, Vojtech. *Progresívne technológie obrábania*. Bratislava: Slovenská technická Univerzita, 2013. ISBN 9788022739979.
- [31] *Seriál na téma lasery - Základní princip laseru a jejich dělení* [online]. KOŘÁN, Pavel. 2011 [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
- [32] *Laser Systems for Optical Microscopy* [online]. [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: <http://www.olympusmicro.com/primer/techniques/microscopylasers.html>
- [33] *Seriál na téma lasery - Hlavní typy laseru používaných v průmyslu* [online]. KOŘÁN, Pavel. 2013 [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
- [34] *Interakce laserů s materiálem* [online]. [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: [https://is.muni.cz/el/1431/jaro2009/C6251/lasery\\_L1\\_1\\_.ppt](https://is.muni.cz/el/1431/jaro2009/C6251/lasery_L1_1_.ppt)

- [35] *Průmyslové lasery (5) - Laserové řezání* [online]. KOŘÁN, Pavel. 2012 [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-5-laserove-rezani.html>
- [36] *Co rozhoduje při volbě typu laseru* [online]. RÜTERING, Marus. 2011 [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/co-rozhoduje-pri-volbe-typu-laseru.html>
- [37] *Seriál na téma lasery - Laserové řezání (laser cutting)* [online]. KOŘÁN, Pavel. 2013 [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-rezani-laser-cutting-129>
- [38] *Laminační pryskyřice L285, Tužidla 285, 286, 287* [online]. [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/proddocs/TL%20L%20285%20MGS%20a%20tuz%20CZ.pdf>
- [39] *Laminating resin L 285, Hardener 500* [online]. [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: [http://www.havel-composites.com/proddocs/techlist\\_01020403340tech.listL285+H500.pdf](http://www.havel-composites.com/proddocs/techlist_01020403340tech.listL285+H500.pdf)
- [40] SEDLÁČEK, Jan. *Efektivní obrábění vláknově vyztužených kompozitních materiálů*. Brno, 2010. Dostupné také z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=23996](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=23996). Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně,. Vedoucí práce Doc. Ing. Anton HUMÁR, CSc.
- [41] MAZUMDAR, Sanjay K. *Composites manufacturing: materials, product, and process engineering / Sanjay K. Mazumdar*. Boca Raton, Fla.: CRC Press, c2002. ISBN 0849305853.
- [42] *Testování hypotéz ve statistice* [online]. [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: <http://cit.vfu.cz/statpotr/POTR/Teorie/Predn3/hypotezy.htm>
- [43] *Havel-composites* [online]. [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

|                 |  |
|-----------------|--|
| A               | Tažnost                                |
| AWJM            | Obrábění abrazivním vodním paprskem    |
| CLA             | Chromatická aberace                    |
| CO <sub>2</sub> | Oxid uhličitý                          |
| CoefVar         | Variační koeficient                    |
| ČSN             | Česká státní norma                     |
| E               | Modul pružnosti v tahu                 |
| E <sub>1</sub>  | Základní energetická hladina           |
| E <sub>2</sub>  | Vyšší energetická hladina              |
| EN              | Evropská norma                         |
| FPS             | Snímková frekvence                     |
| H <sub>0</sub>  | Nulová hypotéza                        |
| H <sub>A</sub>  | Alternativní hypotéza                  |
| HPL             | Vysokotlaký laminát                    |
| ISO             | Mezinárodní organizace pro normalizaci |
| IQR             | Interkvartilové rozpětí                |
| Mean            | Aritmetický průměr výběrového souboru  |
| n               | Počet měření                           |
| N               | Základní soubor                        |
| Nd              | Neodym                                 |
| P–Value         | Testovací kritérium                    |
| PA              | Polyamid                               |
| PE              | Polyethylen                            |
| PVC             | Polyvinylchlorid                       |

|                |  |
|----------------|--|
| PS             | Polystyren   |
| PU             | Polyuretan   |
| PMMA           | Polymethylmethakrylát  |
| Q1             | 1. Kvartil   |
| Q3             | 3. Kvartil   |
| Ra             | Průměrná aritmetická úchylka profilu v rozsahu základní délky  |
| Range          | Variační rozpětí   |
| Rz             | Největší výška profilu v rozsahu základní délky                |
| s              | Směrodatná odchylka výběrového souboru                         |
| s <sup>2</sup> | Rozptyl výběrového souboru                                     |
| SE Mean        | Nejistota měření typu A výběrového souboru                     |
| STDev          | Směrodatná odchylka  |
| SXGA           | Rozlišení displeje 1280 × 1024 (Super eXtended Graphics Array) |
| t              | Šířka řezné mezery   |
| Tex            | Hmotnost 1 km vlákna v gramech                                 |
| u <sub>a</sub> | Nejistota měření typu A výběrového souboru                     |
| USB            | Univerzální sériová sběrnice (Universal Serial Bus)            |
| v              | Variační koeficient  |
| Variance       | Rozptyl výběrového souboru                                     |
| WJM            | Obrábění vodním paprskem                                       |
| $\bar{x}$      | Aritmetický průměr výběrového souboru                          |
| YAG            | Yttrium aluminium granát                                       |
| $\alpha$       | Hladina významnosti  |
| $\mu$          | Aritmetický průměr základního souboru                          |
| $\mu\text{m}$  | Mikrometr  |

|            |  |
|------------|--|
| $\sigma$   | Směrodatná odchylka základního souboru |
| $\sigma^2$ | Rozptyl základního souboru             |
| $\sigma_p$ | Pevnost v tahu                         |



## SEZNAM OBRÁZKŮ

|  |    |
|--|----|
| <i>Obr. 1. Použití kompozitů u raketoplánu [5]</i> .....   | 12 |
| <i>Obr. 2. Synergický efekt [6]</i> .....  | 13 |
| <i>Obr. 3. Odklonění směru šíření trhliny a tření při deformaci kompozitu [10]</i> .....             | 13 |
| <i>Obr. 4. Schématické znázornění deformace vlákna, matrice a kompozitu ve 4 úsecích [7]</i> .....   | 14 |
| <i>Obr. 5. Kovová pěna [8]</i> .....   | 15 |
| <i>Obr. 6. Schéma složení kompozitu [9]</i> .....  | 16 |
| <i>Obr. 7. Rozdělení kompozitů podle výztuže [10]</i> .....  | 16 |
| <i>Obr. 8. Orientace vláken v kompozitu [12]</i> .....   | 17 |
| <i>Obr. 9. Vláknité výztuže - roving, rohož a tkanina [13, 14]</i> .....                             | 17 |
| <i>Obr. 10. Druhy vazeb tkanin – plátnová (plain), keprová (twill) a atlasová (satin) [15]</i> ..... | 18 |
| <i>Obr. 11. Sendvič s voštinovým jádrem [16]</i> .....   | 18 |
| <i>Obr. 12. Struktura skleněného vlákna [1]</i> .....  | 20 |
| <i>Obr. 13. Struktura uhlíkového vlákna [1]</i> .....  | 20 |
| <i>Obr. 14. Aramidové vlákno s roztřepením v místě lomu [1]</i> .....                                | 21 |
| <i>Obr. 15. Mikroskopický snímek vlákna lnu [19]</i> .....   | 22 |
| <i>Obr. 16. Porovnání tahové zkoušky různých matric a uhlíkového vlákna [18]</i> .....               | 23 |
| <i>Obr. 17. Princip ručního laminování [20]</i> .....  | 27 |
| <i>Obr. 18. Princip nanášení sprejem [21]</i> .....  | 28 |
| <i>Obr. 19. Princip vysokotlakého vstřikování [22]</i> .....   | 29 |
| <i>Obr. 20. Princip pultruze [23]</i> .....  | 29 |
| <i>Obr. 21. Princip navíjení [21]</i> .....  | 30 |
| <i>Obr. 22. Princip lisování vakuem [21]</i> .....   | 31 |
| <i>Obr. 23. Schéma HPL laminátu [26]</i> .....   | 31 |
| <i>Obr. 24. Stimulovaná emise (22)</i> .....   | 33 |
| <i>Obr. 25. Princip laseru [31]</i> .....  | 34 |
| <i>Obr. 26. Součásti laseru [28]</i> .....   | 34 |
| <i>Obr. 27. Expander laseru [32]</i> .....   | 35 |
| <i>Obr. 28. Základní průmyslové lasery [33]</i> .....  | 35 |

|   |    |
|---|----|
| <i>Obr. 29. Vliv jakosti povrchu na odrazivost [34]</i> .....                             | 36 |
| <i>Obr. 30. Graf absorpce materiálu v závislosti na vlnové délce [35]</i> .....           | 37 |
| <i>Obr. 31. Doporučený výběr laseru pro určitý materiál [29]</i> .....                    | 37 |
| <i>Obr. 32. Princip řezání laserem [37]</i> .....   | 39 |
| <i>Obr. 33. Schéma dýzy pro WJM (vlevo) a pro AWJM (vpravo) [29]</i> .....                | 40 |
| <i>Obr. 34. Hlavní prvky zařízení vodního paprsku [29]</i> .....                          | 41 |
| <i>Obr. 35. Povrch po řezání AWJM [29]</i> .....  | 41 |
| <i>Obr. 36. Separáční vosk</i> .....  | 46 |
| <i>Obr. 37. Povrch formy opatřený separáčn m voskem</i> .....                             | 46 |
| <i>Obr. 38. Ustřižený kus aramidov  tkaniny</i> .....                                     | 47 |
| <i>Obr. 39. Ruční laminování aramidov  tkaniny</i> .....                                  | 48 |
| <i>Obr. 40. Ukázka vyřezaných vzorků – vlevo laserem, vpravo vodním paprskem</i> .....    | 49 |
| <i>Obr. 41. Vzhled řezu kompozitů</i> .....   | 50 |
| <i>Obr. 42. Řez kompozitu kotoučovou pilou</i> .....                                      | 50 |
| <i>Obr. 43. Zkoumání řezu mikroskopem</i> .....   | 51 |
| <i>Obr. 44. Aramidov  kompozit řezaný laserem</i> .....                                   | 52 |
| <i>Obr. 45. Horní a spodní hrana aramidového kompozitu řezaného laserem</i> .....         | 53 |
| <i>Obr. 46. Horní a spodní strana aramidového kompozitu řezaného laserem</i> .....        | 53 |
| <i>Obr. 47. Aramidov  kompozit řezaný vodním paprskem</i> .....                           | 54 |
| <i>Obr. 48. Horní a spodní hrana aramidového kompozitu řezaného vodním paprskem</i> ..... | 55 |
| <i>Obr. 49. Spodní strana aramidového kompozitu řezaného vodním paprskem</i> .....        | 55 |
| <i>Obr. 50. Uhlíkov  kompozit řezaný laserem</i> .....                                    | 56 |
| <i>Obr. 51. Horní a spodní hrana uhlíkového kompozitu řezaného laserem</i> .....          | 57 |
| <i>Obr. 52. Spodní strana uhlíkového kompozitu řezaného laserem</i> .....                 | 58 |
| <i>Obr. 53. Spodní strana uhlíkového kompozitu (desky) řezaného laserem</i> .....         | 58 |
| <i>Obr. 54. Uhlíkov  kompozit řezaný vodním paprskem</i> .....                            | 59 |
| <i>Obr. 55. Horní a spodní hrana uhlíkového kompozitu řezaného vodním paprskem</i> .....  | 60 |
| <i>Obr. 56. HPL laminát řezaný laserem</i> .....  | 61 |
| <i>Obr. 57. Horní a spodní hrana HPL laminátu řezaného laserem</i> .....                  | 62 |
| <i>Obr. 58. HPL laminát řezaný vodním paprskem</i> .....                                  | 63 |
| <i>Obr. 59. Horní a spodní hrana HPL laminátu řezaného vodním paprskem</i> .....          | 64 |
| <i>Obr. 60. Drsnoměr Talysurf CLI 500</i> .....   | 65 |
| <i>Obr. 61. Parametry měření</i> .....  | 66 |

|  |           |
|--|-----------|
| <i>Obr. 62. Vyloučené měření .....</i>   | <i>66</i> |
| <i>Obr. 63. Měření z programu TalyMap Gold (Uhlík – laser) .....</i>             | <i>67</i> |
| <i>Obr. 64. Popisná charakteristika naměřených hodnot parametrů Ra a Rz.....</i> | <i>68</i> |
| <i>Obr. 65. Boxplot diagram parametru Ra u aramidového kompozitu .....</i>       | <i>71</i> |
| <i>Obr. 66. Boxplot diagram parametru Rz u aramidového kompozitu.....</i>        | <i>72</i> |
| <i>Obr. 67. Boxplot diagram parametru Ra u uhlíkového kompozitu.....</i>         | <i>72</i> |
| <i>Obr. 68. Boxplot diagram parametru Rz u uhlíkového kompozitu .....</i>        | <i>73</i> |
| <i>Obr. 69. Boxplot diagram parametru Ra u HPL laminátu .....</i>                | <i>73</i> |
| <i>Obr. 70. Boxplot diagram parametru Rz u HPL laminátu .....</i>                | <i>74</i> |
| <i>Obr. 71. Průměrné hodnoty paramteru Ra .....</i>                              | <i>74</i> |
| <i>Obr. 72. Průměrné hodnoty paramteru Rz .....</i>                              | <i>75</i> |
| <i>Obr. 73. Aramidová deska po vyřezání vzorků vodním paprskem.....</i>          | <i>76</i> |
| <i>Obr. 74. Posuvné měřítko CD-15CXR s kontrolním certifikátem.....</i>          | <i>77</i> |
| <i>Obr. 75. Porovnání šířky řezné mezery .....</i>                               | <i>78</i> |
| <i>Obr. 76. Stroj Zwick 1456 s pneumatickými čelistmi .....</i>                  | <i>79</i> |
| <i>Obr. 77. Tahový diagram aramidového kompozitu .....</i>                       | <i>81</i> |
| <i>Obr. 78. Tahový diagram uhlíkového kompozitu.....</i>                         | <i>81</i> |
| <i>Obr. 79. Tahový diagram HPL kompozitu.....</i>                                | <i>82</i> |
| <i>Obr. 80. Porovnání modulu pružnosti v tahu .....</i>                          | <i>83</i> |
| <i>Obr. 81. Porovnání pevnosti v tahu .....</i>                                  | <i>84</i> |
| <i>Obr. 82. Porovnání poměrného prodloužení na mezi pevnosti v tahu .....</i>    | <i>84</i> |
| <i>Obr. 83. Ukázka vzorků po tahové zkoušce .....</i>                            | <i>85</i> |
| <i>Obr. 84. Uhlíkový kompozit po tahové zkoušce .....</i>                        | <i>85</i> |

**SEZNAM TABULEK**

|  |    |
|--|----|
| <i>Tab. 1. Složení a vlastnosti jednotlivých sklovin [1].....</i>    | 19 |
| <i>Tab. 2. Vlastnosti aramidových vláken [1].....</i>                | 21 |
| <i>Tab. 3. Srovnání vyztužených termoplastů a termosetů [1].....</i> | 24 |
| <i>Tab. 4. Specifikace okuláru AM423B .....</i>                      | 51 |
| <i>Tab. 5. Specifikace přístroje Talysurf CLI 500.....</i>           | 65 |
| <i>Tab. 6. Testování hypotéz pomocí F-testu .....</i>                | 70 |
| <i>Tab. 7. Testování hypotéz pomocí T-testu.....</i>                 | 71 |
| <i>Tab. 8. Specifikace Zwick 1456 .....</i>                          | 80 |

## SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA P I: NAMĚŘENÉ HODNOTY Ra, Rz ARAMIDOVÉHO KOMPOZITU

PŘÍLOHA P II: NAMĚŘENÉ HODNOTY Ra, Rz UHLÍKOVÉHO KOMPOZITU

PŘÍLOHA P III: NAMĚŘENÉ HODNOTY Ra, Rz HPL LAMINÁTU

PŘÍLOHA P IV: NAMĚŘENÉ HODNOTY K ŘEZNÉ MEZEŘE

PŘÍLOHA P V: NAMĚŘENÉ HODNOTY TAHOVÉ ZKOUŠKY

PŘÍLOHA P VI: SPECIFIKACE EPOXIDOVÉ PRYSKYŘICE L285 A TUŽIDLA 285

**PŘÍLOHA P I: NAMĚŘENÉ HODNOTY Ra, Rz ARAMIDOVÉHO KOMPOZITU**

| Aramidový kompozit |                      |                      |                      |                      |
|--------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| n                  | Laser                |                      | Vodní paprsek        |                      |
|                    | Ra [ $\mu\text{m}$ ] | Rz [ $\mu\text{m}$ ] | Ra [ $\mu\text{m}$ ] | Rz [ $\mu\text{m}$ ] |
| 1                  | 5,92                 | 37,9                 | 5,90                 | 31,3                 |
| 2                  | 5,99                 | 36,9                 | 10,20                | 46,9                 |
| 3                  | 4,37                 | 28,5                 | 8,51                 | 48,6                 |
| 4                  | 6,52                 | 35,7                 | 11,30                | 52,3                 |
| 5                  | 6,29                 | 46,8                 | 4,47                 | 25,3                 |
| 6                  | 5,74                 | 30,2                 | 9,40                 | 46,7                 |
| 7                  | 4,53                 | 25,2                 | 6,16                 | 40,3                 |
| 8                  | 6,83                 | 43,4                 | 3,46                 | 16,1                 |
| 9                  | 4,89                 | 28,2                 | 4,29                 | 23,9                 |
| 10                 | 4,59                 | 22,0                 | 4,46                 | 22,8                 |
| 11                 | 6,78                 | 35,9                 | 4,88                 | 22,2                 |
| 12                 | 7,23                 | 32,0                 | 9,05                 | 49,6                 |
| 13                 | 8,96                 | 54,8                 | 6,16                 | 40,3                 |
| 14                 | 5,94                 | 33,5                 | 3,43                 | 17,6                 |
| 15                 | 6,64                 | 45,2                 | 4,05                 | 23,9                 |
| 16                 | 3,65                 | 20,7                 | 10,00                | 69,8                 |
| 17                 | 4,65                 | 23,2                 | 8,26                 | 46,7                 |
| 18                 | 5,06                 | 25,8                 | 5,43                 | 34,0                 |
| $\bar{x}$          | 5,81                 | 33,7                 | 6,63                 | 36,6                 |
| s                  | 1,28                 | 9,4                  | 2,58                 | 14,7                 |
| $u_a$              | 0,30                 | 2,2                  | 0,61                 | 3,5                  |
| v [%]              | 22,10                | 27,9                 | 38,85                | 40,1                 |

## PŘÍLOHA P II: NAMĚŘENÉ HODNOTY Ra, Rz UHLÍKOVÉHO KOMPozITU

| Uhlíkový kompozit |                      |                      |                      |                      |
|-------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| n                 | Laser                |                      | Vodní paprsek        |                      |
|                   | Ra [ $\mu\text{m}$ ] | Rz [ $\mu\text{m}$ ] | Ra [ $\mu\text{m}$ ] | Rz [ $\mu\text{m}$ ] |
| 1                 | 2,95                 | 20,1                 | 5,65                 | 35,6                 |
| 2                 | 1,95                 | 11,1                 | 5,01                 | 30,6                 |
| 3                 | 2,04                 | 12,2                 | 5,74                 | 29,8                 |
| 4                 | 1,69                 | 11,5                 | 3,39                 | 18,5                 |
| 5                 | 1,82                 | 10,4                 | 6,28                 | 26,4                 |
| 6                 | 1,71                 | 10,6                 | 5,33                 | 28,1                 |
| 7                 | 1,60                 | 8,6                  | 5,54                 | 30,8                 |
| 8                 | 2,05                 | 10,9                 | 5,54                 | 22,8                 |
| 9                 | 2,57                 | 14,8                 | 6,46                 | 35,8                 |
| 10                | 2,52                 | 11,4                 | 7,18                 | 37,0                 |
| 11                | 2,60                 | 16,2                 | 4,56                 | 24,6                 |
| 12                | 1,94                 | 11,2                 | 6,23                 | 32,0                 |
| 13                | 2,28                 | 11,8                 | 6,49                 | 32,5                 |
| 14                | 2,52                 | 14,1                 | 6,16                 | 29,7                 |
| 15                | 1,65                 | 8,7                  | 6,71                 | 33,6                 |
| 16                | 2,97                 | 13,2                 | 5,87                 | 35,3                 |
| 17                | 2,81                 | 17,5                 | 6,08                 | 32,1                 |
| 18                | 2,07                 | 10,0                 | 6,07                 | 32,1                 |
| $\bar{x}$         | 2,21                 | 12,5                 | 5,79                 | 30,4                 |
| s                 | 0,46                 | 3,0                  | 0,86                 | 4,9                  |
| $u_a$             | 0,11                 | 0,7                  | 0,20                 | 1,1                  |
| v [%]             | 20,66                | 24,5                 | 14,92                | 16,0                 |

### PŘÍLOHA P III: NAMĚŘENÉ HODNOTY Ra, Rz HPL LAMINÁTU

| HPL laminát |                      |                      |                      |                      |
|-------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| n           | Laser                |                      | Vodní paprsek        |                      |
|             | Ra [ $\mu\text{m}$ ] | Rz [ $\mu\text{m}$ ] | Ra [ $\mu\text{m}$ ] | Rz [ $\mu\text{m}$ ] |
| 1           | 1,94                 | 10,6                 | 10,40                | 69,4                 |
| 2           | 1,30                 | 7,2                  | 9,46                 | 57,9                 |
| 3           | 1,18                 | 6,9                  | 8,67                 | 42,6                 |
| 4           | 1,63                 | 8,3                  | 8,25                 | 46,1                 |
| 5           | 1,60                 | 8,6                  | 8,11                 | 43,8                 |
| 6           | 2,05                 | 10,9                 | 10,40                | 64,4                 |
| 7           | 2,57                 | 14,8                 | 15,60                | 84,7                 |
| 8           | 2,52                 | 11,4                 | 13,30                | 78,9                 |
| 9           | 2,60                 | 16,2                 | 8,16                 | 54,9                 |
| 10          | 1,94                 | 11,2                 | 10,60                | 74,7                 |
| 11          | 2,28                 | 11,8                 | 5,76                 | 32,3                 |
| 12          | 2,52                 | 14,1                 | 5,34                 | 27,6                 |
| 13          | 1,65                 | 8,7                  | 7,35                 | 50,5                 |
| 14          | 2,97                 | 13,2                 | 5,71                 | 35,4                 |
| 15          | 2,00                 | 10,6                 | 8,83                 | 52,5                 |
| 16          | 2,83                 | 14,8                 | 11,10                | 56,7                 |
| 17          | 2,81                 | 17,5                 | 11,50                | 69,6                 |
| 18          | 2,07                 | 10,0                 | 11,30                | 69,4                 |
| $\bar{x}$   | 2,14                 | 11,5                 | 9,44                 | 56,2                 |
| s           | 0,53                 | 3,1                  | 2,67                 | 16,4                 |
| $u_a$       | 0,13                 | 0,7                  | 0,63                 | 3,9                  |
| v [%]       | 25,00                | 26,8                 | 28,26                | 29,2                 |



## PŘÍLOHA P IV: NAMĚŘENÉ HODNOTY K ŘEZNÉ MEZEŘE

| n         | Aramidový kompozit |               |                |               |
|-----------|--------------------|---------------|----------------|---------------|
|           | Laser              |               | Vodní paprsek  |               |
|           | Vzorek<br>[mm]     | Deska<br>[mm] | Vzorek<br>[mm] | Deska<br>[mm] |
| 1         | 20,08              | 20,81         | 20,10          | 20,19         |
| 2         | 20,06              | 20,95         | 20,18          | 20,27         |
| 3         | 20,05              | 20,93         | 20,16          | 20,26         |
| 4         | 20,06              | 20,93         | 20,18          | 20,19         |
| 5         | 20,05              | 20,97         | 20,22          | 20,22         |
| 6         | 20,06              | 20,98         | 20,13          | 20,27         |
| 7         | 20,07              | 21,02         | 20,17          | 20,25         |
| 8         | 20,05              | 21,00         | 20,21          | 20,27         |
| 9         | 20,04              | 21,01         | 20,16          | 20,28         |
| 10        | 20,07              | 20,99         | 20,20          | 20,18         |
| $\bar{x}$ | 20,06              | 20,96         | 20,17          | 20,24         |
| s         | 0,01               | 0,06          | 0,04           | 0,04          |
| $u_a$     | 0,00               | 0,00          | 0,00           | 0,00          |
| v [%]     | 0,00               | 0,00          | 0,00           | 0,00          |
| t [mm]    | 0,45               |               | 0,03           |               |

| n         | Uhlíkový kompozit |               |                |               |
|-----------|-------------------|---------------|----------------|---------------|
|           | Laser             |               | Vodní paprsek  |               |
|           | Vzorek<br>[mm]    | Deska<br>[mm] | Vzorek<br>[mm] | Deska<br>[mm] |
| 1         | 20,40             | 20,95         | 19,95          | 20,22         |
| 2         | 20,38             | 20,94         | 19,94          | 20,20         |
| 3         | 20,41             | 20,98         | 19,91          | 20,23         |
| 4         | 20,36             | 20,97         | 19,93          | 20,21         |
| 5         | 20,41             | 20,96         | 19,89          | 20,22         |
| 6         | 20,41             | 20,97         | 19,91          | 20,19         |
| 7         | 20,42             | 21,00         | 19,88          | 20,21         |
| 8         | 20,41             | 20,98         | 19,90          | 20,22         |
| 9         | 20,39             | 20,95         | 19,87          | 20,24         |
| 10        | 20,40             | 20,96         | 19,89          | 20,23         |
| $\bar{x}$ | 20,40             | 20,97         | 19,91          | 20,22         |
| s         | 0,02              | 0,02          | 0,03           | 0,01          |
| $u_a$     | 0,00              | 0,00          | 0,00           | 0,00          |
| v [%]     | 0,00              | 0,00          | 0,00           | 0,00          |
| t [mm]    | 0,28              |               | 0,16           |               |

| n         | HPL laminát    |               |                |               |
|-----------|----------------|---------------|----------------|---------------|
|           | Laser          |               | Vodní paprsek  |               |
|           | Vzorek<br>[mm] | Deska<br>[mm] | Vzorek<br>[mm] | Deska<br>[mm] |
| 1         | 20,16          | 20,84         | 20,17          | 20,33         |
| 2         | 20,17          | 20,85         | 20,20          | 20,32         |
| 3         | 20,15          | 20,83         | 20,16          | 20,31         |
| 4         | 20,16          | 20,83         | 20,13          | 20,33         |
| 5         | 20,17          | 20,84         | 20,15          | 20,32         |
| 6         | 20,14          | 20,86         | 20,16          | 20,28         |
| 7         | 20,15          | 20,87         | 20,15          | 20,31         |
| 8         | 20,16          | 20,86         | 20,14          | 20,31         |
| 9         | 20,17          | 20,85         | 20,15          | 20,29         |
| 10        | 20,15          | 20,85         | 20,14          | 20,30         |
| $\bar{x}$ | 20,16          | 20,85         | 20,16          | 20,31         |
| s         | 0,01           | 0,01          | 0,02           | 0,02          |
| $u_a$     | 0,00           | 0,00          | 0,00           | 0,00          |
| v [%]     | 0,00           | 0,00          | 0,00           | 0,00          |
| t [mm]    | 0,35           |               | 0,08           |               |

## PŘÍLOHA P V: NAMĚŘENÉ HODNOTY TAHOVÉ ZKOUŠKY

| Aramidový kompozit |         |                  |                   |               |                  |                   |
|--------------------|---------|------------------|-------------------|---------------|------------------|-------------------|
| n                  | Laser   |                  |                   | Vodní paprsek |                  |                   |
|                    | E [GPa] | $\sigma_p$ [MPa] | $\varepsilon$ [%] | E [MPa]       | $\sigma_p$ [MPa] | $\varepsilon$ [%] |
| 1                  | 18,4    | 322              | 1,6               | 21,2          | 319              | 1,6               |
| 2                  | 22,4    | 370              | 2,1               | 20,9          | 351              | 1,7               |
| 3                  | 18,4    | 383              | 1,6               | 17,8          | 308              | 1,4               |
| 4                  | 20,8    | 381              | 2,0               | 21,8          | 339              | 1,5               |
| 5                  | 19,1    | 360              | 1,5               | 21,8          | 258              | 1,0               |
| 6                  | -       | -                | -                 | 20,4          | 357              | 1,3               |
| 7                  | -       | -                | -                 | 20,3          | 367              | 1,6               |
| 8                  | -       | -                | -                 | 19,8          | 351              | 1,7               |
| $\bar{x}$          | 19,8    | 363              | 1,8               | 20,5          | 331              | 1,5               |
| s                  | 1,7     | 25               | 0,3               | 1,3           | 36               | 0,2               |

| Uhlíkový kompozit |         |                  |                   |               |                  |                   |
|-------------------|---------|------------------|-------------------|---------------|------------------|-------------------|
| n                 | Laser   |                  |                   | Vodní paprsek |                  |                   |
|                   | E [GPa] | $\sigma_p$ [MPa] | $\varepsilon$ [%] | E [GPa]       | $\sigma_p$ [MPa] | $\varepsilon$ [%] |
| 1                 | 41,2    | 336              | 0,9               | 34,7          | 313              | 1,1               |
| 2                 | 33,3    | 347              | 1,4               | 30,8          | 350              | 1,0               |
| 3                 | 28,7    | 358              | 1,1               | 42,5          | 374              | 0,6               |
| 4                 | 40,6    | 344              | 0,4               | 40,0          | 355              | 0,5               |
| 5                 | 29,0    | 324              | 1,0               | 35,9          | 355              | 1,0               |
| $\bar{x}$         | 34,6    | 342              | 1,0               | 36,8          | 349              | 0,8               |
| s                 | 6,1     | 13               | 0,4               | 4,6           | 22               | 0,3               |

| HPL laminát |         |                  |                   |               |                  |                   |
|-------------|---------|------------------|-------------------|---------------|------------------|-------------------|
| n           | Laser   |                  |                   | Vodní paprsek |                  |                   |
|             | E [GPa] | $\sigma_p$ [MPa] | $\varepsilon$ [%] | E [GPa]       | $\sigma_p$ [MPa] | $\varepsilon$ [%] |
| 1           | 12,6    | 68               | 0,6               | 12,4          | 73               | 0,6               |
| 2           | 9,5     | 68               | 0,9               | 11,5          | 86               | 0,8               |
| 3           | 16,3    | 67               | 0,5               | 14,6          | 80               | 0,6               |
| 4           | 11,7    | 65               | 0,6               | 10,7          | 73               | 0,7               |
| 5           | 12,2    | 70               | 0,6               | 12,6          | 72               | 0,6               |
| $\bar{x}$   | 12,5    | 68               | 0,6               | 12,4          | 77               | 0,7               |
| s           | 2,5     | 2                | 0,2               | 1,5           | 6                | 0,1               |

## PŘÍLOHA P VI: SPECIFIKACE EPOXIDOVÉ PRYSKYŘICE L285 A TUŽIDLA 285

### Laminating resin MGS® L 285

|                  |                      | Laminating resin L 285 |
|------------------|----------------------|------------------------|
| Density          | [g/cm <sup>3</sup> ] | 1,18 - 1,23            |
| Viscosity        | [mPas]               | 600 - 900              |
| Epoxy equivalent | [g/ equivalent]      | 155 - 170              |
| Epoxy value      | [equivalent /100g]   | 0,59 - 0,65            |
| Refractory index |                      | 1,525 - 1,5300         |

### Specification

**Measuring conditions:**  
measured at 25 °C / 77 °F

|                  | Hardener 285         | Hardener 286    | Hardener 287    |                 |
|------------------|----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Density          | [g/cm <sup>3</sup> ] | 0,94 - 0,97     | 0,94 - 0,97     | 0,93 - 0,96     |
| Viscosity        | [mPas]               | 50 - 100        | 60 - 100        | 80 - 120        |
| Amine value      | [mg KOH/g]           | 480 - 550       | 450 - 500       | 450 - 500       |
| Refractory index |                      | 1,5020 - 1,5500 | 1,4995 - 1,5100 | 1,4950 - 1,4990 |

**Measuring conditions:**  
measured at 25 °C / 77 °F

### Laminating resin MGS® L 285

|                 |  | Laminating resin L 285: Hardeners 285, 286, 287 |
|-----------------|--|---|
| Parts by weight |  | 100 : 40 ± 2                                    |
| Parts by volume |  | 100 : 50 ± 2                                    |

### Mixing ratios

The mixing ratio stated must be observed carefully. Adding more or less hardener will not result in a faster or slower cure, but in incomplete curing with limited performance, that can not be corrected in any way.

Resin and hardener must be mixed carefully. Mix until no clouding is visible in the mixing container. Special attention must be paid to the walls and bottom of the mixing container.