

# **Výzkum obrobitelnosti kompozitních materiálů nekonvenčními technologiemi**

Bc. Lukáš Goňa

---

Diplomová práce  
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2013/2014

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš Goňa**

Osobní číslo: **T12456**

Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Výrobní inženýrství**

Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Výzkum obrobitelnosti kompozitních materiálů  
nekonvenčními technologiemi**

Zásady pro vypracování:

1. Provedte hodnocení vybraných nekonvenčních metod obrábění
2. Hodnoťte kompozitní materiály a technologií výroby
3. Porovnejte metody hodnocení integrity povrchů
4. Určete vliv technologických podmínek na vlastnosti kompozitních výrobků

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. Bhagwan, D. A. a jiní.: Vláknové kompozity, SNTL Praha. 1987.
2. Holešovský F. a Mágl J.: Integrita obrobených povrchů z hlediska funkčních vlastností, UJEP Ústí nad Labem. 2008. ISBN 978-80-7414-095-2.
3. Lukovics, I.: Konstrukční materiály a technologie, VUT Brno. 1992. ISBN 80-214-0399-3.
4. Maňková, I.: Progresivní technologie. Viena Košice. 2000. ISBN 80-7099-430-4.
5. Milikič, D.: Nekonvenční postupci obrade. Univerzita Novi Sad. 2002. ISBN 86-499-0116-6.

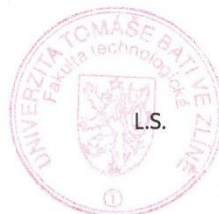
Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Imrich Lukovics, CSc.**  
Ústav výrobního inženýrství


Datum zadání diplomové práce: **10. února 2014**

Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2014**

Ve Zlíně dne 10. února 2014

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



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

Příjmení a jméno: GOŇA 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, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 9.5.2014

  
.....

---

<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**

Cílem této diplomové práce je stanovit ideální procesní podmínky pro obrábění kompozitních desek vodním paprskem a laserem a optimalizovat skladbu materiálu. Kompozitní desky slouží k výrobě střížného nástroje pro papírenský průmysl a mají nahradit stávající nevyhovující desky dřevěné. Dále je nutné stanovit faktory ovlivňující kvalitu řezu, protože v materiálu je třeba vytvořit úzkou spáru o malé toleranci šířky, do které se řezný nástroj vsadí. Vzhledem k malým tolerancím by bylo běžnými metodami obrábění obtížné požadovanou drážku vyřezat, a proto se zde využilo nekonvenčních technologií.

Klíčová slova: kompozitní materiály, nekonvenční technologie, laserový paprsek, vodní paprsek.

## **ABSTRACT**

The aim of this thesis is to determine the ideal processing conditions for machining composite plates by water jet and laser machining and optimize the composition of the material. The composite boards are used to manufacture cutting tool for paper industry and to replace existing substandard wooden boards. It is also necessary to establish the factors affecting the quality of the cut, because in the material is necessary to create a narrow gap of small width tolerance to which the cutting tool fit. Due to the small tolerances would be difficult to use conventional machining methods for carve a groove and is therefore used here unconventional technologies.

Keywords: composite materials, unconventional technology, laser beam machining, water jet.

Tímto bych chtěl poděkovat mému vedoucímu Prof. Ing. Imrichu Lukovicsovi za odborné vedení při psaní diplomové práce. Dále děkuji všem, kteří mě podporovali při studiu.

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

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
<b>1 NEKONVENČNÍ TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ</b> .....	<b>12</b>
1.1 ROZDĚLENÍ NEKONVENČNÍCH METOD OBRÁBĚNÍ .....	14
1.1.1 Dělení podle hlavního zdroje energie .....	14
1.1.2 Dělení podle přítomnosti nástroje .....	15
1.1.3 Dělení podle převládajícího druhu úběru materiálu.....	16
1.2 ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY NEKONVENČNÍCH TECHNOLOGIÍ .....	16
1.2.1 Obrobitelnost materiálů.....	16
1.2.2 Tvarová komplexnost součástí .....	16
1.2.3 Automatizace výroby .....	17
1.2.4 Integrita povrchu a požadavky vysoké přesnosti .....	17
1.2.5 Miniaturizace.....	17
<b>2 PRINCIP NEKONVENČNÍCH METOD</b> .....	<b>18</b>
2.1 MECHANICKÉ PROCESY ÚBĚRU MATERIÁLU .....	18
2.1.1 Obrábění vodním paprskem .....	18
2.1.1.1 Princip řezání vodním paprskem .....	19
2.1.1.2 Zařízení pro vodní paprsek .....	20
2.1.2 Obrábění ultrazvukem .....	21
2.2 CHEMICKÉ A ELEKTROCHEMICKÉ PROCESY ÚBĚRU MATERIÁLU .....	21
2.2.1 Chemické obrábění.....	21
2.2.2 Elektrochemické obrábění.....	22
2.3 TEPelné PROCESY .....	23
2.3.1 Obrábění laserem .....	23
2.3.1.1 Princip laserového záření.....	23
2.3.1.2 Použití a vlastnosti laseru .....	24
2.3.1.3 Rozdělení laserů.....	25
2.3.2 Obrábění paprskem plazmy.....	26
2.3.2.1 Použití plazmy .....	27
2.3.2.2 Plazmové zařízení .....	27
2.3.3 Obrábění paprskem elektronů .....	27
2.3.4 Elektrojiskrové obrábění .....	28
<b>3 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY</b> .....	<b>29</b>
3.1 DĚLENÍ KOMPOZITŮ .....	30
3.2 CHARAKTERISTIKA VÝZTUŽE .....	31
3.3 SKELNÁ VLÁKNA.....	32
3.3.1 Vlastnosti skelných vláken.....	32
3.4 UHLÍKOVÁ VLÁKNA .....	32
3.4.1 Vlastnosti uhlíkových vláken .....	33



3.5	CHARAKTERISTIKA MATRICE.....	33
3.6	VLASTNOSTI KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ .....	34
3.7	SENDVIČOVÉ STRUKTURY .....	35
3.7.1	Jádrové materiály .....	36
3.7.1.1	PUR pěny.....	36
<b>4</b>	<b>HODNOCENÍ INTEGRITY POVRCHU.....</b>	<b>37</b>
4.1	ZÁKLADNÍ PARAMETRY PROFILU POVRCHU.....	39
4.2	ZBYTKOVÁ NAPĚTÍ.....	41
4.3	MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU.....	42
4.3.1	Měření dotykovým způsobem.....	42
4.3.2	Měření bezdotykovým způsobem.....	42
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>43</b>
<b>5</b>	<b>VÝROBA KOMPOZITNÍCH VZORKŮ A STANOVENÍ PARAMETRŮ DRSNOSTI.....</b>	<b>44</b>
5.1	VÝROBA DESEK.....	45
5.1.1	Materiál a pomůcky.....	45
5.1.2	Skladba desek.....	46
5.1.3	Postup výroby.....	49
5.2	MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU VZORKŮ.....	51
5.2.1	Drsnost Oceli 11 343 (S 235 JRG).....	51
5.2.2	Drsnost oceli 10088-1 (DIN 1.4301) .....	54
5.2.3	Drsnost duralu 6082 t6.....	57
<b>6</b>	<b>OBRÁBĚNÍ KOMPOZITNÍCH DESEK NEKONVENČNÍMI TECHNOLOGIEMI .....</b>	<b>61</b>
6.1	ŘEZY KOMPOZITNÍCH DESEK LASEROVÝM PAPSREM .....	61
6.2	ŘEZY KOMPOZITNÍCH DESEK VODNÍM PAPSREM.....	65
6.2.1	Závislost šířky řezu na řezné rychlosti.....	67
6.2.2	Závislost šířky štěrbin na tlaku vodního paprsku.....	70
6.3	OPTIMALIZACE ŘEZNÝCH PODMÍNEK A SKLADBY MATERIÁLU .....	73
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>79</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>80</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>82</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>83</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>86</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>88</b>

## ÚVOD

Nekonvenční metody obrábění zaznamenaly prudký rozvoj v druhé polovině 20. století. Hlavními důvody jejich zavádění do průmyslové výroby jsou zejména rostoucí požadavky na zvýšení produktivity práce ve zhotovujícím procesu technologické výroby, která vyžaduje jak zdokonalení klasické výrobní technologie, tak i využívání nových poznatků vědy a výzkumu. V některých případech se nekonvenční technologie stávají jediným prostředkem k překonání jak ekonomických tak i technických problémů, jenž vznikají při výrobě zejména těžkoobrobitelných materiálů (slinuté karbidy, kompozity, kalené oceli...).

I kompozitní materiály získávají neustále větší uplatnění v průmyslu. Využívají se všude tam, kde se žádá docílit výborných mechanických, fyzikálních a jiných vlastností, které jsou pro dané odvětví potřeba. Velkou výhodou kompozitních materiálů je jejich velmi nízká hmotnost ve srovnání s jinými materiály, při uchování velmi dobrých mechanických vlastností. Průmysl kompozitních materiálů je stále mladé odvětví, proto je nutné získávat o nich nové poznatky a tím toto odvětví pomáhat rozvíjet.

U obrábění kompozitních materiálů mohou vyvstávat problémy, protože se jedná o materiály složené ze dvou a více složek, aby se dosáhlo lepších finálních vlastností. Nejsou to homogenní materiály např. plasty. Jedna ze složek je výztuž a další složkou je pojivo. Při obrábění konvenčními metodami mohou nastat problémy s těmito složkami. Výztužná vlákna se namísto plynulého řezu vylamují a výsledná integrita povrchu je velmi špatná. Matrice, které jsou u kompozitů hlavně polymerní, se vlivem tepla, které generuje nástroj, mohou lehce tavit. Další problémy vznikají i v důsledku toho, že kompozity se skládají z několika vrstev, které pojí matrice. Tyto vrstvy se však při obrábění od sebe mohou oddělovat, což má vliv na vlastnosti a další použití v praxi je nereálné. Z těchto důvodů se stále častěji používají nekonvenční technologie obrábění.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 NEKONVENČNÍ TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ

Výrobní technologie, které využívají známé chemické a fyzikální jevy na úběr materiálu (plazma, laser, elektrický výboj, akustické vlnění, vodní paprsek, paprsek elektronů a iontů) zaznamenali prudký rozvoj v druhé polovině 20. století jako následek intenzivního výzkumu a rozvoje:

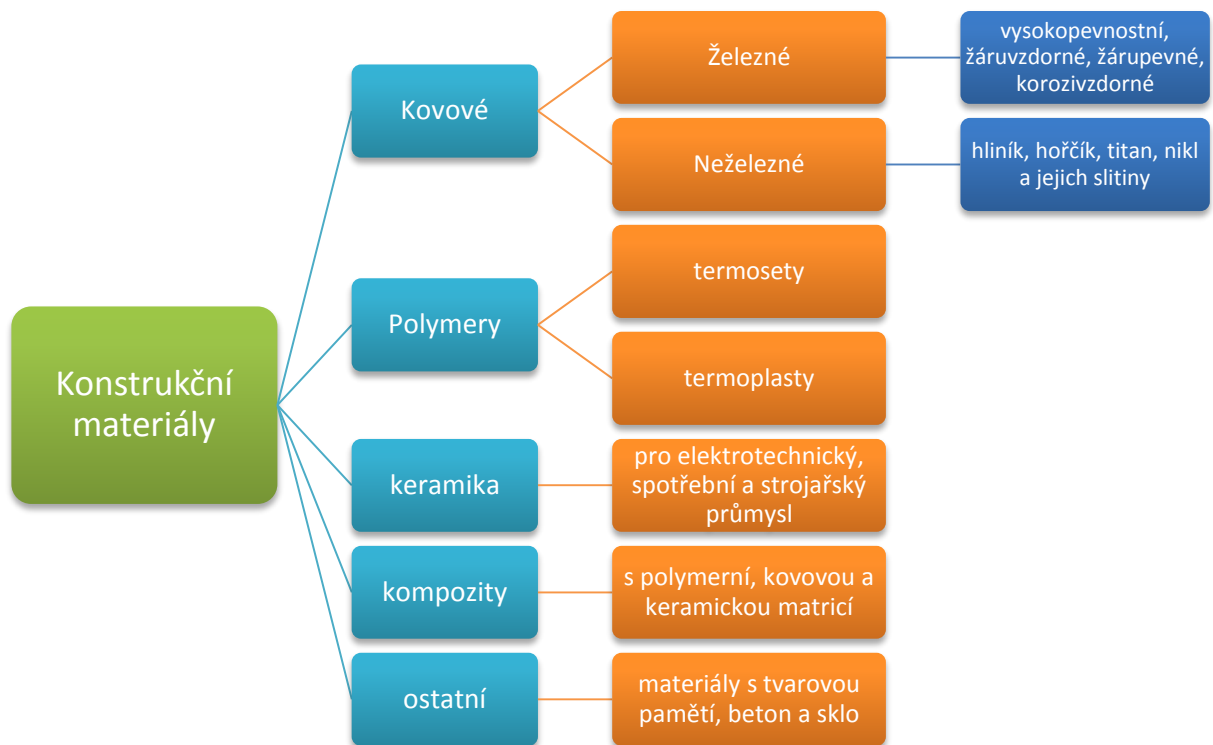
- Speciálních oblastí fyziky (kvantová elektronika).
- Nových druhů konstrukčních materiálů (kompozitní materiály, keramika).
- Sofistikovaných technologií zpracování materiálů.
- Rozvoj počítačových technologií.[1]

Využití těchto metod představuje možnou alternativu k tradičním technologiím. Tyto technologie se oproti tradičním formám opracování materiálů liší hlavně tím, že využívají odlišné druhy energie než mechanickou. V technologii obrábění se pod názvem „nekonvenční“ nebo „netradiční“ zařazují technologie opracování materiálů, které nepoužívají klasický řezný nástroj s určitou nebo neurčitou řeznou hranou, ale využívají k úběru materiálu různých fyzikálních nebo chemických jevů.[1]

Název nekonvenční metody obrábění nebo progresivní způsoby úběru materiálu se používá pro širokou škálu mechanických, elektrických, tepelných a chemických procesů při úběru materiálu, které byly vyvinuty hlavně po roce 1940. Původně byly tyto metody určeny pro zvláštní použití, a nebyly extenzivně šířené. Většina metod se používala pro řešení speciálních úkonů v leteckém a kosmonautickém průmyslu, dnes mnoho metod nachází uplatnění v rozličných odvětvích průmyslu.[1]

Vysoce technicky náročné vynálezy posledních dekád jako letadla, automobily a vesmírné rakety vytvořily širokou bázi nových a těžkoobrobitelných materiálů, jejichž opracování představuje těžko řešitelný problém. Jako příklad lze uvést kompozitní materiály s kovovou výztuží, vysoce trvanlivé polymery, monolitní a kompozitní keramické materiály a jiné. Hlavní nevýhody těžkoobrobitelných materiálů vychází z jejich vysoké tvrdosti a křehkosti, žárupevnosti, nevhodných tepelných vlastností, chemické reaktivity s řezným nástrojem a nehomogenní mikrostruktury. Avšak i vývoj klasických technologií neustal, byly vyvinuty nové řezné materiály (řezná keramika, polykrystalický diamant, nitrid bóru), inovační technologie obrábění (hard machining, vysokorychlostní obrábění a jiné). Částečně se tak daří řešit problémy těžkoobrobitelných materiálů, ale i přesto neřeší základní potíže obrábění

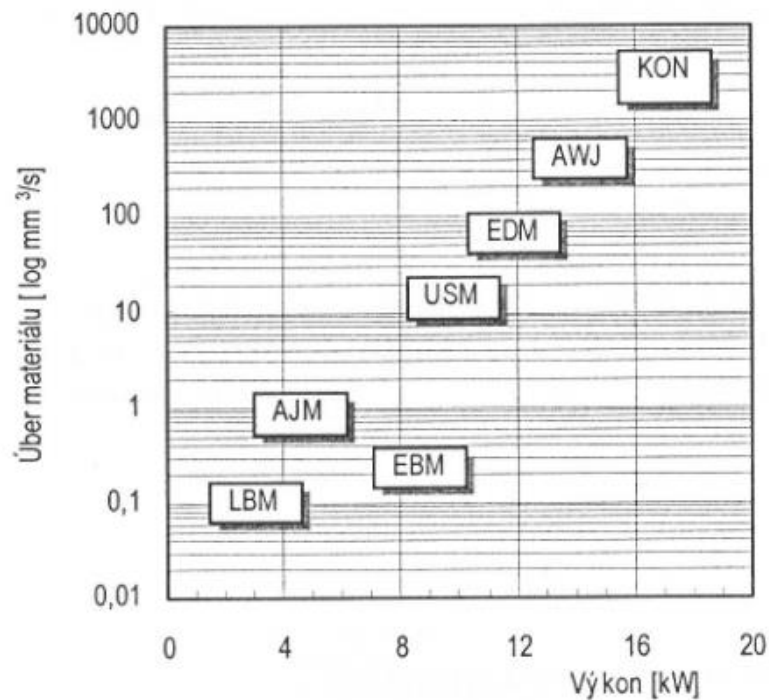
a to opotřebení nástroje. Právě vývoj nekonvenčních metod, které využívají jiné zdroje energie, napomáhají při řešení problémů spojených s opotřebením rezného nástroje. [1]



Obr. 1 Přehled a rozdělení konstrukčních materiálů s důrazem na těžkoobrobitelné materiály z pohledu obrábění. [1]

Kromě problematiky opotřebení nástroje řeší nekonvenční metody taky zvyšující se nároky průmyslu na kvalitu produktů, komplexnost tvarů, dokončování povrchu a další požadavky související se zpracováním rostoucího podílu těžkoobrobitelných konstrukčních materiálů. Uvedené požadavky jsou dále dané:

- Nároky na vysokou pevnost a tvrdost materiálů, obvykle nad 400 HB.
- Rostoucími nároky na tvarovou komplikovanost dílů a s tím související problémy s jejich upnutím.
- Vysoké nároky na toleranci a přesnost rozměrů, na drsnost dokončených povrchů.
- Opracování poddajných a tenkostěnných materiálů, kde působení rezné síly při mechanickém opracování (broušení, tváření, řezání) může vést k jejich deformaci.
- Požadavky na integritu povrchu s cílem omezit nebo vyloučit nežádoucí tepelné ovlivnění povrchových vrstev a vznik zbytkových napětí pod povrchem. [1]



Obr. 2 Porovnání výkonových charakteristik úběru materiálu pro klasické (KON) a následující nekonvenční technologie obrábění:

(LBM laserové obrábění, EBM paprsek elektronů, AJM proud abraziva, USM ultrazvuk, EBM elektrojiskrové, AWJ abrazivní vodní paprsek). [1]

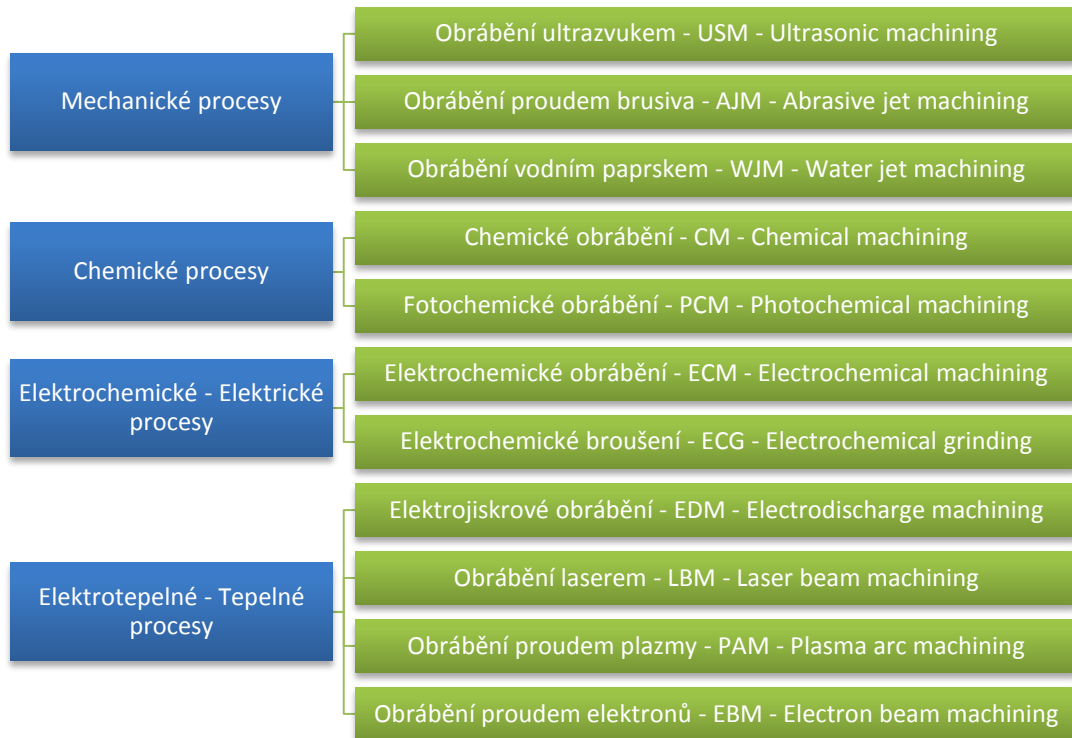
## 1.1 Rozdělení nekonvenčních metod obrábění

Nekonvenční technologie zahrnují velké množství procesů. Některé našli uplatnění v průmyslové výrobě, kdežto jiné zůstali v podobě laboratorních experimentů a některé vznikly pouze jako kuriozity. Odlišují se především dle fyzikálních účinků použitých pro obrábění. Rozdělení technologií je možné zpracovat z mnoha různých úhlů. [1,6]

- podle hlavního zdroje energie
- podle přítomnosti nástroje jako geometrického tělesa
- podle mechanismu úběru materiálu

### 1.1.1 Dělení podle hlavního zdroje energie

Rozděluje jednotlivé technologie do skupin dle převládajícího zdroje energie úběru materiálu.



*Obr. 3 Dělení nekonvenčních technologií podle hlavního zdroje energie i s mezinárodním značením jednotlivých technologií. [1]*

### 1.1.2 Dělení podle přítomnosti nástroje

Všeobecně o nástroji hovoříme jako o prostředku, který je příčinou úběru materiálu. Nástroj v tomto případě není přítomen jako pevné geometrické těleso např. laserový paprsek jako nástroj nebo paprsek elektronů. Nástroj jako pevné těleso, který je v průběhu obrábění v přímém kontaktu s obrobkem, podléhá různě intenzivnímu opotřebení. U nekonvenčních technologií slouží k zabezpečení geometrie vytvářeného tvaru dutiny, otvoru, drážky a na zabezpečení optimálního procesu. Nástroj jako podpůrné těleso se používá v těchto procesech: [1]

- Obrábění ultrazvukem (USM)
- Elektrojiskrové obrábění (EDM)
- Elektrochemické obrábění (ECM)

### 1.1.3 Dělení podle převládajícího druhu úběru materiálu

- Procesy s převládajícím brusným účinkem: obrábění ultrazvukem (USM), opracování proudem brusiva (AJM, AFM).
- Technologie s erozivním účinkem: obrábění vodním paprskem (WJM).
- Procesy chemického rozpouštění materiálu: fotochemické obrábění (PCM), elektrochemické obrábění (ECM), elektrochemické broušení (ECG), chemické frézování (CM).
- Procesy s převládajícím tepelným účinkem: elektrojiskrové obrábění (EDM), opracování laserem (LBM), obrábění paprskem plazmy (PAM), obrábění paprskem elektronů (EBM).[1]

## 1.2 Základní charakteristiky nekonvenčních technologií

Původně byly nekonvenční technologie obrábění vyvinuty jako alternativa ke klasickému obrábění. V současnosti představují běžný způsob opracování a v některých případech jsou jediným prvkem průmyslové výroby. Jejich používání je podpořeno mnoha výhodami, mezi které se řadí: [1]

### 1.2.1 Obrobitelnost materiálů

Tento pojem je charakteristický pro broušení a řezání materiálů založený na mechanických vlastnostech jako je tvrdost, houževnatost, pevnost. Tyto vlastnosti však u nekonvenčních metod nehrají žádnou roli, protože nepředstavují omezení obrobitelnosti pro tyto technologie. Naopak důležitou úlohu tu mají jiné vlastnosti jako je tepelná vodivost, elektrická vodivost, teplota tavení, lomové vlastnosti, atomové číslo a jiné. [1]

### 1.2.2 Tvarová komplexnost součástek

Rostoucí nároky na tvarovou složitost dílců zvedá zájem o používání nekonvenčních metod obrábění. Tvarování otvorů a drážek do součástek představuje pro klasické metody problém, ale pro technologie chemického frézování nebo fotochemického obrábění je to jednoduché řešení. [1]



### 1.2.3 Automatizace výroby

Automatizace výroby a informační tok ve výrobním systému značně zkracují výrobní časy, snižují náklady, zásoby atd. Tento aspekt jasně hovoří pro nasazování NC a CNC strojů a zavádění CAD/CAM systémů do výroby. Integrace nekonvenčních technologií do automatizovaných výrobních systémů je z pohledu procesů snazší ve srovnání s klasickými metodami obrábění. [1]

### 1.2.4 Integrita povrchu a požadavky vysoké přesnosti

Povrchy opracované broušením nebo řezáním vykazují stopy silného mechanického působení (zpevnění, zbytkové napětí, mikronerovnosti), které mohou výrazně ovlivnit užité vlastnosti daného výrobku. Pro těžkoobrobitelné materiály jako jsou vláknové kompozity nebo keramické materiály přináší nekonvenční metody alternativu jak dosáhnout požadovaných vlastností povrchu. Přesnost úběru v oblasti atomárních a molekulárních vrstev můžeme dosáhnout pomocí iontových a elektronových technologií. [1]

### 1.2.5 Miniaturizace

Trendy redukce rozměrů výrobků zvyšují potřebu používání nových technologií. Které umožňují úběr materiálů nejen v oblasti mikrorozměrů, nano ale i v několika atomárních a molekulárních vrstvách. Ultra malé průměry ( $10 \div 100 \mu\text{m}$ ) otvorů není možné vrtat běžnými technologiemi LBM, EDM, ECM. Technologie mikrochemického obrábění, obrábění svazkem elektronů (EBM) a iontů (IBM) jsou schopny vyřešit i tyto úkony. Mikroobrábění, jako nedávno zažitý pojem pro opracování rozměrově malých součástek, se stává významným zdrojem vybraných oblastí průmyslové výroby. [1]

## 2 PRINCIP NEKONVENČNÍCH METOD

### 2.1 Mechanické procesy úběru materiálu

Úběr materiálu je spojený s přímým mechanickým abrazivním účinkem volných brusných částic dopadající určitou kinetickou energií na povrch materiálu, a také erozivním účinkem čistého vodního proudu nebo vodního proudu ve spojení s brusnými částicemi. Mechanické procesy úběru materiálu se zpravidla používají na opracování velmi tvrdých materiálů (tvrdość nad 35 HRC), které se klasickými metodami obrábějí jen těžko (tvrdość, houževnatost nebo křehkost) a také z důvodu ekonomických. Keramika, organické a kompozitní materiály jsou vhodné ke zpracování mechanickými procesy, protože jsou elektricky nevodivé a proto nevhodné pro elektrochemické procesy. [1,5]

#### 2.1.1 Obrábění vodním paprskem

Tento proces využívá úzký vysokotlaký a vysoko-rychlostní proud vody (tlak vody okolo 400 MPa) jako řezný nástroj. Přidáním jemného brusiva se zvyšuje účinnost řezání, což rozšířilo možnosti využití vodního paprsku. Z hlediska použitého pracovního média se rozlišují dvě základní metody:

- WJM – Water jet machining – čistý vodní paprsek.
- AWJ – Abrasive water jet machining – obrábění abrazivním vodním paprskem.[1]

Tyto technologie se vyznačují těmito přednostmi:

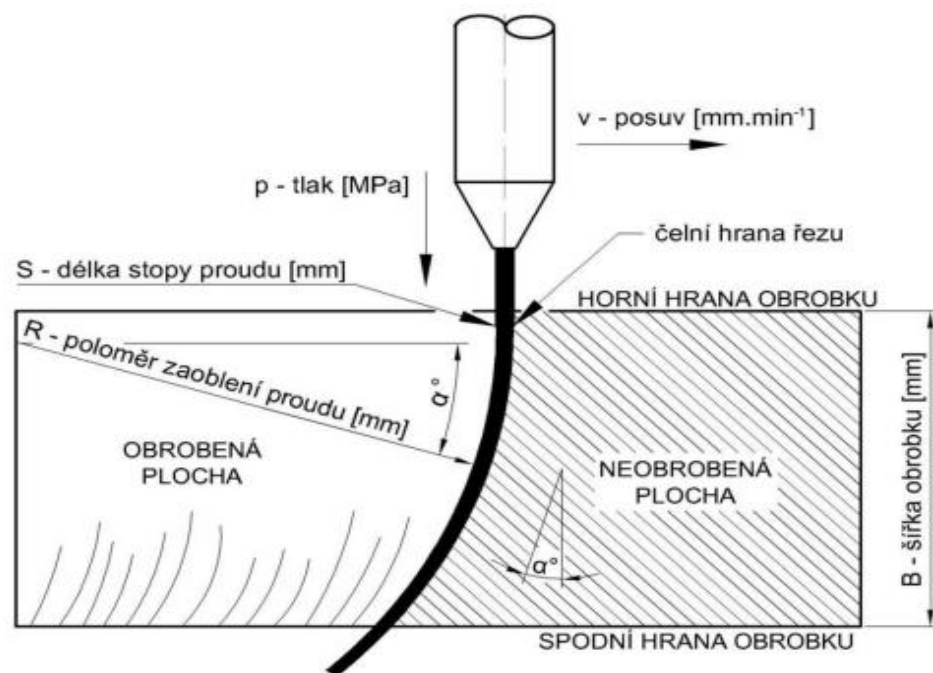
- Vysoká rychlost řezání
- Schopnost řezat rovinné, ale i tvarově složité plochy v úzkých tolerancích
- Minimální teplotní ovlivnění povrchu
- Malé deformační napětí v opracovaném povrchu
- Možnost řezat v různých směrech bez ztráty účinnosti paprsku
- Možnost řídit dráhu paprsku počítačem.[1]

Univerzálnost vodního paprsku nachází široké uplatnění nejen při vyřezávání, ale i při obráběcích operacích, jako je soustružení, frézování, vrtání a řezání závitů. [1]

### 2.1.1.1 Princip řezání vodním paprskem

Tato technologie spočívá v odebirání materiálu mechanickým účinkem dopadu úzkého vodního paprsku s vysokou rychlostí a kinetickou energií na jednotku plochy. Abrazivo jako přísada zvyšuje mechanický účinek dopadu.

Proud vody je generován vysokým tlakem vody, která prochází skrz mezeru dýzy s průměrem okolo 0,3 mm. Voda pronikající do obrobku postupně ztrácí svoji kinetickou energii a vychyluje se. Vodní paprsek se v každém bodě materiálu pohybuje po zaoblené dráze, jejíž poloměr se mění s předcházející délkou oblouku. [1]



Obr. 4 Princip řezání vodním paprskem. [1]

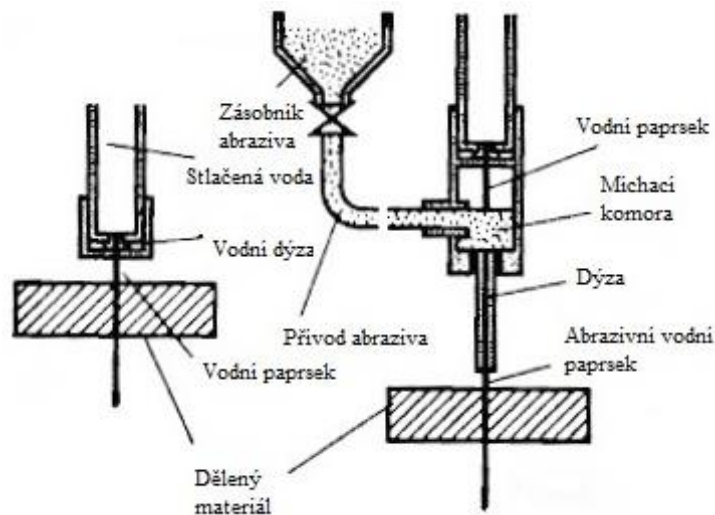
Tab. 1 Srovnání základních parametrů technologií WJM (čistý vodní paprsek) a AWJ (abrazivní vodní paprsek). [1]

	WJM	AWJ
<b>Pracovní tlak vody [MPa]</b>	60 - 400	200 - 300
<b>Průměr vodní trysky [mm]</b>	max. 0,3	$d_n \geq 0,25$
<b>Průtok vody [<math>l \cdot \text{min}^{-3}</math>]</b>	max. 2,8	2 - 6
<b>Vzdálenost trysky od materiálu [mm]</b>	2 - 70	2 - 10

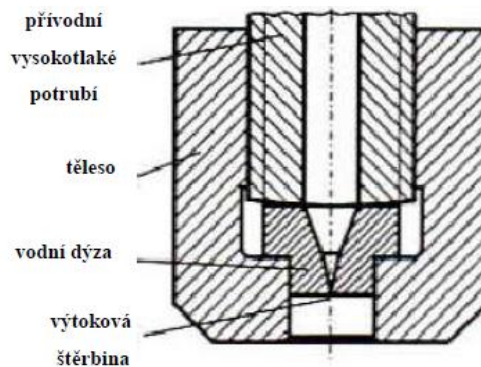
### 2.1.1.2 Zařízení pro vodní paprsek

Zařízení se dělí na několik částí, které jsou multiplikátor, hydraulická jednotka, filtry, akumulátor, potrubí na rozvod vody, dýza, zásobník na vodu a přísady na úpravu vody.

- Multiplikátor je částí hydraulické jednotky a používá se ke zvýšení tlaku vody. Znásobení tlaku vody je závislé na poměru pracovních ploch dvou vzájemně spojených pístů.
- Akumulátor tlaku je vysokotlaká nádoba, jejíž funkce je tlumit rázy v kapalině vyvolané vznikem pulzace paprsku jako následek stlačení vody.
- Filtry odplavují nečistoty a chrání štěrbinu v dýze před poškozením cizími příměsemi.
- Dýza ovlivňuje kvalitu řezného paprsku a kvalitu řezu. Nejčastěji se vyrábí ze safíru nebo slinutého karbidu. [1]



Obr. 5 Porovnání technologií čistého vodního paprsku a abrazivního vodního paprsku. [1]



Obr. 6 Schéma konstrukce dýzy pro vodní paprsek. [21]

### 2.1.2 Obrábění ultrazvukem

Proces, při kterém se využívá ultrazvukových vibrací nástroje při opracování tvrdých, křehkých, nekovových materiálů. Rozkmitaný nástroj rozrušuje materiál pod spodní plochou. Ve směru kmitů této plochy působí síly na brusivo, které odděluje v materiálu třísky. Do obráběcího prostoru nástroje se přivádí brusivo prostřednictvím kapaliny, při kterém dochází k přenosu kmitavého pohybu z koncentrátoru kmitů na brusivo. Nejlepších výsledků se dosahuje při použití vody jako přenosného média a karbidu bóru, karbidu křemíku jako brusiva. Koncentrace brusiva v kapalině bývá 30 až 40 % v závislosti na tvrdosti obráběného materiálu. Obrábění ultrazvukem se uplatňuje ve dvou variantách:

- Ultrazvukové nárazové broušení
- Rotační obrábění ultrazvukem [8,9]

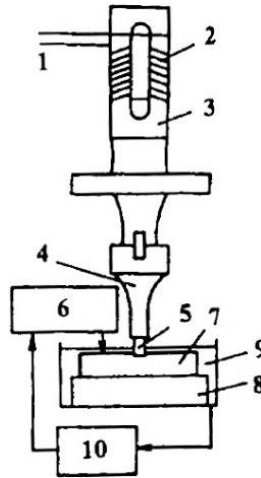
## 2.2 Chemické a elektrochemické procesy úběru materiálu

Tyto procesy využívají chemické a elektrochemické reakce v plynném nebo kapalném prostředí na odstranění částic materiálu a vytvoření požadovaného tvaru obrobku. Při úběru materiálu jsou atomy a molekuly materiálu kombinované s reagující látkou (chemická sloučenina, elektrolyt) a následně se odstraňují z povrchu obráběné součásti proudem plynu nebo kapaliny. K odstranění materiálu je potřeba použít nucenou cirkulaci elektrolytu, nebo proudění tepla, aby chemická reakce rozpouštění byla vždy aktivní. Nucenou cirkulaci nepoužíváme jen u procesu leštění a elektrochemické označování.

### 2.2.1 Chemické obrábění

Princip této metody spočívá v odleptávání vrstev materiálu o tloušťce několika setin milimetru až několika milimetrů z povrchu obrobku. Při chemickém procesu se k leptání používá kyselina nebo alkálie. Na místa obrobku, která nemají být leptána, se nanáší ochranný nátěr z laků nebo pryskyřic o tloušťce 0,15 – 2 mm nebo se na povrch přilepí pryžová maska. Obrobek se před samotným leptáním musí očistit a odmastit a poté se ponoří do lázně. Hloubka odleptávané vrstvy je teoreticky neomezená, závisí pouze na odolnosti nátěru proti chemickému rozrušení. Přesnost rozměrů závisí na hloubce leptané vrstvy v mezích několika desetin až setin milimetru.

Chemické obrábění je ekonomicky výhodné při úběru materiálu malých tlouštěk z dílů velkých a složitých tvarů (např. odlehčené nosníky, odlehčené hliníkové potahy křidel). [3,10]



Obr. 7 Schéma ultrazvukového nárazového broušení. [6]

1-přívod do oscilátoru, 2-cívka, 3-jádro, 4-koncentrátor, 5-nástroj, 6-chladič, 7-obrobek,  
8-přípravek, 9-kapalina s abrazivem, 10-čerpadlo

### 2.2.2 Elektrochemické obrábění

Je to řízený proces oddělování materiálu anodickým rozpouštěním v elektrolytu, kde obrobek je anoda a nástroj je katoda. Elektrolyt prochází mezerou mezi nástrojem a obrobkem, kdy stejnosměrný proud o nízkém napětí rozpouští materiál obrobku. Elektrolyty jsou většinou alkalické a katodou je libovolný kov (olovo, ocel, měď apod.). Elektrochemické obrábění se používá pro obrábění tvrdých materiálů (kalená ocel, žárupevné slitiny), tvarovaných ploch a hlubokých děr.

Proud se mění v rozmezí 50 až 20 000 A a dovolená mezera mezi nástrojem a obrobkem má rozměr 0,025 až 1,3 mm. Elektrolyt proudí touto mezerou rychlostí 30 až 60 m.s<sup>-1</sup>. Teplota elektrolytu kolísá mezi 24 až 65°C. Oddělené částice jsou zachycovány z elektrolytu a filtrovány pro další použití elektrolytu. Na principu elektrolytického rozpouštění jsou dále založeny tyto metody:

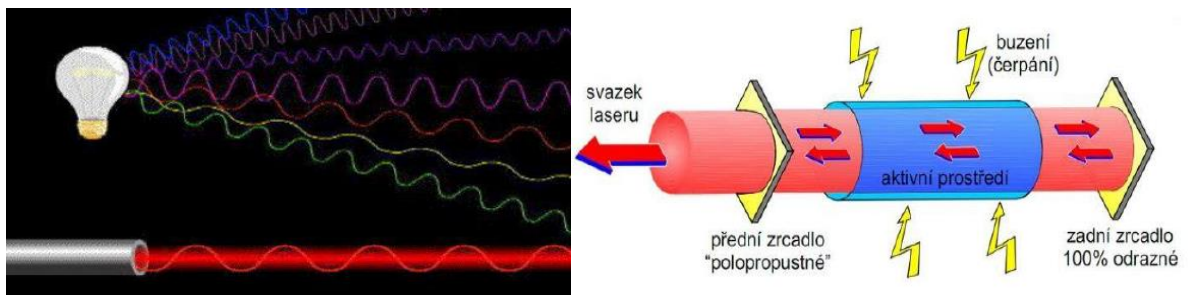
- Elektrochemické broušení rotující elektrodou
- Elektrochemické obrábění s proudícím elektrolytem
- Elektrochemické leštění
- Elektrochemické odstraňování otřepů. [8,9]

## 2.3 Tepelné procesy

Charakteristické pro tyto procesy je, že úběr materiálu probíhá zvyšováním vnitřní energie atomů na povrchu obrobku. Odebrání materiálu je výsledkem reakce elementární částice energetického paprsku (atom, elektron, iont) na částici (atom) materiálu nebo účinkem shluku částic na jiné atomy. [1]

### 2.3.1 Obrábění laserem

Laser je generátor elektromagnetického záření v optické oblasti vlnových délek při využití stimulovaného záření. Energie ve formě elektromagnetického vlnění, elektronového záření nebo iontového záření excituje (budí) atomy tuhé, kapalné nebo plynné aktivní látky, ve které nastane inverzní stav. Přechodem atomů této látky do základního stavu vznikne stimulovaná emise monochromatické (jednobarevné, tj. s jednou vlnovou délkou) koherentní (vzájemně související světelné paprsky se společným původem v jednom zdroji) záření, jednoduše ovládané optickými čočkami a zrcadly. Světelný paprsek při dopadu na překážku přemění svoji energii na tepelnou. energii můžeme dodávat různým způsobem, například opticky (světlem výbojky), chemicky, elektricky atd. Konstrukce samotných laserů je velmi různorodý. Záleží hlavně na druhu laseru, na jeho konstrukci a v neposlední řadě na jeho použití. [1,6]



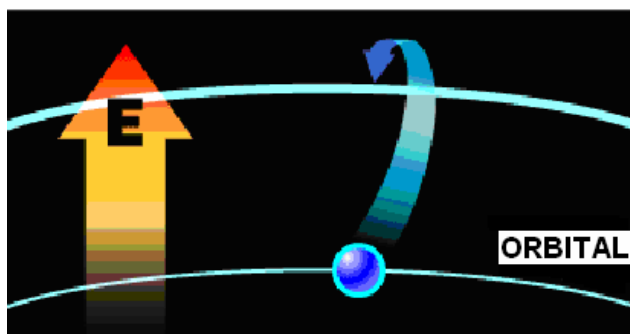
Obr. 8 Schéma vzniku laserového paprsku. [11]

#### 2.3.1.1 Princip laserového záření

Kolem kladně nabitého jádra (protonu) krouží v různých elektronových drahách (orbitalech) elektrony, které podléhají přitažlivým elektrostatickým silám. Přitom každé dráze (orbitalu) přísluší přesně určené množství energie, zvané energetická hladina.

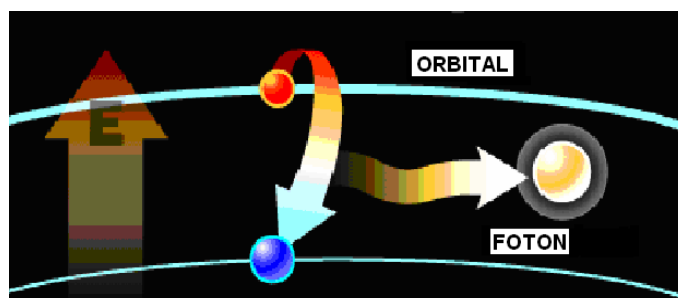
Atomy se mohou nacházet v různých stavech excitace - vybuzení. To znamená, že mohou mít různou energii. Dodáme-li atomu dostatečnou dávku energie, může opustit tzv. základní energetickou hladinu a přejít do excitované – vybuzené hladiny. Úroveň excitace.

závisí na množství dodané energie, kterou přivádíme prostřednictvím tepla, světla nebo elektřiny. Vyvineme-li tedy na atom teplo, některý z elektronů v nižším energetickém orbitalu přejde do vyššího energetického orbitalu, vzdálenějšího od jádra atomu. (obr. 6) [6,11]



*Obr. 9 Přesun elektronu. [11]*

Jestliže se některý z elektronů přesune do vyššího energetického orbitalu, má posléze snahu vrátit se do základního stavu. Jestliže se to stane, uvolní svou energii v podobě fotonu - částice světla. (obr. 7) [6,11]



*Obr. 10 Vyzáření fotonu. [11]*

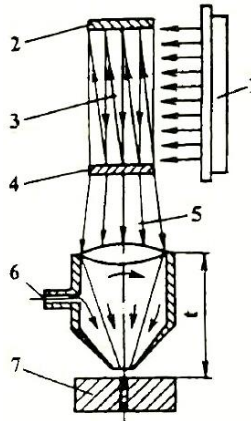
Vše co vysílá světlo (zářivky, plynové lampy, žárovky, atd.) pracuje na principu elektronů měnících své orbitály za současného uvolňování fotonů. Elektron se může nacházet pouze na vymezených energetických hladinách. V závislosti na rozdílu těchto hladin vzniká infračervené, ultrafialové anebo viditelné světelné záření. [6,11]

### **2.3.1.2 Použití a vlastnosti laseru**

Velikou předností laseru je široká oblast použití vyplývající z technologických, ekonomických a i z ekologických charakteristik. Lze jej využít k odpaření materiálu, na drážkování a popisování, na svařování, na vrtání a děrování, na kalení, na povrchové úpravy, na obrábění plastů nebo na polymeraci. Dále slouží ke kontrole a měření materiálů, k přenosu informací a v medicíně jako řezný nástroj. V oblasti obrábění je v současné době



nejvhodnější použití plynových CO<sub>2</sub> laserů. Většinou jsou to kontinuální, lineárně polarizované lasery pracující s vlnovou délkou 10,6 μm s výkonem od stovek W až do několika kW. Pro řezání plastů je ekonomicky nejvhodnější laser o výkonu kolem 1500 W a pro kovy kolem 3000 W. [3]



Obr. 11 Schéma obrábění laserem. [8]

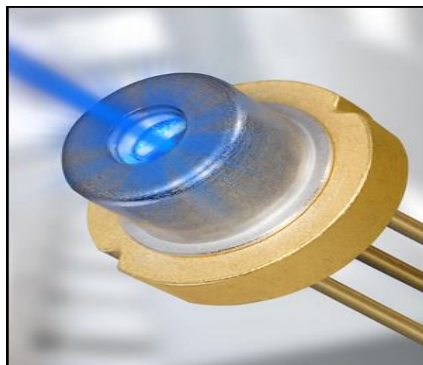
1-xenonová výbojka, 2-nepropustné zrcadlo, 3-optický rezonátor, 4-polopropustné zrcadlo,

5-světelný výstup, 6-řezný plyn, 7-řezný plyn

### 2.3.1.3 Rozdělení laserů

Lasery se dělí podle různých hledisek např.:

- a) aktivního prostředí
- Submilimetrové
  - Pevnolátkové
  - Polovodičové
  - Plynové
  - Kapalinové
  - Plazmatické



Obr. 12 Diodový laser. [21]

- b) vlnových délek optického záření, které vysílají:
- Infračervené záření
  - Optozáření, světelné záření
  - Ultrafialové záření
  - Rentgenové a gama záření
- c) režimu paprsku:
- Kontinuální
  - Pulsní
  - Q režim
- d) dosahovaného výkonu:
- Vysokovýkonné – 1 až 30 kW (tepelné zpracování, sváření)
  - Nízkovýkonné – až 100 W (řezání a vrtání plastických hmot, keramiky)
- e) konstrukce zařízení:
- Systém pohyblivého paprsku, který je zabezpečen zrcadly
  - Pohyblivý laserový systém a nepohyblivý obrobek
  - Systém pevného laseru a pohyblivého stolu, na kterém je upnutý obrobek.[21]

### 2.3.2 Obrábění paprskem plazmy

Při obrábění je materiál postupně odtavován a odpařován paprskem plazmy, vystupujícím vysokou rychlostí z plazmového hořáku o teplotě 10 000 až 30 000°C. Částice kovu se odpařují velice rychle, takže teplo neproniká do větší hloubky pod obrobenou plochu a materiál obrobku se příliš nezahřívá. Hloubka teplem ovlivněné vrstvy se pohybuje v rozmezí od 0,3 do 1 mm a je ji proto možno nějakou dokončovací metodou odstranit

Plazma je takový stav plynů, při kterém se stávají vodivými ionizací atomů. Je to směs elektronů a kladných iontů, která může být rozložena uvnitř plynu z neutrálních částic. Teplota částečně ionizované plazmy je 5 000 až 15 000 °K a teplota úplně ionizované plazmy asi 100 000 °K. Plazma se nejčastěji tvoří ohřátím látky na vysokou teplotu nebo obloukovým výbojem mezi dvěma uhlíkovými elektrodami. [1,2,3,8]

### 2.3.2.1 *Použití plazmy*

- Široké využití v oblasti svařování materiálů,
- Řezání materiálu a vyřezávání profilů do plechů o různé tloušťce,
- Tvoření plyných drážek do hloubky kolem 2 mm
- Soustružení plazmovým paprskem. [1]

Mezi výhody plazmového řezání v porovnání s jinými technologiemi patří, lepší kvalita řezu při řezání hrubých materiálů, při řezání tenkých plechů je cenově výhodnější než laser, rychlejší než při řezání plamenem.

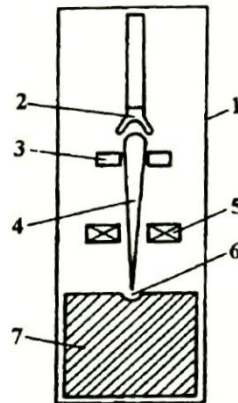
Mezi nevýhody se řadí, vyšší náklady v porovnání s řezáním plamenem, méně kvalitní hrany v porovnání s laserem. [1]

### 2.3.2.2 *Plazmové zařízení*

Skládá se ze zdroje energie, ionizátoru, plazmového hořáku, a řídicí jednotky (NC nebo CNC). Plazmové zařízení se dělí na dva typy, které používají transferovaný a netransferovaný oblouk. U transferovaného zařízení se elektrický oblouk tvoří mezi materiálem a vnitřkem plazmového hořáku a používá se pro vodivé materiály. U netransferovaného typu se oblouk tvoří pouze v plazmovém hořáku mezi dvěma elektrodami a používá se pro nevodivé materiály. [1]

### 2.3.3 **Obrábění paprskem elektronů**

Podstatou technologie je využití energie paprsků soustředěných na velmi malou plochu obrobku. V místě dopadu se kinemická energie paprsků přeměňuje v tepelnou, kterou se obráběný materiál taví a sublimuje. Paprskem elektronů je možno vrtat díry o průměru menší než 0,1 mm, štěrbiny, drážkovat, řezat libovolné tvary. Přesnost řezání a drážkování se udává až v tisícinách mm. Svazkem paprsků elektronů lze obrábět libovolný materiál bez ohledu na jeho mechanické či fyzikální vlastnosti, ale obrobek musí být umístěn ve vakuové komoře. [10]

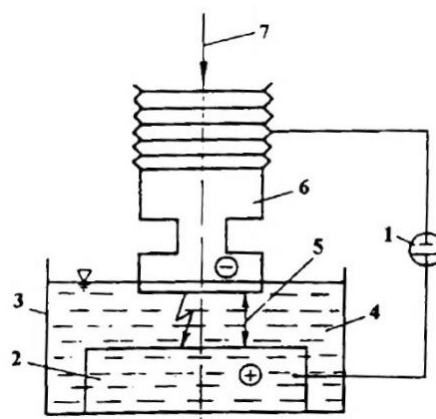


Obr. 13 Schéma obrábění paprskem elektronů. [8]

1-vakuová komora, 2-katoda, 3-anoda, 4-elektronový paprsek, 5-elektromagnetické řízení paprsku,  
6- dopad paprsku, 7-obrobek

### 2.3.4 Elektrojiskrové obrábění

Využívá erozivních účinků elektrické jiskry v dielektriku, bez dotyku elektrod. Využívá se k děrování přesných děr malých průměrů a děr libovolných průřezů, k hloubení dutin atd. Nástroj (elektroda) se pohybuje kolmo na obráběnou plochu. Nástrojová elektroda má tvar vyráběné dutiny nebo díry a je vyrobena z mědi, mosazi, wolframu nebo slitin hliníku. Jako dielektrikum se používá petrolej a transformátorový olej. Přesnost obrábění závisí na rychlosti úbytku elektrody při vyjiskřování a výkon se odvíjí od konstrukce vyjiskřovacích strojů a dosahuje až  $10\,000\text{ mm}^3\cdot\text{min}^{-1}$ . [10]



Obr. 14 Princip elektrojiskrového obrábění. [8]

1-zdroj, 2-obrobek, 3-pracovní vana, 4-pracovní kapalina, 5-pracovní mezera, 6-nástrojová elektroda,  
7-směr posuvu

### 3 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

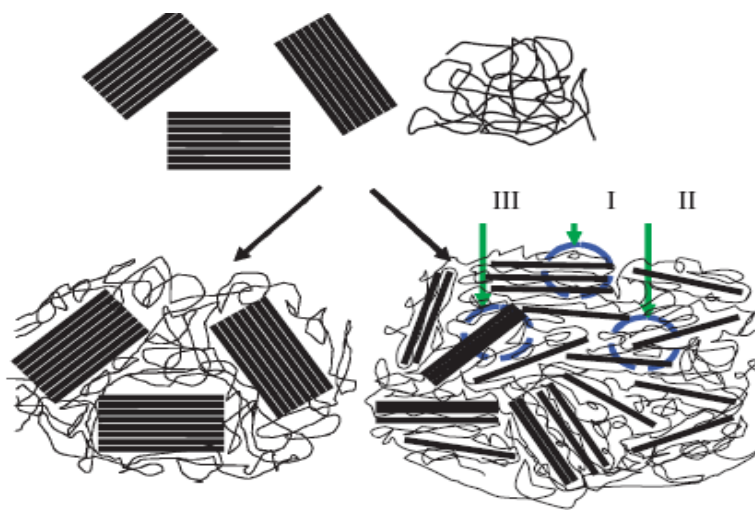
Kompozitní materiály se skládají ze dvou a více složek. Tyto složky se odlišují mechanickými a fyzikálními vlastnostmi. Kompozity tvoří matrice a výztuž. Výztuž je tvrdší a pevnější nespojitá složka, zatímco matrice je obvykle poddajnější složka, která plní funkci pojiva. [12, 13]

Materiál se považuje za kompozit, pouze pokud splňuje tyto podmínky:

- Vlastnosti daných složek se musí lišit
- Podíl výztuže musí být minimálně 5 % a víc
- Kompozity musí vznikat smícháním složek
- Výztuž musí být výrazně pevnější než matrice
- Smícháním složek vzniknou lepší vlastnosti než u původních složek. [12]

Těmito podmínkami se kompozitní materiály vymezují, proto za kompozity nelze považovat například plast obsahující přísady barviv nebo oxidů.

V průmyslu mají největší využití mikrokompozity jejichž příčné rozměry jsou 1-100  $\mu\text{m}$ . Ve srovnání s kovy mají menší hustotu a dosahují velké měrné pevnosti a měrného modulu. Makrokompozity mají rozměry výztuže 1-100 mm a jsou používány hlavně ve stavebnictví. Za makrokompozity můžeme považovat plátované kovy, konstrukce nebo vícevrstvé materiály (např. silnice, chodníky). Rozměry vláken u nanokompozitů se udávají v jednotkách nm. [12, 13]

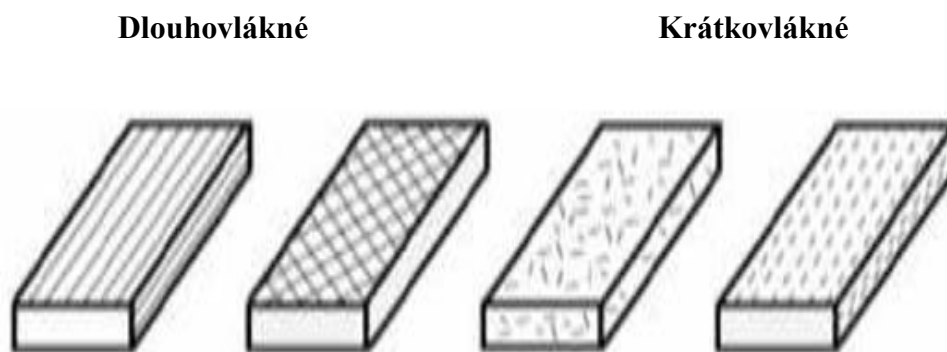


Obr. 15 Rozdíl mezi mikrokompozitem a nanokompozitem na bázi jílu. [12]

### 3.1 Dělení kompozitů

Z důvodu jasného vymezení, kompozity dělíme do mnoha skupin dle různých kritérií. Nejběžněji se dělí podle geometrického uspořádání, orientace vláken, použitá technologie výroby nebo podle typu použité matrice. [12, 13]

Máme kompozity jednovrstvé nebo vícevrstvé. Jednovrstvé kompozity se skládají z dlouhých nebo krátkých vláken, které jsou orientovány jednosměrně nebo mnohoseměrně. Mezi vícevrstvé kompozitní materiály řadíme lamina, lamináty nebo hybridní lamináty. Lamina je jedna vrstva kompozitu s tloušťkou zanedbatelnou ve srovnání se zbývajících rozměry. Lamináty jsou tvořeny z materiálů, které jsou v každé vrstvě stejné a mají různou orientaci výztuže. [12, 13]



Obr. 16 Dělení výztuže podle orientace vláken. [12]

Podle tvaru výztuže dělíme mikrokompozity na dvě základní skupiny:

1. Vláknové kompozity – a) s kontinuálními vlákny  
b) s krátkými vlákny
2. Částicové kompozity – a) izometrické  
b) anizometrické. [12]

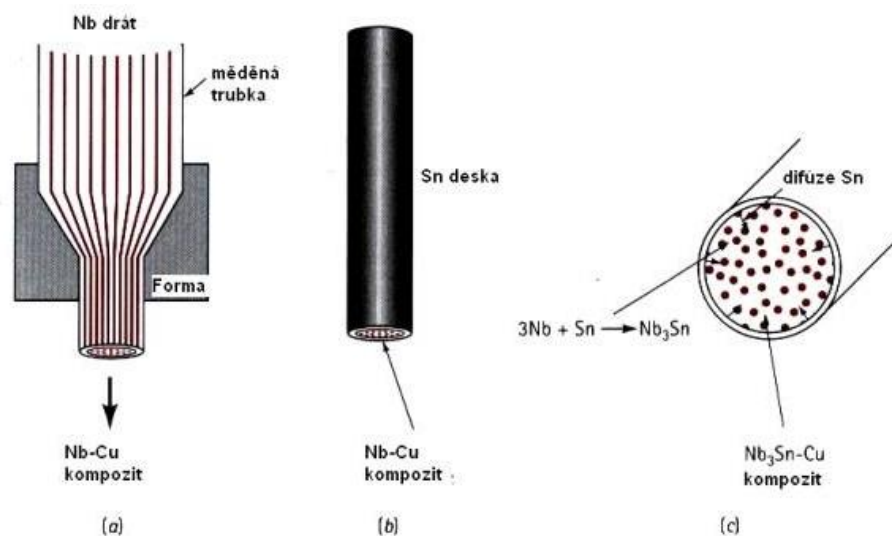
### 3.2 Charakteristika výztuže

Vlákna jsou vždy mnohem pevnější než stejné materiály v kompaktní podobě. Pevnost vláken roste se zmenšujícím se průřezem, protože přirozené defekty struktury jsou u vláken malých průměrů tak male a navíc příznivě orientované svým delším rozměrem ve směru osy vlákna. Pevnost vlákna se také odvíjí od jeho délky. Části vzniklé porušením vlákna při tahovém namáhání mají větší pevnost než vlákno původní. [12,14]

Pro kompozity se aplikují tyto vlákna:

- Skleněná
- Uhlíková
- Polymerní
- Keramická
- Kovová

Vlákna se dodávají ve formě rovingu nebo v podobě textilií. Polymerní matrice se nevyztužují kovovými nebo keramickými vlákny nejen pro cenovou náročnost, ale také proto, že jde o vlákna s větší hustotou. Pro kovové a keramické matrice zase nelze použít vlákna s malou chemickou a tepelnou odolností. Rozlišujeme proto vlákna pro polymerní matrice (skleněná, polymerní) a vlákna pro vysokoteplotní aplikace (uhlíková, keramická, kovová). [12,14]



Obr. 17 Způsob výroby kompozitních vodivých drátů. [12]

### 3.3 Skelná vlákna

Vlákna s pravidelným kruhovým průřezem, tažená z roztavené skloviny a používaná pro textilní účely. Skleněná vlákna z bezalkalické skloviny jsou dobrým elektrickým izolantem s vysokou prostupností záření, proto se nazývají E-vlákna (elektrická) a jejich sklovina jako E-sklovina. Je to nejvíc používaný druh skloviny pro výrobu vláken, který tvoří 90 % z celkového trhu. Dále je hojně využívána C-sklovina s vysokou odolností proti kyselinám a proti chemicky agresivním látkám. [12]

#### 3.3.1 Vlastnosti skelných vláken

- Jsou nehořlavé, ohnivzdorné
- Bod měknutí E – skloviny je vyšší jak 625 °C
- Modul pružnosti v tahu skleněných vláken je zhruba stejně velký jako hliníku a činí asi jednu třetinu hodnoty oceli. Pevnost v tahu je vyšší než u jiných vláken a oceli.

Tepelné vlastnosti skelných vláken jsou lepší než tepelné vlastnosti jiných materiálů. Ani teplotní namáhání při 250 °C nesnižuje hodnoty mechanických vlastností. [12]



*Obr. 18 Detail skelných vláken. [12]*

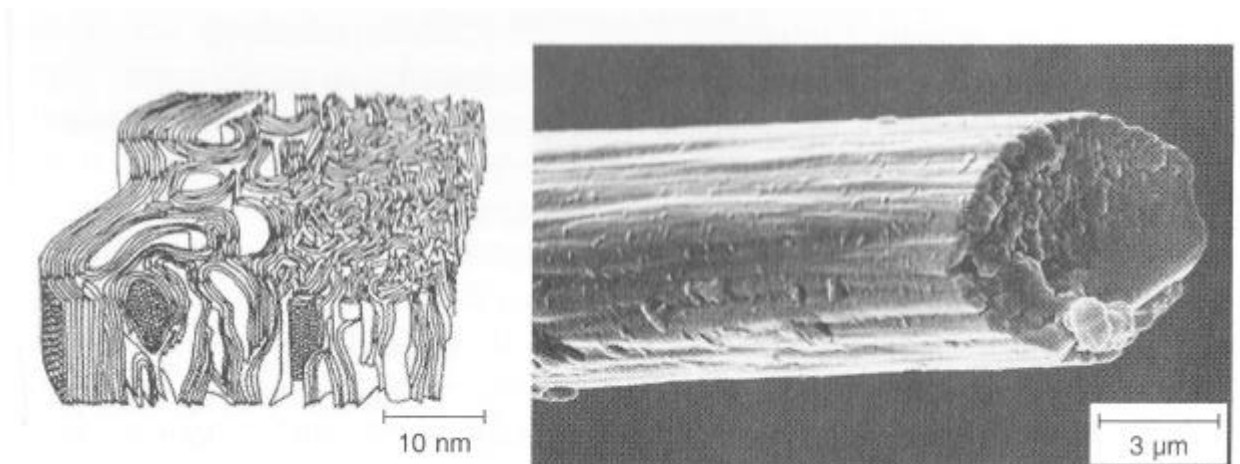
### 3.4 Uhlíková vlákna

Jsou to vlákna s velmi vysokou pevností a tuhostí, ale s nízkou tažností. Použité výchozí organické suroviny ve vláknitém tvaru se nejprve karbonizují. Přitom jsou odštěpeny téměř všechny prvky až na uhlík. Se vzrůstající teplotou, a tím zvyšující grafitizací, se zlepšují mechanické vlastnosti. Při teplotě nad 1800 °C je tvorba grafitové struktury skončena, i když



vzdálenost vrstev ve vláknech zůstává vždy větší než u vrstev v grafitu. Výchozí surovinou pro výrobu uhlíkových vláken jsou tyto materiály. [12]

- Celulóza – vlákna nemají úplně dobrou strukturu, používají se pro výrobu izolačních materiálů
- Polyakrylonitril – hojně využívané, tento druh vláken označujeme jako standardní
- Smola – mají dobré tepelné a elektrické vlastnosti. [12]



Obr. 19 Detail uhlíkového vlákna. [12]

### 3.4.1 Vlastnosti uhlíkových vláken

- Mimořádně odolné vůči korozi
- Dobrá elektrická a tepelná vodivost
- Lze je použít jako implantáty, z důvodu jejich dobré snášenlivosti s tělesnými tkáněmi
- Při delším skladování ztrácejí vlákna ohebnost
- Vysoká odolnost proti dlouhodobému dynamickému namáhání. [12]

### 3.5 Charakteristika matrice

- Přenos namáhání na výztuž
- Přenos namáhání mezi jednotlivými vlákny
- Zajištění správné geometrické polohy vláken a tvarové stálosti kompozitu
- Ochrana před okolními vlivy

Funkci pojiva by si matrice měla udržet i po prvních poruchách vláknové výztuže. Mezní poměrné prodloužení matrice při tahovém namáhání by mělo být větší než mezní prodloužení vláken. Tuto podmínku splňují pouze polymerní a kovové matrice. Keramické, skelné a uhlíkové matrice mají mezní prodloužení při lomu menší než vlákna (Obr. 17). [14]



Obr. 20 Rozdíl v křivkách poměrné prodloužení – napětí vybraných matric v porovnání s uhlíkovým vláknem. [14]

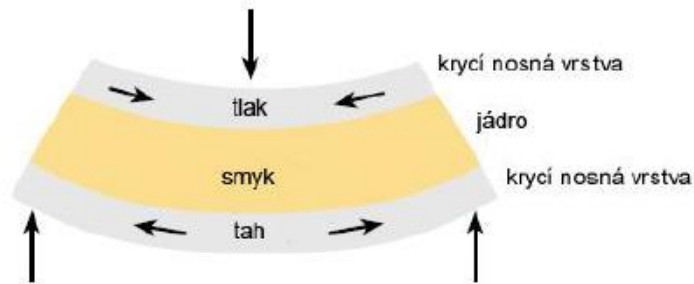
Nejsnadněji se kompozity připravují, jestliže matrici lze použít v kapalném stavu. K základním charakteristikám kapalného stavu, který má vliv na technologii přípravy kompozitu, patří povrchová energie viskozita. Základním předpokladem pro dobrou smáčivost výztuže je, aby pro vlákna s vysokou povrchovou energií měla kapalná matrice povrchovou energii co nejmenší. [14]

### 3.6 Vlastnosti kompozitních materiálů

Významnou vlastností vláknových kompozitů je skutečnost, že negativní mechanické vlastnosti složek se u výsledného materiálu neprojeví. Kompozit složený z křehkých vláken, které jsou uloženy v křehké matrici má dobrou odolnost vůči křehkému lomu. Oproti homogenním materiálům mohou být poruchy matrice i vláken četnější a přesto nevedou k úplnému lomu. Při šíření trhlin v matrici ve směru kolmém k osám vláken, dochází k otupování vrcholku trhlin tak, že se trhlina šíří po mezifázovém rozhraní, což má za následek větší trvanlivost kompozitního materiálu. Kompozit dosahuje lepších vlastností než by odpovídalo průměru odvozených vlastností složek. Jde o tzv. synergický efekt. [14]

### 3.7 Sendvičové struktury

Efektivní sendvičová struktura je tvořena dvěma tuhými a pevnými potahy zatěžovanými tahovými a tlakovými silami a jádrem o relativně nízké hustotě, které přenáší smykové síly mezi potahy. [20]



Obr. 21 Namáhání tlakovými a tahovými silami. [20]

Sendvičové konstrukce jsou uplatňovány převážně v letecké a dopravní technice, kde se využívá jejich hlavních předností, a to vysoké ohybové pevnosti a tuhosti při nízké hmotnosti. Sendviče však lze nalézt i v ostatních průmyslových odvětvích. Ohybová tuhost a pevnost nejsou zdaleka jejich jedinými přínosy. [20]

- Odolnost proti ohni
- Únavová odolnost
- Odolnost proti šíření trhlin
- Odolnost proti rázům, akustická izolace

	Celistvý materiál	Síla jádra t	Síla jádra 3t
tuhost	1.0	7.0	37.0
pevnost v ohybu	1.0	3.5	9.2
hmotnost	1.0	1.03	1.06

Obr. 22 Příklady konstrukčních vlastností sendvičových panelů. [20]

Tyto vlastnosti jsou určeny převážně materiálem jádra. Sendviče nemusí být pouze rovné desky, ale mohou vytvářet i složité plochy s výstupky a prolisy. Pro složitě tvarované sendviče je použití kovových potahů velmi nákladné, proto se zde převážně používají kompozitní potahy. [20]

### 3.7.1 Jádrové materiály

Jádrové materiály jsou nejčastěji vyráběny z pěny, dřeva a voštiny. Pěnové jádra jsou odolnější proti únavě materiálu než dřevo, tudíž lamináty z pěnového jádra vydrží déle a jsou lehčí. Dřevo je používáno tam, kde působí velké kompresní zatížení a taktéž tam, kde je potřeba velká hustota materiálu. Cenově vychází podstatně levněji než použití pěnového jádra. Voštinové materiály se díky své vysoké pevnosti, teplotní stabilitě a nízké hmotnosti využívají v leteckém průmyslu. [20]

#### 3.7.1.1 PUR pěny

Polyuretan (PUR) pěny mají dobrou pevnost v tlaku a středně fyzikální vlastnosti při vyšších hustotách, ale mají tendenci být křehké, (nízká odolnost proti opotřebení) a mají relativně nízkou únavovou životnost. Vzhledem k tomu jsou tyto pěny obvykle používány jako protihlukové a izolační panely. Tyto pěny jsou v provedení o vyšší hustotě a menší drobnosti, značně používány na výrobu traverz (díky jejich vysoké pevnosti v tlaku), zatímco hmoty s nižší hustotou se používají jako segmenty nebo podélníky. [20]

## 4 HODNOCENÍ INTEGRITY POVRCHU

Jednou z cest, jak dosáhnout zvýšení produktivity práce ve výrobě, je zabezpečit intenzifikaci řezného procesu. Přitom je však nutné brát i hledisko jejího vlivu na jakost obrobeného povrchu. Vezmeme-li v úvahu plné využití řezivosti obzvláště nových nástrojových materiálů a příkonů strojů, které jsou několikanásobné ve srovnání s klasickými, vzniká zde otázka, zda toto množství energie převedené na břit nástroje neovlivní výrazněji vlastnosti obrobeného povrchu, především jeho jakost. [16]

Jakost obrobeného povrchu je možné posuzovat dle následujících hledisek:

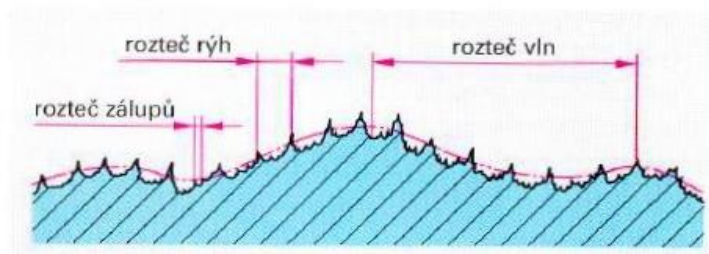
- Přesnost rozměru a tvaru – je dána přesností stroje, tuhostí soustavy stroj-nástroj-obrobek a dalšími faktory.
- Drsnosti a mikrostrukturou – ovlivněna bezprostředně procesem řezání. Hlavní prvky jsou řezná rychlost, tvar nástroje, opotřebení a materiál nástroje.
- Vlastnosti povrchové vrstvy – jsou vyjádřeny strukturálními změnami, stupněm zpevnění, které jsou přímo úměrné velikosti zbytkových napětí. [16]

**Skutečný povrch** výrobku vykazuje oproti struktuře uvedené na výkresu odchylky, závislé na výrobním postupu. Omezuje těleso a odděluje ho od okolního prostředí. (obr. 18)

Odchylky povrchu	Příklady	Příčiny
1. řádu 	nerovinnost nekruhovitost	deformace při upnutí
2. řádu 	zvlnění	chvění při obrábění
3. řádu 	drsnost	rýhy s roztečí posuvu na 1 otáčku
4. řádu 		zdrsnění celého povrchu
		velký posuv nebo nevhodný nástroj
		nevhodný nástroj, nebo řezná rychlost

Obr. 23 Odchylky povrchu od požadovaného tvaru. [15]

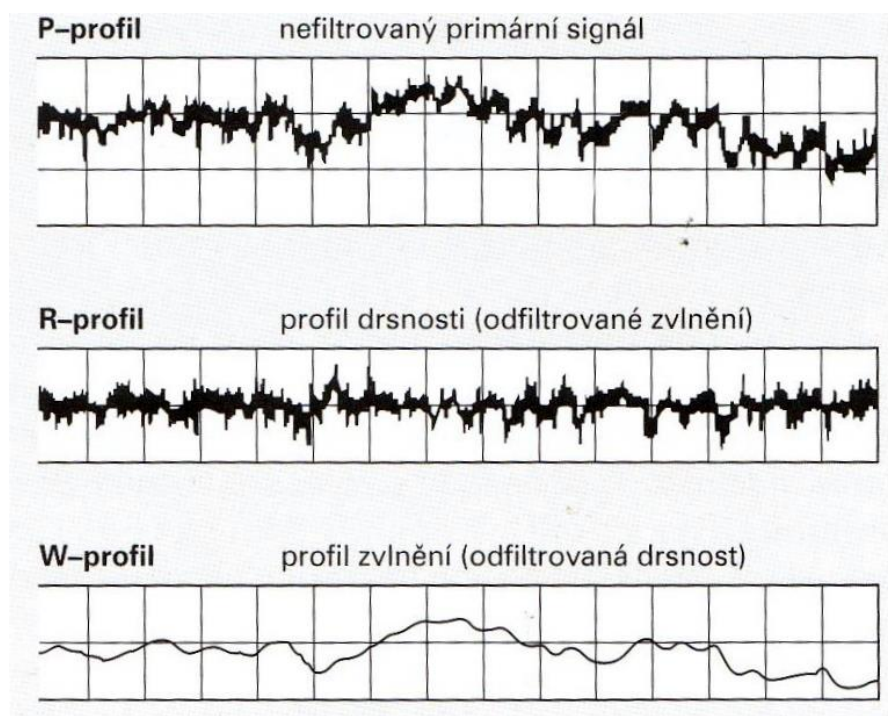
**Primární profil** (P-profil) je profil s velmi malými detaily, sejmutý diamantovým hrotem nebo laserem. Křivku profilu lze složit z různých vlnových délek. Sejmutý primární profil je výchozím parametrem pro určení nerovností různých řádů (obr. 19). [15]



Obr. 24 Primární povrch profilu (P-profil). [15]

**Profil drsnosti** (R-profil) je profil odvozený ze základního profilu potlačením dlouhovlnných složek použitím filtru profilu.

**Profil vlnitosti** (W-profil) je profil odvozený postupnou aplikací filtru a potlačením krátkovlnných složek. [18]



Obr. 25 Diagramy profilů povrchu. [15]

#### 4.1 Základní parametry profilu povrchu

Pro tři profily povrchu se stanovují parametry označované P, R a W. K těmto parametrům patří hloubka profilu P a parametry profilu drsnosti Ra, Rz.

- **Střední aritmetická úchylka profilu Ra**

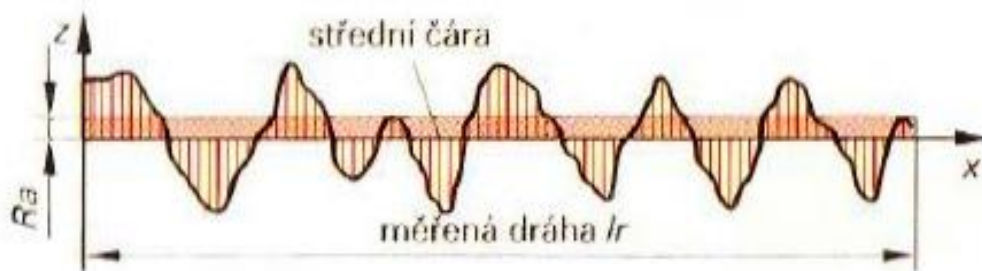
Je přednostní výškovou charakteristikou drsnosti profilu a je definována jako střední aritmetická hodnota Ra absolutních Z úchylek profilu v celém intervalu měření  $l_r$ .

$$R_a = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i}{n}$$

Kde  $Z_i$  - souřadnice n bodů profilu povrchu v mezích celkové měřené délky,

$n$  – počet bodů profilu povrchu na měřené délce.

Hodnoty Ra málo vypovídají o funkčních vlastnostech povrchu, které jsou více závislé na jemném zdrsňení způsobené obráběcím strojem. [2, 15,17]



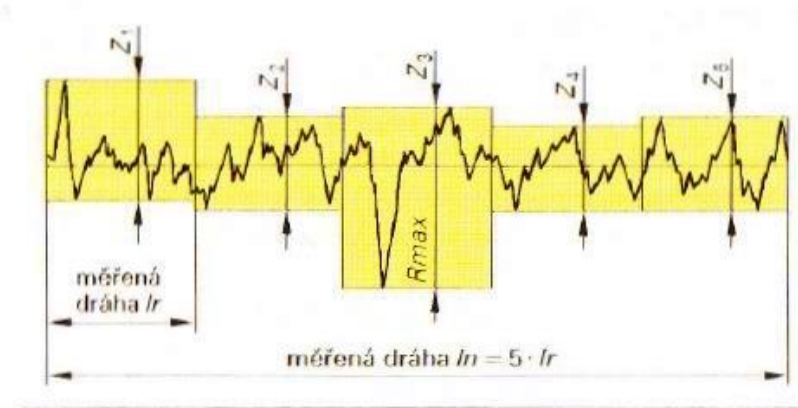
Obr. 26 Střední hodnota drsnosti. [15]

- **Největší výška profilu Rz**

Je střední hodnota jednotlivých hloubek drsnosti Z1 až Z5.

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 |Z_{ti}|}{5}$$





Obr. 27 Maximální a střední hloubka drsnosti profilu. [15]

- **Celková výška nerovnosti povrchu**

Je výšková charakteristika drsnosti povrchu, určená vzdáleností mezi čarou výstupků profilu a čarou prohlubní profilu v rozsahu základní délky.

$$Rt = Zp + |Zv|$$

Kde  $Z_{pi}$  – je výška  $i$ -tého nejvyššího výstupku profilu,

$Z_{vi}$  – je hloubka  $i$ -té nejvyšší prohlubně profilu. [17,18]

- **Průměrná šířka prvků profilu  $Rsm$**

Aritmetický průměr šířek  $Xs$  prvků profilu v rozsahu základní délky.

$$RSm = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{si}$$

- **Šikmost posuzované plochy  $Rsk$**

Podíl průměrné hodnoty třetích mocnin pořadnic  $Zx$  a třetí mocniny hodnoty  $Rq$  v rozsahu základní délky.

$$Rsk = \frac{1}{Rq^3} \left[ \frac{1}{lr} \int_0^{lr} |Z^3 x| dx \right]$$

Kde  $Zx$  - je hodnota pořadnice

$lr$  - je rozsah základní délky.[18]



## 4.2 Zbytková napětí

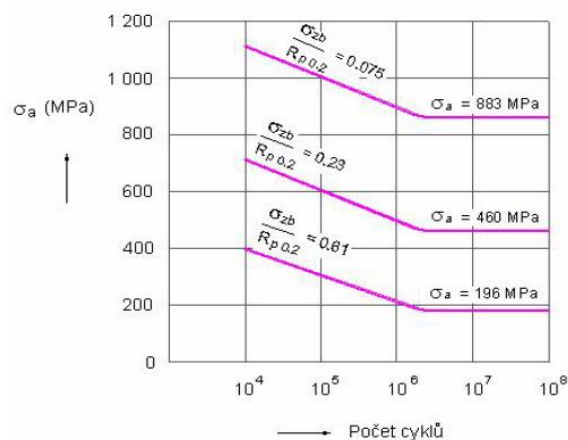
Při posuzování vlivu technologických procesů na vlastnosti povrchové vrstvy obrobku při jeho výrobě je možné vycházet z druhu a intenzity energií, které se na jeho realizaci podílejí. Jde hlavně o energii tepelnou, chemickou a mechanickou. Je potřeba brát i vlivy metalurgické, fyzikální a také vlastnosti materiálu[16]

Hlavními příčinami vzniku zbytkových napětí jsou:

- Nerovnoměrný ohřev a ochlazování materiálu, které má za následek roztažení a smrštění
- Nerovnoměrná plastická deformace v obrobeném povrchu
- Chemické procesy, spojené s reakcí částic pronikající do povrchové vrstvy
- Nerovnoměrné změny struktury, způsobené teplem a mechanickými silami. [16]

Každá technologická operace dosahuje přestavby zbytkových napětí svým vlastním způsobem jen v takovém objemu materiálu, v jakém je schopna vyvolat plastickou deformaci a tepelně jej ovlivnit. [16]

Podstatou zbytkových napětí je tedy pružně-plastická deformace v oblasti tvoření třísky. Důležitým faktorem je doba působení vlivů podmínek řezání a rychlost změn probíhajících stavů. To se značně projevuje například u broušení, kde je ohřev velmi rychlý a krátkodobý, rychlost ohřevu i doba chladnutí probíhají za extrémních podmínek. I když na jakost povrchové vrstvy má největší vliv poslední operace, může dojít při nevhodně zvoleném sledu operací k zachování negativního ovlivnění povrchu z předchozí operace. [16]



Obr. 28 Závislost velikosti zbytkových napětí na mezi únavy v ohybu. [16]

### 4.3 Měření drsnosti povrchu

#### 4.3.1 Měření dotykovým způsobem

K měření povrchu se používají speciální jednoúčelové přístroje, profilometry, které umožňují snímání profilu proměřovaného povrchu. Nasnímaná data se buďto vyhodnotí přímo přístrojem nebo připojeným počítačem, jenž umožňuje po získání dat z měřicího zařízení jejich zpracování pomocí softwaru k tomu určenému. Tyto softwary jsou programovány přímo k jednotlivým přístrojům a jejich využití je tím jasně dáno. Umožňují jak vyhodnocení výsledků, tak i řízení vlastního procesu snímání povrchu, čímž se minimalizuje vliv obsluhy na výsledek měření. [19]



Obr. 29 Způsoby měření dotykovým způsobem. [19]

#### 4.3.2 Měření bezdotykovým způsobem

Optické metody měření drsnosti povrchu mají ve srovnání s dotykovými tyto výhody:

- Nehrozí znečistění nebo znehodnocení povrchu součásti dotykem měřidla
- Možnost poskytovat výsledky měření okamžitě.

Za nevýhody lze považovat:

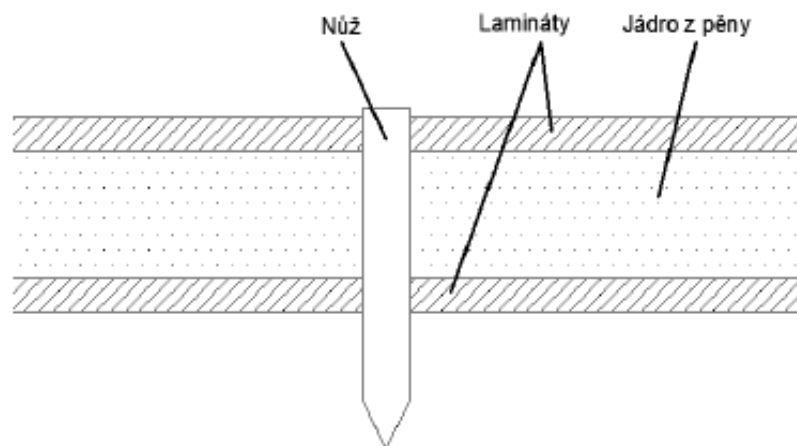
- Nejsou v praxi příliš využívány
- Nutnost apriorních předpokladů o charakteru drsnosti neznámého měřeného povrchu, které jsou nutné pro řešení interakce světla s povrchem. [19]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

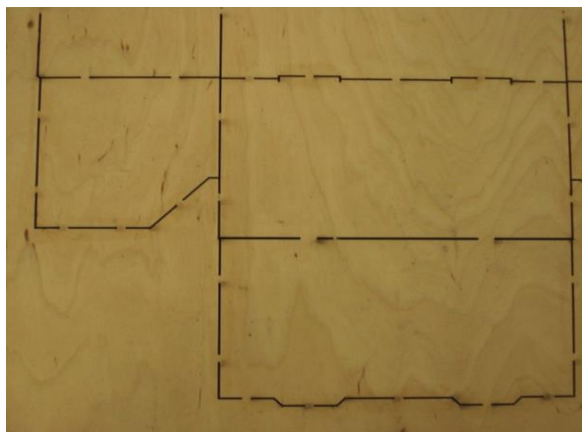
## 5 VÝROBA KOMPOZITNÍCH VZORKŮ A STANOVENÍ PARAMETRŮ DRSNOSTI

V experimentální části je zkoumán vliv procesních podmínek u laserového obrábění a obrábění vodním paprskem na šířku řezu a faktory ovlivňující kvalitu řezu. Zkoumané materiály jsou kompozitní desky, do kterých byla vyřezaná drážka o malé šířce. Vzhledem k velmi malým tolerancím šířky spáry, je nutné využít nekonvenčních technologií, které jsou z hlediska přesnosti pro tuto aplikaci vhodnější než běžné způsoby obrábění.

Kompozitní desky slouží pro výrobu střížného nástroje v papírenském průmyslu. Do vyřezané drážky v desce se vloží nůž. Spára má předem určený průměr volený dle velikosti nože. Výsledná tloušťka materiálu musí být 18 mm, aby se nástroj dal bez problému ukotvit v desce. V současné době se používá jako výchozí materiál dřevo, které kvůli velké hmotnosti a dalším vlastnostem není vhodné pro tuto aplikaci.



Obr. 30 Schéma střížného nástroje



Obr. 31 Dřevěná deska na střížný nástroj

## 5.1 Výroba desek

Před výrobou desek bylo nejprve nutné přichystat si potřebný materiál a pomůcky. Poté mohla proběhnout samotná výroba a vyřezání drážek za pomoci laserového a vodního paprsku.

### 5.1.1 Materiál a pomůcky

- Skelná rohož
- Skelná tkanina

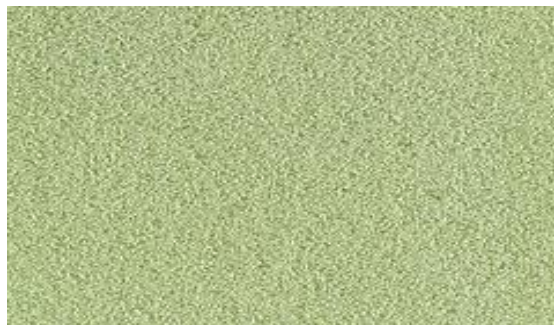


*Obr. 33 Skelná rohož*



*Obr. 32 Skelná tkanina*

- Sendvičový materiál



*Obr. 34 Pěna Herex*

- Separáční fólie
- Izolační páska
- Odsávací rohoř



Obr. 35 Odsávací rohož

- Odsávací hadice, ventil
- Vývěva
- Kovová deska formy

### 5.1.2 Skladba desek

Bylo vyrobeno celkem pět desek s rozdílnou skladbou materiálu. Desky dále budou odlišeny barevně podle použité barvy na svrchních stranách. V případě barevné shodnosti budou uváděny kromě barvy i počet vrstev skelné tkaniny. Skladba je popsána směrem od vrchní vrstvy po spodní.

#### a) Červená

- Gelcoat RAL 9010 (0,5 mm)
- 5 vrstev skelné tkaniny AEROGLOSS 220 g/m<sup>2</sup> (1 mm)
- Pěna HEREX 70 kg/m<sup>3</sup> (15 mm)
- 6 vrstev skelné tkaniny AEROGLOSS 220 g/ m<sup>2</sup> (1 mm)
- Skelná rohož (0,2 mm)



Obr. 36 Skladba červené kompozitní desky

## b) Zelená

- 20 vrstev skelné tkaniny
- Kompaktní reaktoplast



*Obr. 37 Skladba zelené desky*

## c) Modrá

- PP vrstva (1 mm)
- Samozhášivý materiál (9 mm)
- PP vrstva (1 mm)

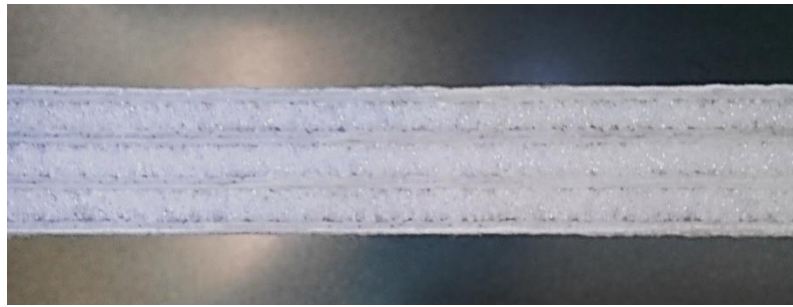


*Obr. 38 Skladba modré desky*

## d) Bílá 4 vrstvá

- Gelcoat RAL 9010 (0,5 mm)
- 4 vrstvy skelné tkaniny AEROGLOSS 220 g/m<sup>2</sup> (0,6 mm)
- Pěna PET 100 kg/m<sup>3</sup> (4 mm)
- 1 vrstva skelné rohože AEROGLOSS g/m<sup>2</sup> (1 mm)
- Pěna PET 100 kg/m<sup>3</sup> (4 mm)
- 1 vrstva skelné rohože AEROGLOSS g/m<sup>2</sup> (1 mm)
- Pěna PET 100 kg/m<sup>3</sup> (4 mm)
- 5 vrstev skelné tkaniny AEROGLOSS g/m<sup>2</sup> (1 mm)





*Obr. 39 Skladba bílé desky 4 vrstvé*

e) Bílá 5 vrstvá

- Gelcoat RAL 9010 (0,5 mm)
- 5 vrstev skelné tkaniny (0,6 mm)
- PET pěna (4 mm)
- 1 vrstva skelné rohože (1 mm)
- PET pěna (4 mm)
- 1 vrstva skelné rohože (1 mm)
- PET pěna (4 mm)
- 1 vrstva skelné rohože (1 mm)
- PET pěna (4 mm)
- 6 vrstev skelné tkaniny (1 mm)



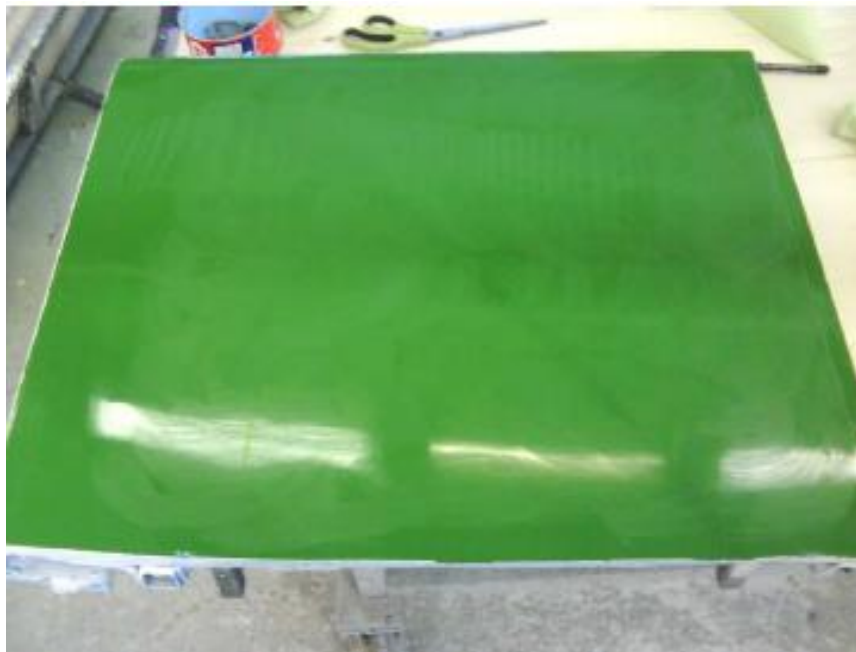
*Obr. 40 Skladba bílé desky 5 vrstvé*



### 5.1.3 Postup výroby

Kompozitní desky byly vytvářeny metodou vakuového lisování pod pružnou folii. Tato metoda není příliš běžná pro zpracování termoplastových kompozitů a hlavně slouží k optimalizaci skladby materiálu. Mezi ty nejběžnější patří lisování za pomoci lisovacího stroje nebo RTM. Velká výhodou této metody spočívá v jednoduchosti a nízké ceně. Naopak nevýhodou je nízká efektivita, velká časová náročnost přípravy, z čehož vyplývá, že tuto metodu nemůžeme aplikovat na velkosériovou výrobu. Vzorky nebo výrobky, které se takto zpracovávají, mají jen jednu pohledovou stranu, takže se hodí k aplikaci například jako kryty motorů u automobilů.

Před samotnou výrobou bylo potřeba si připravit a vyčistit formu. Forma byla tvořena kovovou deskou na podstavci, o tloušťce 5 mm. Povrch byl impregnován separační látkou, důkladně vyčištěn, z důvodu ochrany vzorků před přilepením k povrchu formy. Materiál byl rozstříhán na daný rozměr formy, a ve správném pořadí kladen na povrch formy. Nejdříve se položí vrstvy skelné tkaniny, dále sendvičový materiál a na svrchní stranu opět skelná vlákna. Taky je potřeba si přichystat odtrhovou tkaninu a odsávací rohož. Funkce odsávací rohože je zajistit odsátí přebytečné matrice a odtrhová tkanina slouží k zabránění slepení výrobku s odsávací rohoží.



*Obr. 41 Naseparovaná forma*

Jakmile je veškerý materiál vložen na povrch formy, přikryje se výsledná skladba vakuovou fólií. Ta se musí po obvodu formy důkladně utěsnit izolační páskou, aby mohlo vzniknout vakuum.



*Obr. 42 Zaizolovaná forma materiálem*

Jakmile je materiál nachystán ve formě, připraví se pryskyřice smícháním s tvrdidlem a urychlovačem, který má za úkol urychlit dobu vytvrzování. Poté se připojí vývěva a odsávací hubice a odsaje se vzduch pod izolační fólií. Ve formě vznikne podtlak 0,7 bar. Ve stejné chvíli prosycujeme materiál matricí. Po vytvrzení odstraníme fólii a rohož. Desky se odstraní z formy a poté se rozřežou.



*Obr. 43 Lisování desky vakuem*

## 5.2 Měření drsnosti povrchu vzorků

Měření závislosti drsnosti na řezné rychlosti se provádělo na nelegované a legované oceli a vzorku duralu. Řezy na těchto vzorcích se prováděly vodním paprskem o různých posuvových rychlostech a výsledky jsou popsány v grafech a tabulkách. Sledované parametry drsnosti jsou Ra, Rz, Rt a Rmr v závislosti na rychlosti řezu ( $v_f = 20 \%$ ,  $40 \%$ ,  $60 \%$ ,  $80 \%$ ,  $100 \%$ ).

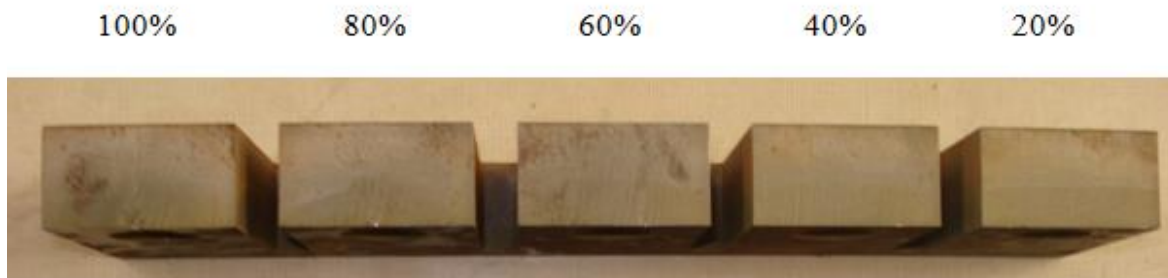
Měření bylo prováděno na přístroji Mitutoyo SJ-301 s rozsahem  $300 \mu\text{m}$ . Měření probíhalo na ploškách o šířce 25 mm ve třech hladinách (obr. 45) a vždy se začínalo od vrchní strany řezu po spodní. U řezů o rychlosti  $v_f = 100 \%$  byla jakost povrchů u všech tří vzorků natolik špatná, že nebylo možné na daném měřicím zařízení parametry, v hladinách 50 % a 75 %, vyhodnotit. Materiálové listy jednotlivých vzorků jsou přiloženy v příloze.



Obr. 44 Měřicí zařízení Mitutoyo SJ-301

### 5.2.1 Drsnost Oceli 11 343 (S 235 JRG)

Neušlechtilá konstrukční ocel. Vhodná na součásti konstrukcí a strojů menších tloušťek, tavně svařované namáhané staticky, nebo i mírně dynamicky. Drobné lisované výrobky jako přezky, stavební a nábytkové kování, přídržky, pravítka, žaluzie apod. Různé tvářené a svařované součásti, vložky, třmeny, rozpěrky, závlačky, oka, páky, rukojeti, čepy, svorníky, držáky apod. Trubky pro všeobecné účely. Vhodná ke svařování.



Obr. 45 Měřené vzorky oceli s popisem rychlostí



Obr. 46 Vzorky oceli s označenými hladinami a směrem řezu

Měření drsnosti na tomto vzorku o tloušťce 25 mm, se provádělo celkem v pěti úrovních ve směru řezu a třech hladinách (25 %, 50 %, 75 %) od svrchní po spodní stranu vzorku. Rychlosti řezání vodním paprskem u tohoto vzorku jsou 20 %, 40 %, 60 %, 80 % a 100 % posuvové rychlosti.

Při porovnání výsledků měření je možné si povšimnout, že drsnost je na konci a na začátku řezu vždy nižší, to je způsobeno zřejmě postupným rozjezdem a dojezdem trysky. U plochy s posuvovou rychlostí 100 % byla drsnost plochy tak velká, že u hladin 50 % a 75 %, měřící zařízení nebylo schopné danou hodnotu naměřit.

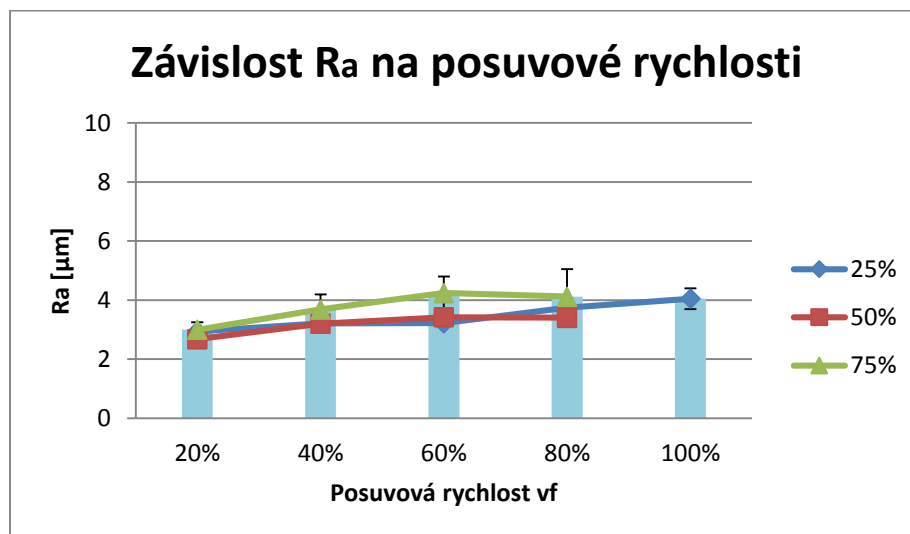
Tab. 2 Závislosti parametrů drsnosti  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_t$ ,  $R_{mr}$  na posuvové rychlosti

Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Posuvová rychlost vf				
	20 %	40 %	60 %	80 %	100 %
25 %	2,94	3,22	3,22	3,75	4,05
50 %	2,68	3,20	3,42	3,40	
75 %	3,00	3,68	4,24	4,12	

Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Posuvová rychlost $v_f$				
	20 %	40 %	60 %	80 %	100 %
25 %	18,23	20,86	19,31	22,23	26,90
50 %	16,80	20,24	20,00	20,29	
75 %	19,27	21,13	22,83	21,65	

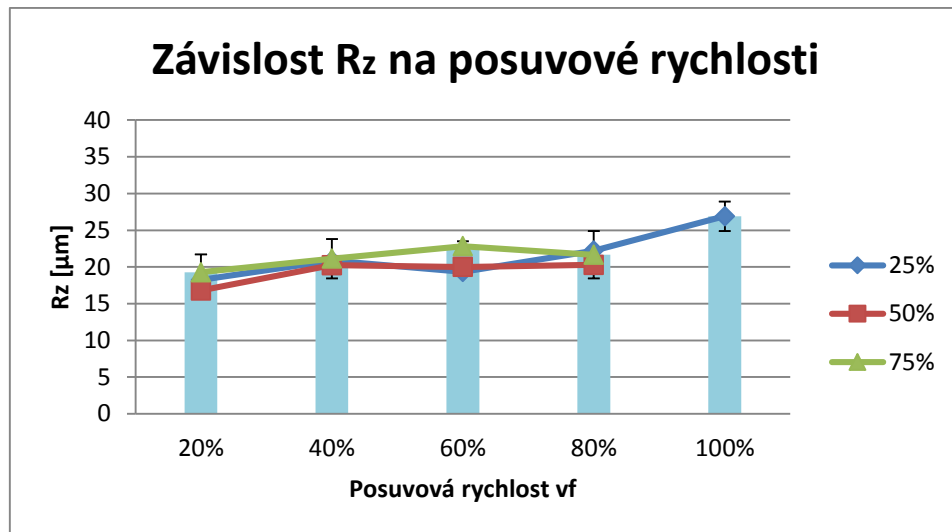
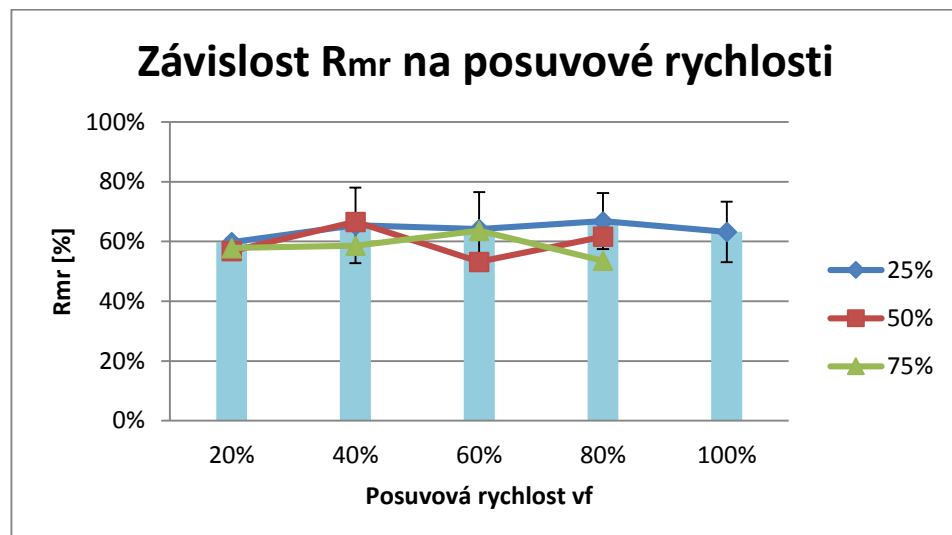
Rt [ $\mu\text{m}$ ]	Posuvová rychlost $v_f$				
	20 %	40 %	60 %	80 %	100 %
25 %	23,78	27,03	25,55	30,14	34,72
50 %	21,19	29,51	26,55	26,27	
75 %	24,40	27,49	30,84	39,32	

Rmr [%]	Posuvová rychlost $v_f$				
	20 %	40 %	60 %	80 %	100 %
25 %	60	65	64	67	63
50 %	57	67	53	62	
75 %	58	59	53	54	



*Graf 1 Závislost  $R_a$  na posuvové rychlosti*

Z grafu 1 a 2 vyplývá, že hodnoty drsnosti  $R_a$  se u tohoto vzorku příliš nemění v závislosti na rychlosti řezu ani na hloubce řezu. Jen u nejnižší rychlosti  $v_f = 20 \%$  je kvalita plochy logicky větší, než u ostatních vzorků a proto hodnoty jsou mírně nižší.

Graf 2 Závislost  $R_z$  na posuvové rychlostiGraf 3 Závislost  $R_{mr}$  na posuvové rychlosti

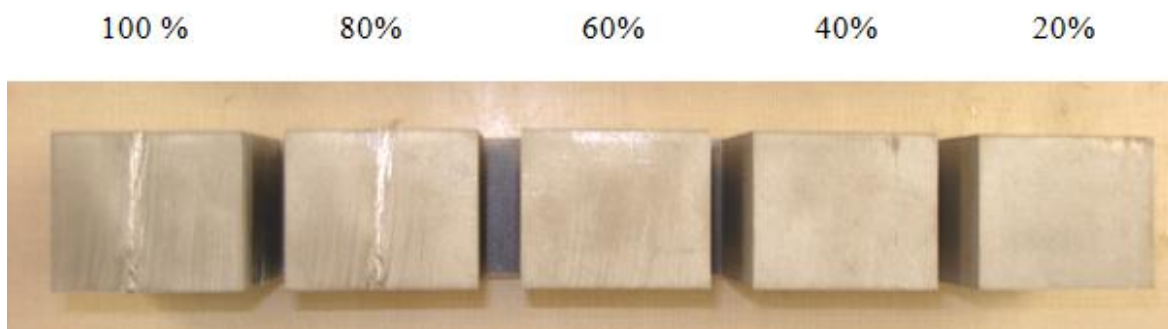
Hodnoty materiálového podílu by měly se zvětšující se rychlostí a hloubkou řezu klesat. Z grafu 3 však vyplývá, že naměřené hodnoty tomu neodpovídají a naopak se zvětšující posuvovou rychlostí i mírně rostou nebo kolísají. To může být způsobené špatnou jakostí povrchu v místě měření, odchylkou měřicího zařízení nebo nečistotami na povrchu vzorku.

#### 5.2.2 Drsnost oceli 10088-1 (DIN 1.4301)

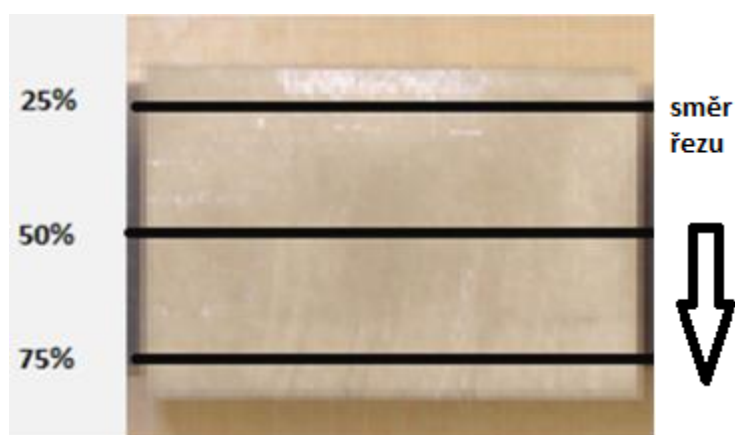
Je to nerezová ocel, legovaná (Cr 17–19,5 %, Ni 8–10,5 %). Standartní materiál s vynikající odolností vůči korozi v přirozeném prostředí (voda, venkovská a městská atmosféra) bez významných koncentrací kyselin. Lehce svařitelný bez přídavného kovu. Tepelná úprava není nutná. Má vysokou houževnatost, na což je třeba brát zřetel při obrábění. Používá se v potravinářském a farmaceutickém průmyslu. Dále se používá v chemickém průmyslu



k výrobě zařízení pro sterilizaci produktů, jako jsou kyseliny nebo výbušniny. Také se používá v papírenském průmyslu, pro potrubní systémy odpařovačů.



Obr. 47 Měřené vzorky oceli s popisem rychlostí



Obr. 48 Vzorky oceli s označenými hladinami a směrem řezu

Jako u předchozí oceli, probíhalo měření za stejných podmínek a na stejném měřicím zařízení. Řezy byly provedeny o různých rychlostech posuvu.

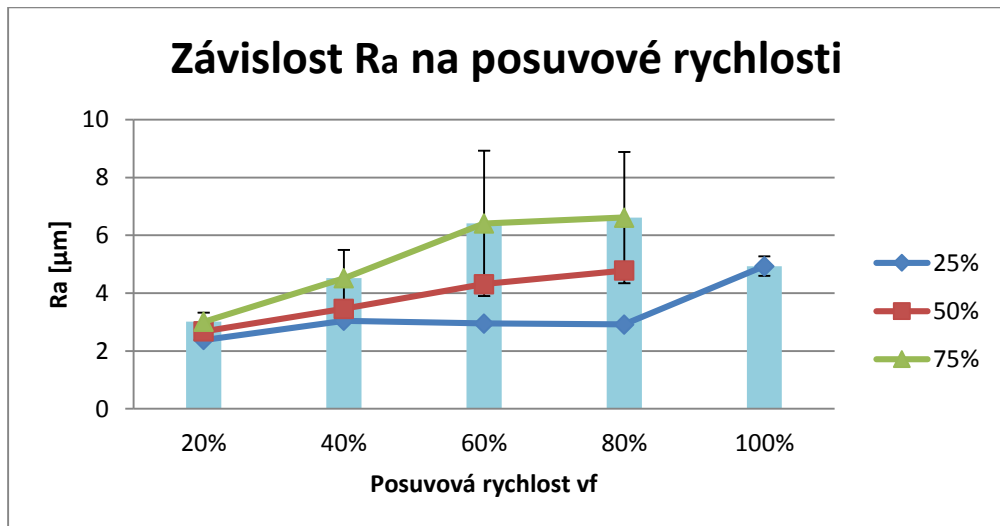
Tab. 3 Závislost  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_t$ ,  $R_{mr}$  na posuvové rychlosti  $v_f$

Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Posuvová rychlost $v_f$				
	20 %	40 %	60 %	80 %	100 %
25 %	2,38	3,04	2,95	2,92	4,93
50 %	2,68	3,46	4,31	4,78	
75 %	3,01	4,52	6,41	6,61	

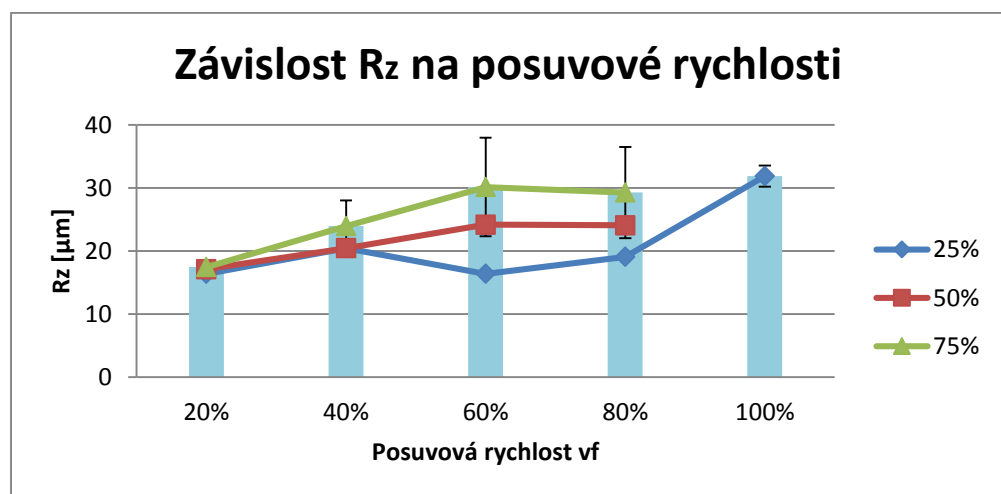
Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Posuvová rychlost $v_f$				
	20 %	40 %	60 %	80 %	100 %
25 %	16,39	20,46	16,39	19,07	31,88
50 %	17,11	20,44	24,17	24,07	
75 %	17,44	23,95	30,16	29,28	

Rt [ $\mu\text{m}$ ]	Posuvová rychlost vf				
	20 %	40 %	60 %	80 %	100 %
25 %	21,27	28,27	23,33	23,41	38,31
50 %	20,74	28,51	31,15	30,26	
75 %	21,8	32,35	40,69	39,32	

Rmr [%]	Posuvová rychlost vf				
	20 %	40 %	60 %	80 %	100 %
25 %	78	71	64	67	65
50 %	62	65	61	54	
75 %	61	66	50	55	



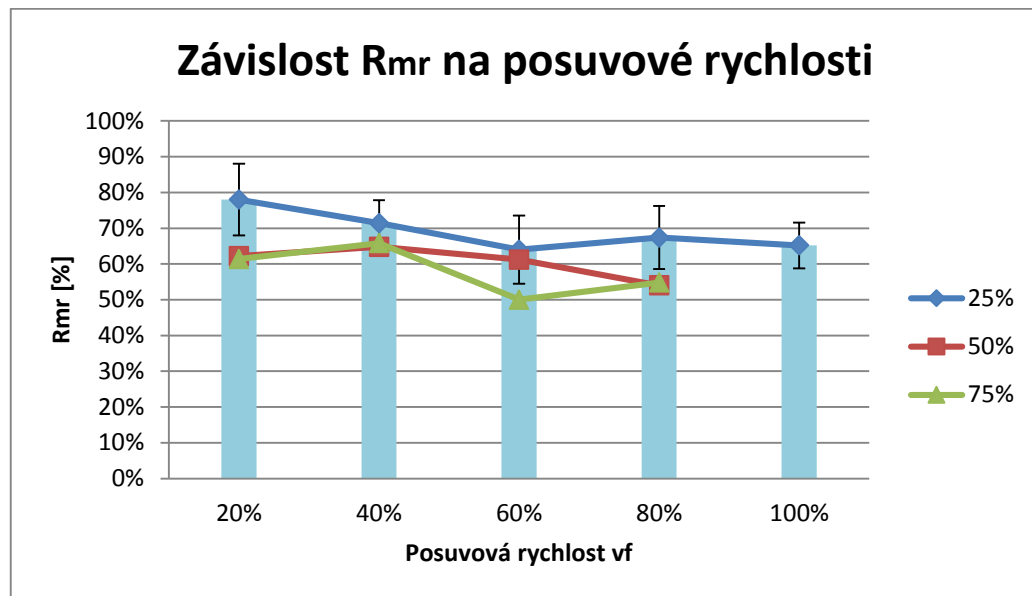
Graf 4 Závislost  $R_a$  na posuvové rychlosti



Graf 5 Závislost  $R_z$  na posuvové rychlosti



Z grafu 1 a 2 vyplývá, že čím vyšší je rychlost řezu, tím se zvyšuje hodnota drsnosti  $R_a$  i  $R_z$ . Dále z grafu lze říct, že s hloubkou řezu rostou i hodnoty drsnosti rychleji. Naměřené hodnoty při rychlostech 60 % a 80 % (ve stejné hladině) jsou téměř stejné a vliv na drsnost je zanedbatelný.



Graf 6. Závislost  $R_{mr}$  na posuvové rychlosti

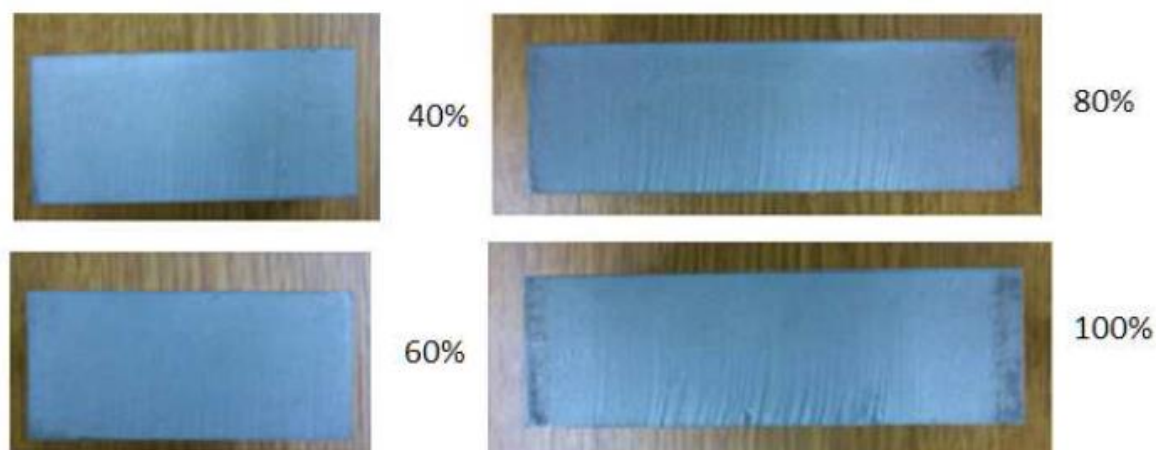
Z grafu 3 jde zřetelně vidět, že čím větší rychlostí měříme, tím klesá i hodnota materiálového podílu.

U drsnosti  $R_z$  a  $R_t$  byly výsledky i graf téměř totožné, proto graf závislosti posuvové rychlosti a  $R_t$  je uveden v příloze.

### 5.2.3 Drsnost duralu 6082 t6

Slitiny obvykle 90–96 % hliníku a 4–6 % mědi s menšími přísadami hořčíku a manganu. Pevnost i tvrdost se zvyšuje tepelným opracováním a zušlechťováním, podobně jako u ocelí. Dural je chemicky odolný a dá se velmi dobře povrchově upravovat a barvit. Nedostatkem duralových slitin je malá schopnost tlumit otřesy a pohlcovat rázy.

Řezy na tomto vzorku byly provedeny vodním paprskem při rychlostech 40 %, 60 %, 80 %, a 100 %. Vyhodnocované parametry drsnosti jsou  $R_a$ ,  $R_z$  a materiálový podíl  $R_{mr}$ . Měření probíhalo jako u předchozích vzorků a to ve třech hladinách, které jsou v grafech označeny 25 %, 50 %, a 75 %. U plochy s posuvovou rychlostí 100 % byla drsnost plochy tak velká, že u hladin 50 % a 75 %, měřící zařízení nebylo schopné hodnoty naměřit.



Obr. 49 Vzorky duralu s různými rychlostmi



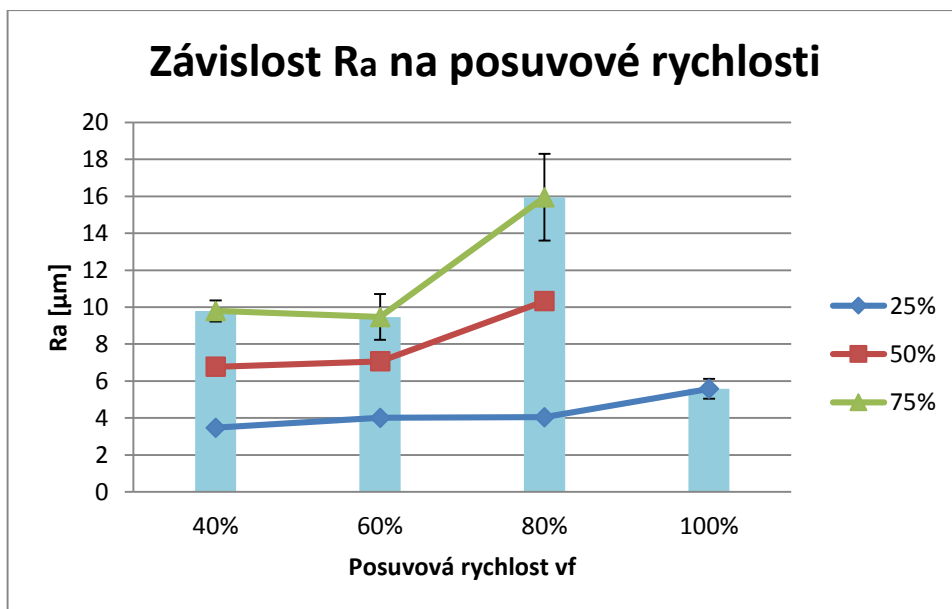
Obr. 50 Rozdělený vzorek podle jednotlivých hladin s vyznačeným směrem řezu

Tab. 4 Závislost  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{mr}$  na hloubce a rychlosti řezu

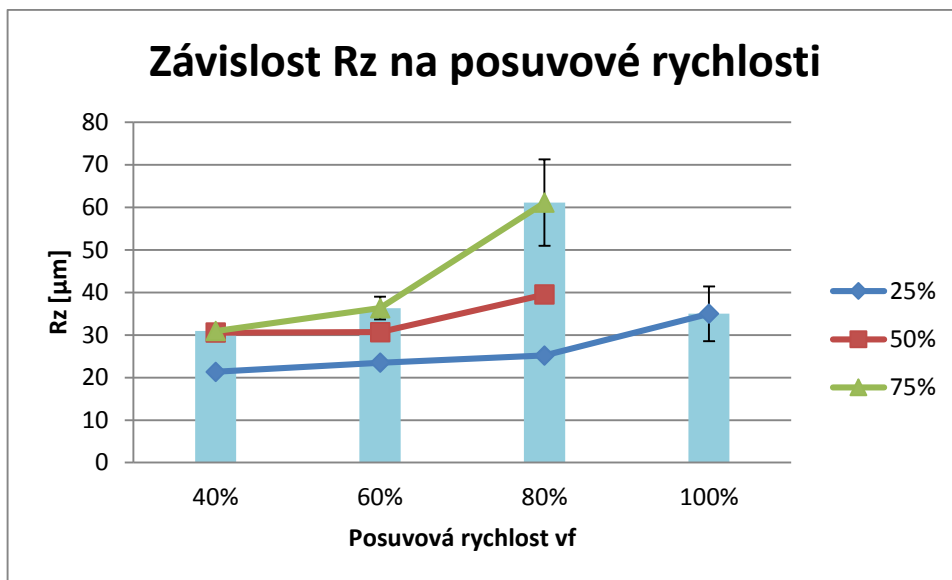
Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Posuvová rychlost $v_f$			
	40 %	60 %	80 %	100 %
25 %	6,10	6,42	7,95	8,63
50 %	6,86	7,22	10,87	
75 %	7,52	9,88	16,69	

Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Posuvová rychlost $v_f$			
	40 %	60 %	80 %	100 %
25 %	30,19	30,93	34,13	357,80
50 %	30,50	31,16	40,09	
75 %	30,36	35,66	60,66	

Rmr [%]	Posuvová rychlost vf			
	40 %	60 %	80 %	100 %
25 %	70	68	63	54
50 %	55	69	53	
75 %	63	51	50	

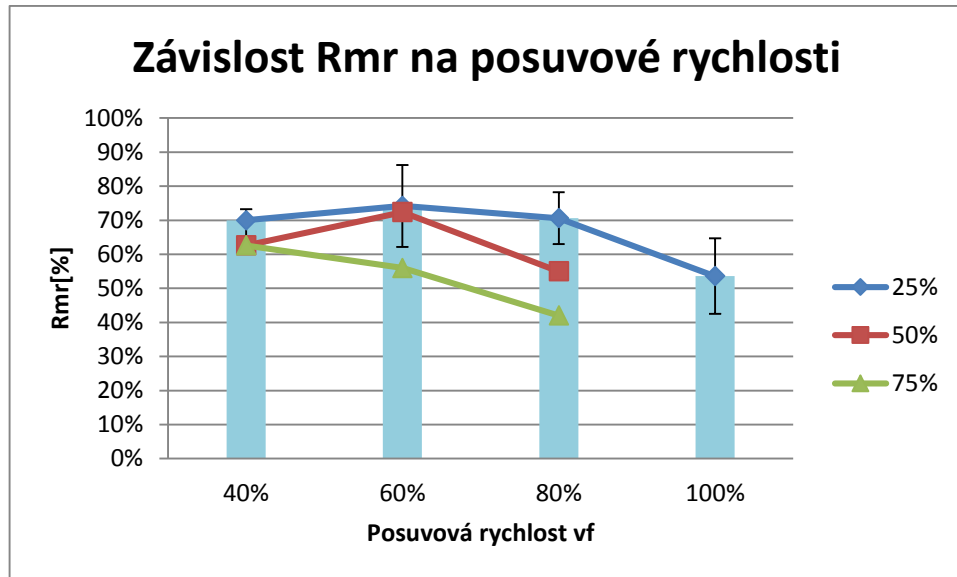


Graf 7 Závislost Ra na posuvové rychlosti



Graf 8 Závislost Rz na posuvové rychlosti

Z grafu 7 a 8 jde vidět, že se zvyšující hloubkou řezu roste i hodnota Ra, Rz. Stejně tomu je i se závislostí na posuvové rychlosti.

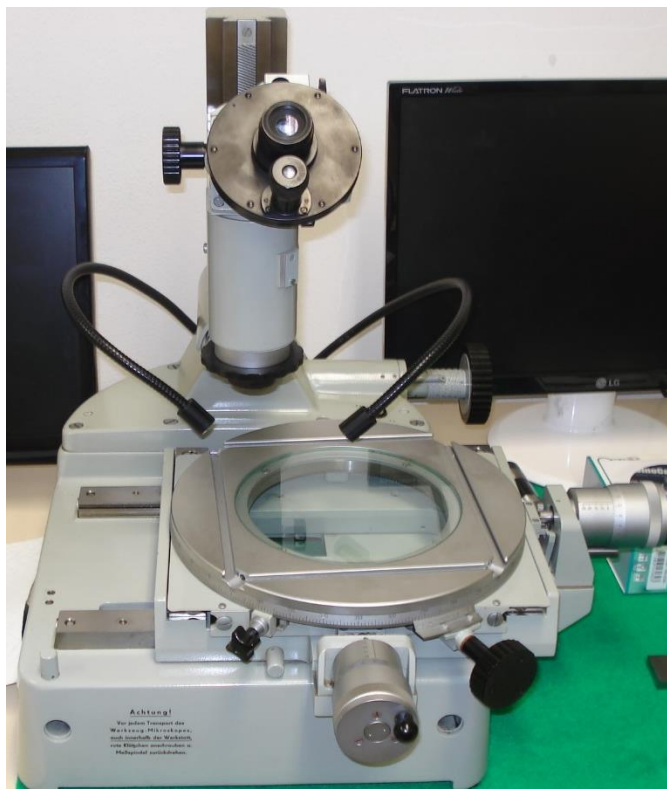


*Graf 9 Závislost Rmr na posuvové rychlosti*

Z grafu 3 jde zřetelně vidět, že čím větší rychlostí měříme, tím klesá i hodnota materiálového podílu. Jen při rychlosti řezu 60 % v hladině 50 % došlo k menší odchylce, ale tato plocha měla lepší jakost než ostatní plochy.

## 6 OBRÁBĚNÍ KOMPOZITNÍCH DESEK NEKONVENČNÍMI TECHNOLOGIEMI

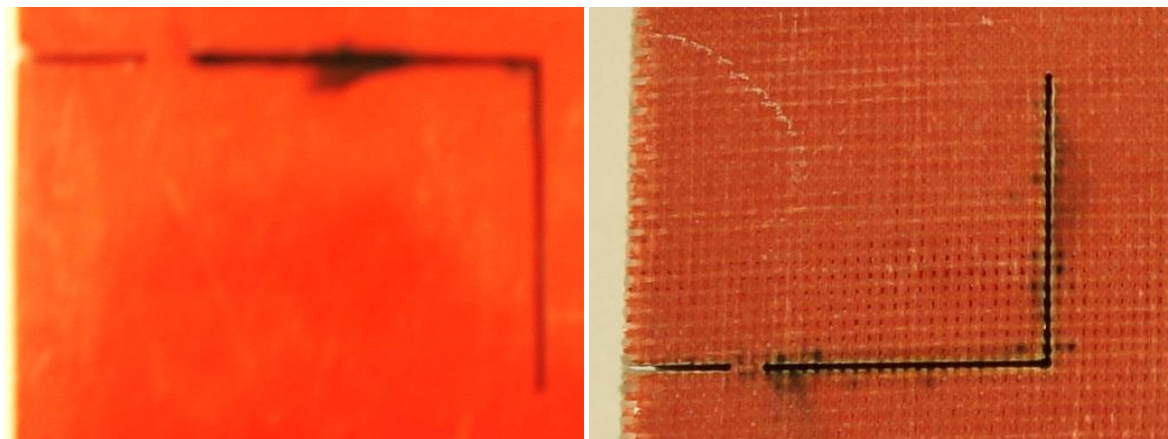
Po výrobě kompozitních desek následuje obrábění nekonvenčními technologiemi. Kompozity se obráběly technologií laserového paprsku a vodním paprskem o různých řezných podmínkách. Srovnávala se šířka vyřezané drážky na začátku a konci řezu v závislosti na řezných podmínkách. Měření probíhalo na dílenském mikroskopu Zeiss.



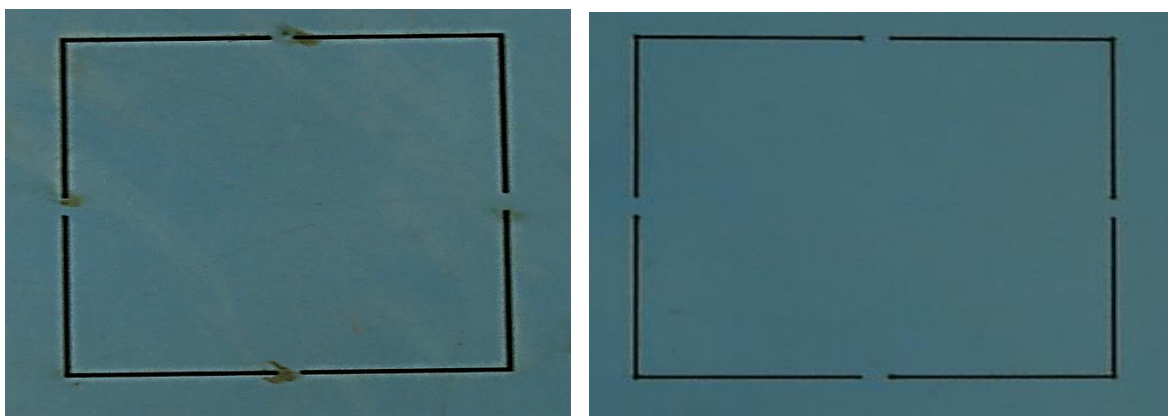
*Obr. 51 Dílenský mikroskop Zeiss*

### 6.1 Řezy kompozitních desek laserovým paprskem

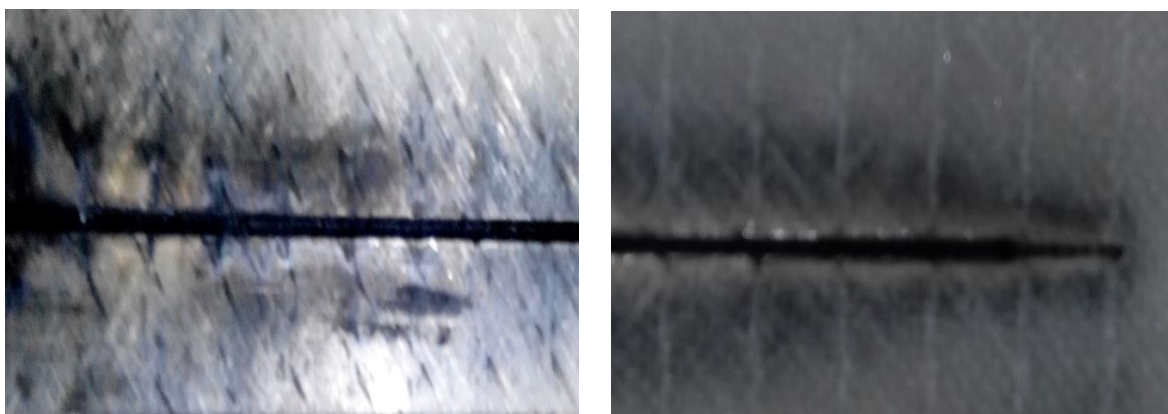
Řezání drážek proběhlo na CO<sub>2</sub> laseru v pulzním režimu o stejném výkonu a průměru trysky. Drážky se vyřezaly na třech kompozitních deskách a desce dřevěné. V praxi se používají desky dřevěné, vyřezané touto technologií. Při řezu však nastal problém s vypalováním a vytavováním jádrového materiálu z polymerních pěn. Řezy laserovým paprskem se aplikovaly na desku bílou čtyřvrstvou, červenou, modrou a pro srovnání výsledků i do dřeva. Měřila se šířka štěrbinu na začátku a konci řezu a byla porovnána s ostatními vzorky. Výsledky jsou zpracovány v grafech a tabulkách.



*Obr. 52 Začátek a konec řezu laserem na červeném vzorku*



*Obr. 53 Začátek a konec řezu laserem na modrém vzorku*



*Obr. 54 Začátek a konec řezu laserem na bílé desce*

Měření proběhlo celkem 10 krát na délce 50 mm, z vrchní strany a poté i spodní strany vzorků (začátek a konec řezu). Na mikroskopu se zjistila hodnota jedné strany řezu a od té se odečetla druhá hodnota z protější strany. U dřevěné desky se měřili dva průměry drážky. U menšího průměru také příčný a podélný řez, a jestli má směr řezu vliv na šířku spáry.

Tab. 5 Naměřené hodnoty řezů pro obrábění laserem kompozitních desek

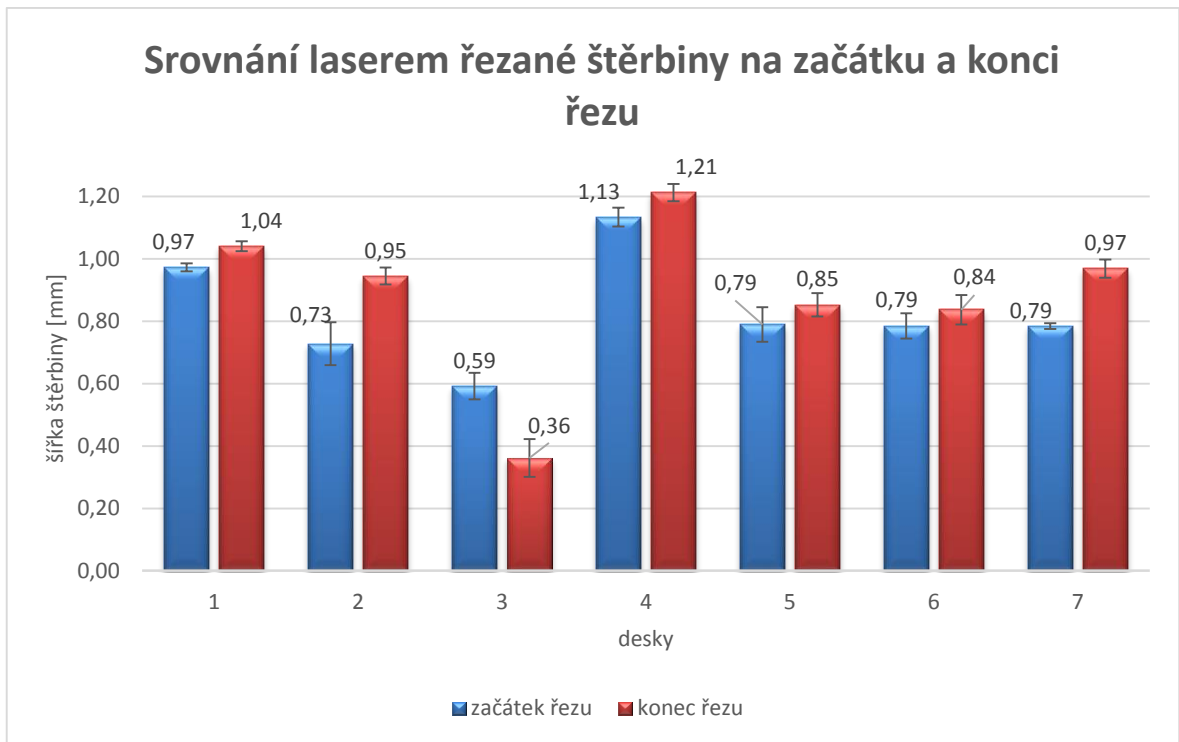
1. červená deska													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$\bar{x}$	$\sigma$	R
začátek řezu	0,98	0,99	0,96	0,97	0,95	0,98	0,96	0,98	0,99	0,97	0,97	0,01	0,04
konec řezu	1,05	1,03	1,02	1,06	1,04	1,05	1,06	1,01	1,04	1,05	1,04	0,02	0,05

2. modrá deska													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$\bar{x}$	$\sigma$	R
začátek řezu	0,66	0,82	0,74	0,63	0,81	0,73	0,68	0,66	0,72	0,83	0,73	0,07	0,20
konec řezu	0,94	0,91	0,93	0,92	0,91	0,94	0,96	0,98	0,97	0,99	0,95	0,03	0,08

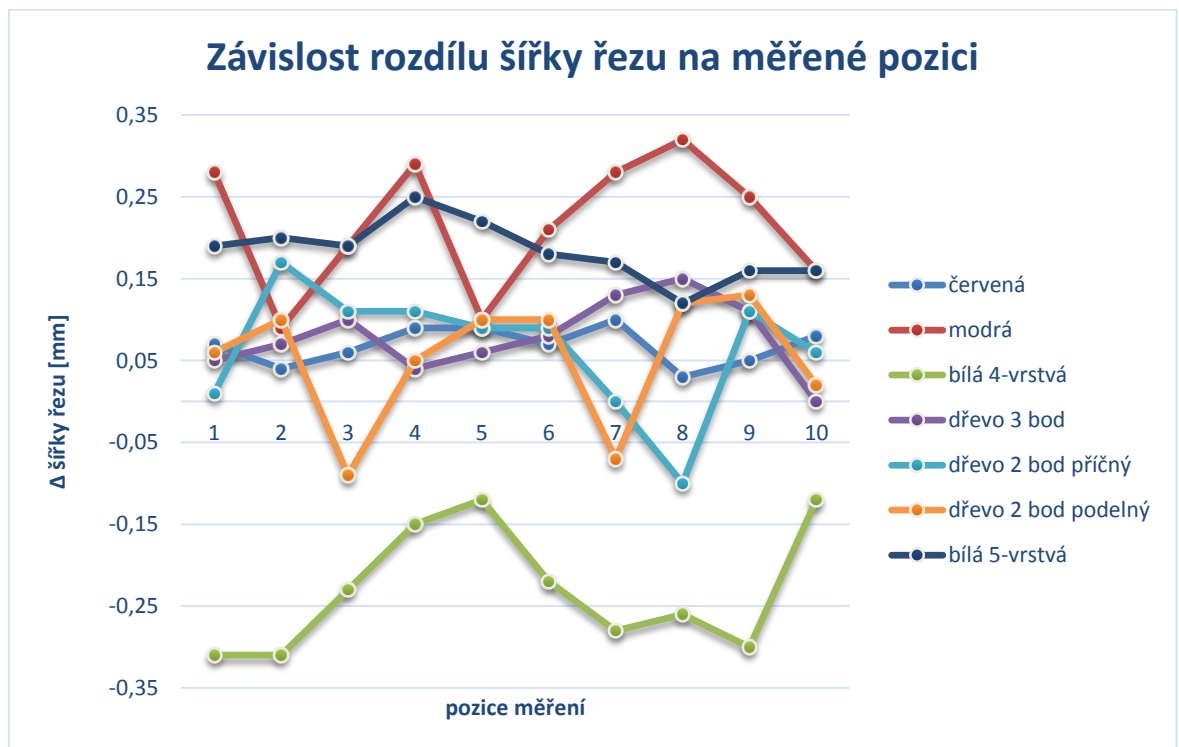
3. bílá 4 vrstvá deska													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$\bar{x}$	$\sigma$	R
začátek řezu	0,69	0,62	0,55	0,54	0,57	0,55	0,59	0,58	0,62	0,61	0,59	0,04	0,15
konec řezu	0,38	0,31	0,32	0,39	0,45	0,33	0,31	0,32	0,32	0,49	0,36	0,06	0,18

4. dřevěná deska														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$\bar{x}$	$\sigma$	R	
začátek řezu	3-bod	1,17	1,16	1,12	1,16	1,11	1,15	1,08	1,09	1,14	1,16	1,13	0,03	0,09
	2-bod ver.	0,90	0,72	0,76	0,75	0,76	0,77	0,78	0,89	0,78	0,79	0,79	0,06	0,18
	2-bod hor.	0,81	0,76	0,85	0,73	0,75	0,76	0,84	0,79	0,74	0,82	0,79	0,04	0,12
konec řezu	3-bod	1,22	1,23	1,22	1,20	1,17	1,23	1,21	1,24	1,25	1,16	1,21	0,03	0,09
	2-bod ver.	0,89	0,89	0,87	0,86	0,85	0,86	0,78	0,79	0,89	0,85	0,85	0,04	0,11
	2-bod hor.	0,87	0,86	0,76	0,78	0,85	0,86	0,77	0,91	0,87	0,84	0,84	0,05	0,15

5. deska bílá 5 vrstvá													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$\bar{x}$	$\sigma$	R
začátek řezu	0,79	0,79	0,78	0,77	0,78	0,79	0,79	0,80	0,77	0,79	0,79	0,01	0,03
konec řezu	0,98	0,99	0,97	1,02	1,00	0,97	0,96	0,92	0,93	0,95	0,97	0,03	0,10



Graf 10 Srovnání laserem řezaných drážek



Graf 11 Závislost rozdílu šířky řezu na měřené pozici



Laser v pulsním režimu vytvářel při řezání drážky půlkruhové útvary, které měly malý vliv na naměřené výsledky. Z grafu 10 a 11 a naměřených hodnot vyplývá, že nejmenší rozbíhavost laserového paprsku v závislosti na materiálu vykazuje dřevěná deska. Rozdíl na začátku a konci řezu byl u většího průměru dřeva jen 0,08 mm, a u menšího průměru v příčném a podélném směru 0,06 a 0,05 mm. Účelem této diplomové práce je však dřevěnou desku nahradit jiným tedy levnějším a lehčím kompozitním materiálem s jádrem. Dále malou rozbíhavost řezu vykazuje deska červená a to 0,07 mm. Ale u všech desek s polymerním jádrem došlo vlivem velké teploty laserového paprsku k vypálení a roztavení materiálu. Jen u modré desky, u které se použil místo polymerního jádra speciální samozhášivý materiál, nedošlo k hoření. Rozbíhavost laseru u tohoto vzorku je 0,22 mm a i z hlediska hmotnosti nesplňuje tento materiál podmínky zadání, protože je téměř stejně těžký jako deska dřevěná. U bílé desky čtyřvrstvé jsou naměřené hodnoty zkreslené a šířka na začátku řezu je mnohem větší než na konci. K tomu došlo při řezání laserovým paprskem a obsluha laseru nedokončila řez kvůli hoření pěny s ohledem na cenu obráběcího stroje. Z hlediska aplikace do praxe nemůžu doporučit ani jeden materiál k nahrazení dřevěných desek vyráběných touto technologií, protože z měření se nezískal ani jeden uspokojivý výsledek. Je potřeba ještě provést podrobný výzkum k tomuto tématu.

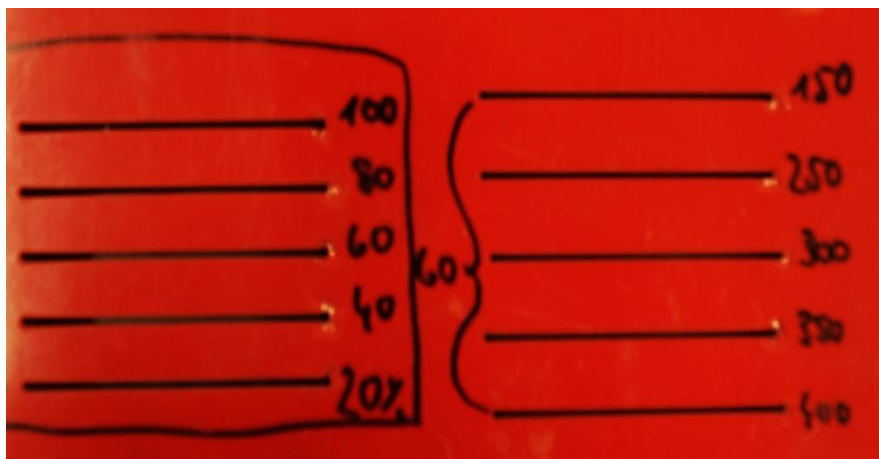
## 6.2 Řezy kompozitních desek vodním paprskem

Všechny řezy se prováděly na stroji Flow MACH3 M3-3020b, na kterém je možné dělat řezy vodním i abrazivním vodním paprskem. Rozměr pracovního prostoru je 3 x 2 m. Přesnost je přibližně kolem 0,06 mm.m<sup>-1</sup>. Přesnost opakovaného najetí 0,05 mm. Rychlost řezání do 7,6 m.min<sup>-1</sup>. Rychloposuv do 12,7 m.min<sup>-1</sup>.

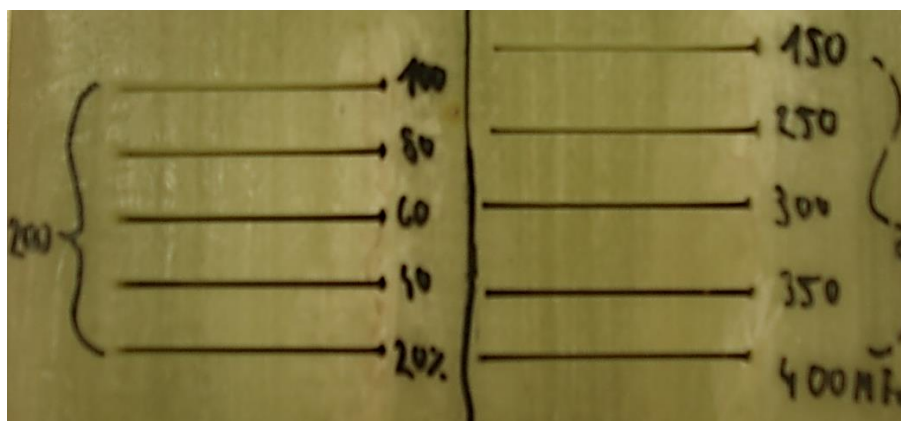


Obr. 55 Stroj pro řezání vodním paprskem MACH 3

Na čtyřech kompozitních deskách se vytvořilo celkem deset řezů vodním paprskem. U každého z pěti řezů se zvyšovala vždy posuvová rychlost při konstantním tlaku 200 MPa, a u druhé pětice se vždy měnil tlak při konstantní rychlosti posuvu 60 %. U desky bílé čtyřvrstvé se udělaly řezy jen o proměnném tlaku při konstantní rychlosti posuvu 60 %.



Obr. 56 Řezy o různých posuvových rychlostech a rozdílném tlaku provedených na červené desce



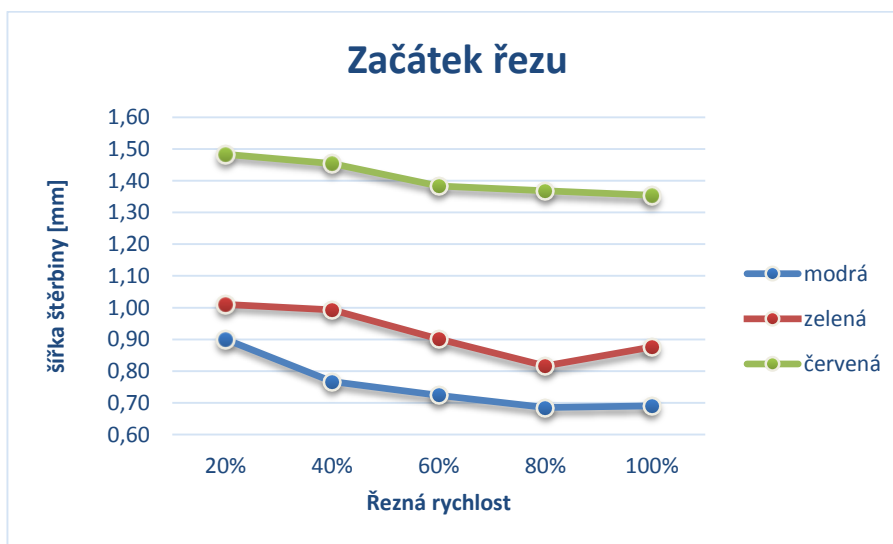
Obr. 57 Řezy o různých posuvových rychlostech a rozdílném tlaku provedených na zelené desce

Tabulky s hodnotami aritmetických průměrů naměřených hodnot a variačními rozpětími jsou zobrazeny níže. Dále byly vytvořeny grafy závislosti rychlosti posuvu a tlaku na šířku vyřezané štěrbinu a variační rozpětí naměřených hodnot. Variační rozpětí charakterizuje nerovnoměrnost řezu. Největší vliv na řez mají 3 faktory. Jde o tlak vodního paprsku, řeznou rychlost a skladbu řezaného materiálu. Tabulky se všemi naměřenými výsledky jsou vloženy v příloze.

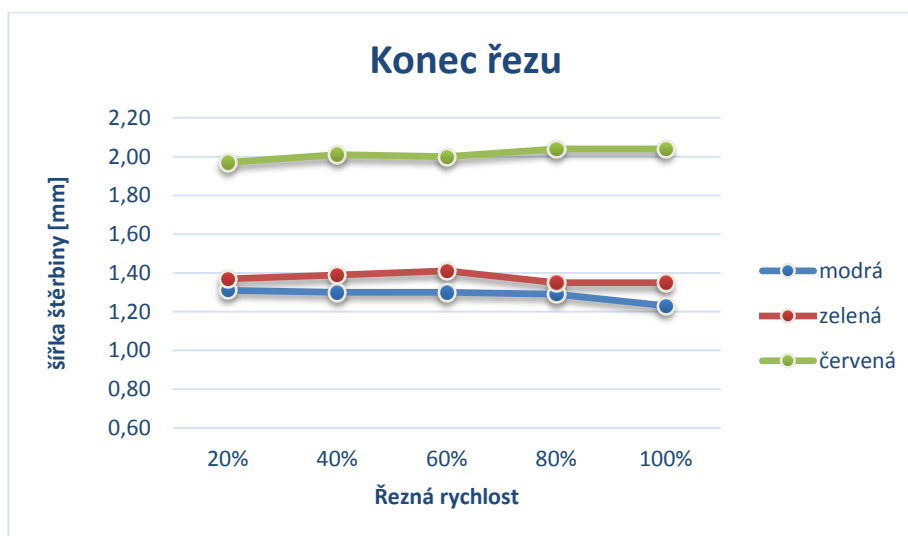
### 6.2.1 Závislost šířky řezu na řezné rychlosti

Tab. 6 Šířka řezu v závislosti na řezné rychlosti

Typ desky	Typ řezu	20 %	40 %	60 %	80 %	100 %
1. modrá deska	začátek řezu	0,90	0,77	0,72	0,69	0,69
	konec řezu	1,31	1,30	1,30	1,29	1,23
2. zelená deska	začátek řezu	1,01	0,99	0,90	0,82	0,88
	konec řezu	1,37	1,39	1,41	1,35	1,35
3. červená deska	začátek řezu	1,48	1,45	1,38	1,37	1,38
	konec řezu	1,97	2,01	2,00	2,04	2,04

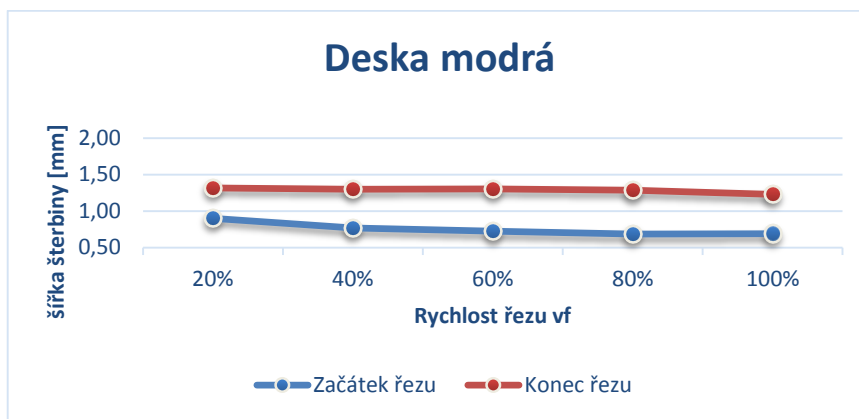


Graf 12 Závislost šířky řezu na rychlosti řezu (začátek řezu)

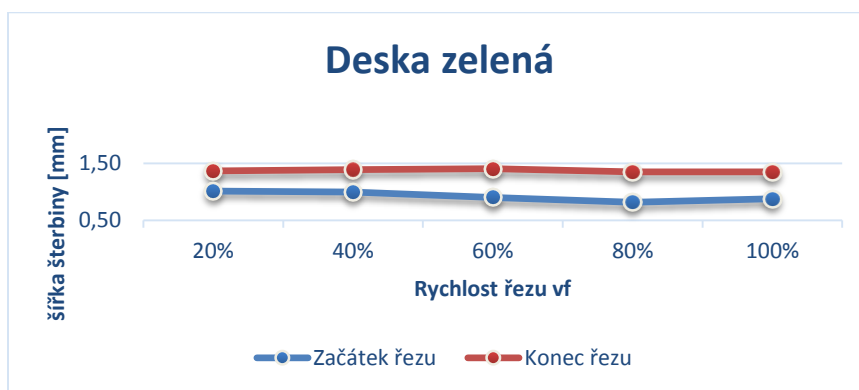


Graf 13 Závislost šířky řezu na rychlosti řezu (konec řezu)

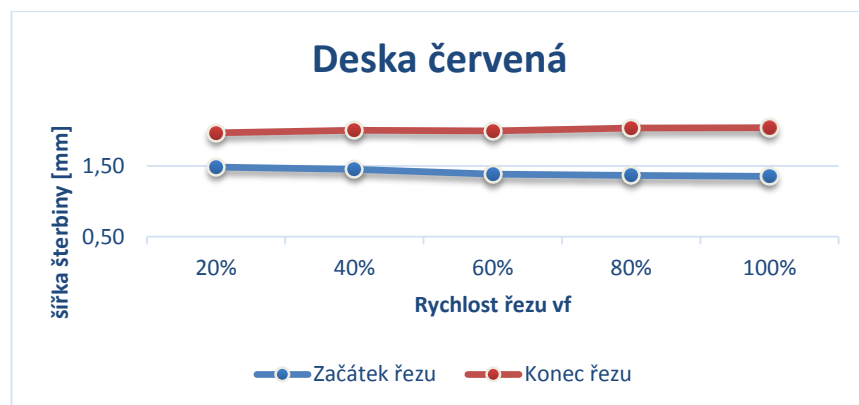
V grafu 10 a 11 jsou zobrazeny závislosti všech desek, jak pro vrchní stranu, tak i pro spodní stranu řezu. Z grafu závislosti šířky drážky na rychlosti řezu lze říct, že na začátku řezu se šířka spáry mírně zužuje se zvyšující se rychlostí řezu. Zatímco na spodní straně řezu (konec řezu) je šířka konstantní a téměř vůbec se u měřených vzorků nemění.



Graf 14 Závislost šířky řezu na posuvové rychlosti u modré desky



Graf 15 Závislost šířky řezu na posuvové rychlosti u zelené desky

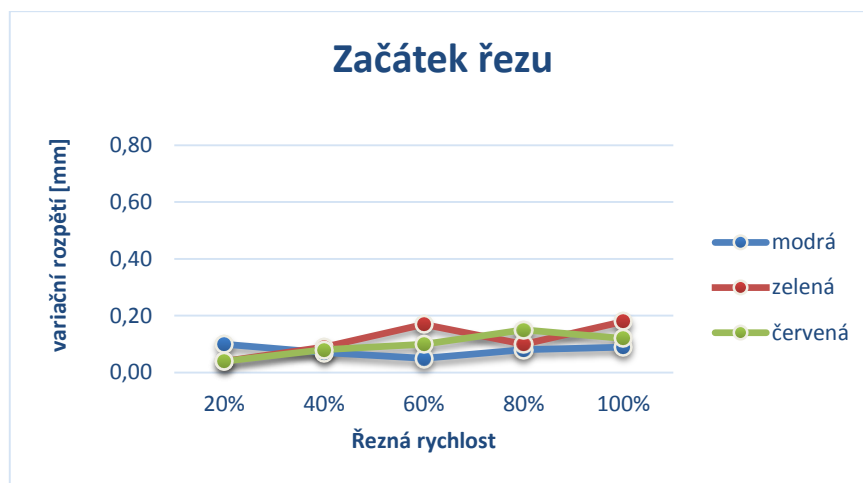


Graf 16 Závislost šířky řezu na posuvové rychlosti u červené desky

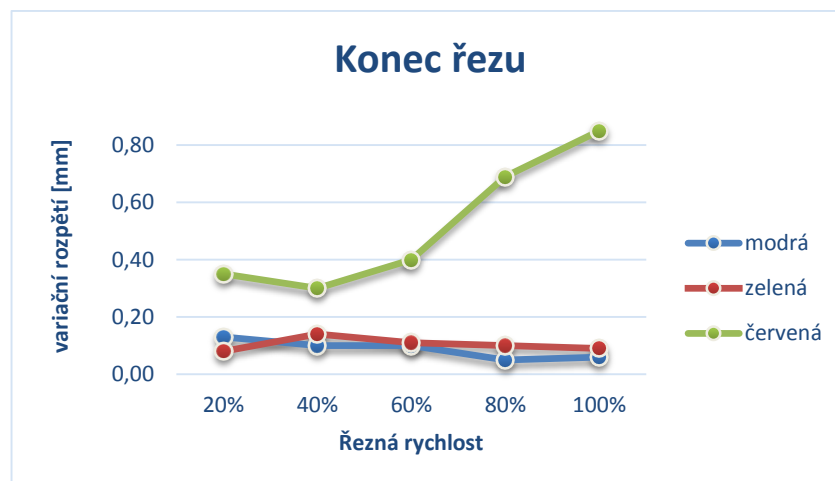
V grafu 14, 15 a 16 jsou pro lepší ilustraci zobrazeny závislosti šířky šterbiny na rychlosti řezu pro jednotlivé desky. Grafy obsahují data pro vrchní část řezu tak i spodní.

Tab. 7 Závislost variačního rozpětí na posuvové rychlosti

Typ desky	Typ řezu	20 %	40 %	60 %	80 %	100 %
1. modrá deska	začátek řezu	0,10	0,07	0,05	0,08	0,09
	konec řezu	0,13	0,10	0,10	0,05	0,06
2. zelená deska	začátek řezu	0,04	0,09	0,17	0,10	0,18
	konec řezu	0,08	0,14	0,11	0,10	0,09
3. červená deska	začátek řezu	0,04	0,08	0,10	0,15	0,12
	konec řezu	0,35	0,30	0,40	0,69	0,85



Graf 17 Závislost řezné rychlosti na variačním rozpětí (začátek řezu)



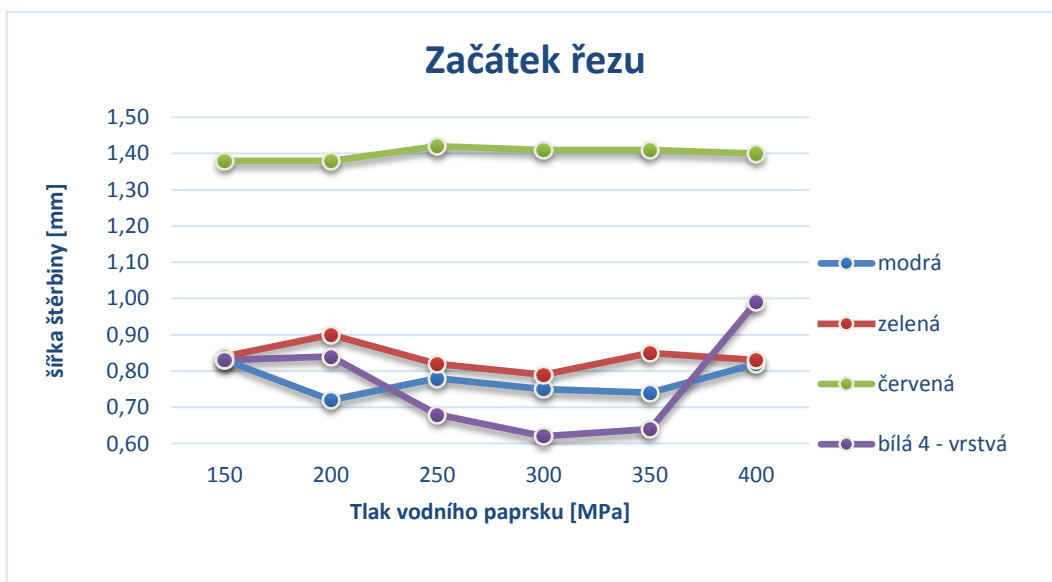
Graf 18 Závislost řezné rychlosti na variačním rozpětí (konec řezu)

Z grafu 17 a 18 vyplývá, že variační rozpětí se příliš se zvyšující rychlostí řezu nemění a to jak u vrchní, tak i spodní strany řezu. U červené desky je kvalita řezu na spodní straně velmi špatná a hodnota variačního rozpětí velmi kolísá. Je to způsobeno skelnou rohoží, která je přidělena ke spodní straně za účelem snížení rozbíhavosti vodního paprsku. Došlo však vytržení skelných vláken, a s tím i ke snížení kvality řezu na spodní straně.

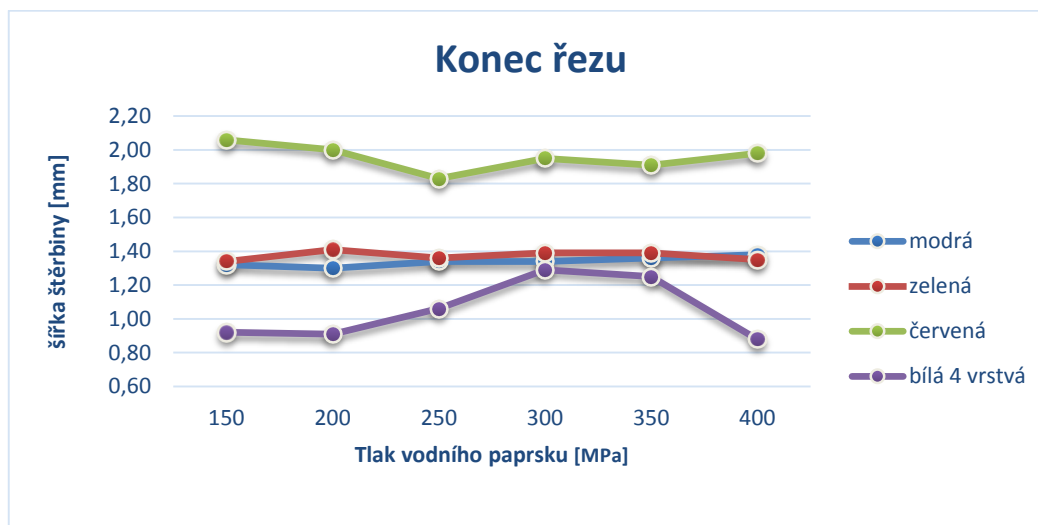
### 6.2.2 Závislost šířky štěrbinu na tlaku vodního paprsku

Tab. 8 Aritmetické průměry hodnot šířky štěrbinu v závislosti na tlaku

Typ desky	Typ řezu	150 MPa	200 MPa	250 MPa	300 MPa	350 MPa	400 MPa
1. modrá deska	začátek řezu	0,83	0,72	0,78	0,75	0,74	0,82
	konec řezu	1,32	1,30	1,34	1,34	1,36	1,38
2. zelená deska	začátek řezu	0,84	0,90	0,82	0,79	0,85	0,83
	konec řezu	1,34	1,41	1,36	1,39	1,39	1,35
3. červená deska	začátek řezu	1,38	1,38	1,42	1,41	1,41	1,40
	konec řezu	2,06	2,00	1,83	1,95	1,91	1,98
4. bílá deska	začátek řezu	0,83	0,84	0,68	0,62	0,64	0,99
	konec řezu	0,92	0,91	1,06	1,29	1,25	0,88



Graf 19 Závislost šířky řezu na tlaku vody (začátek řezu)

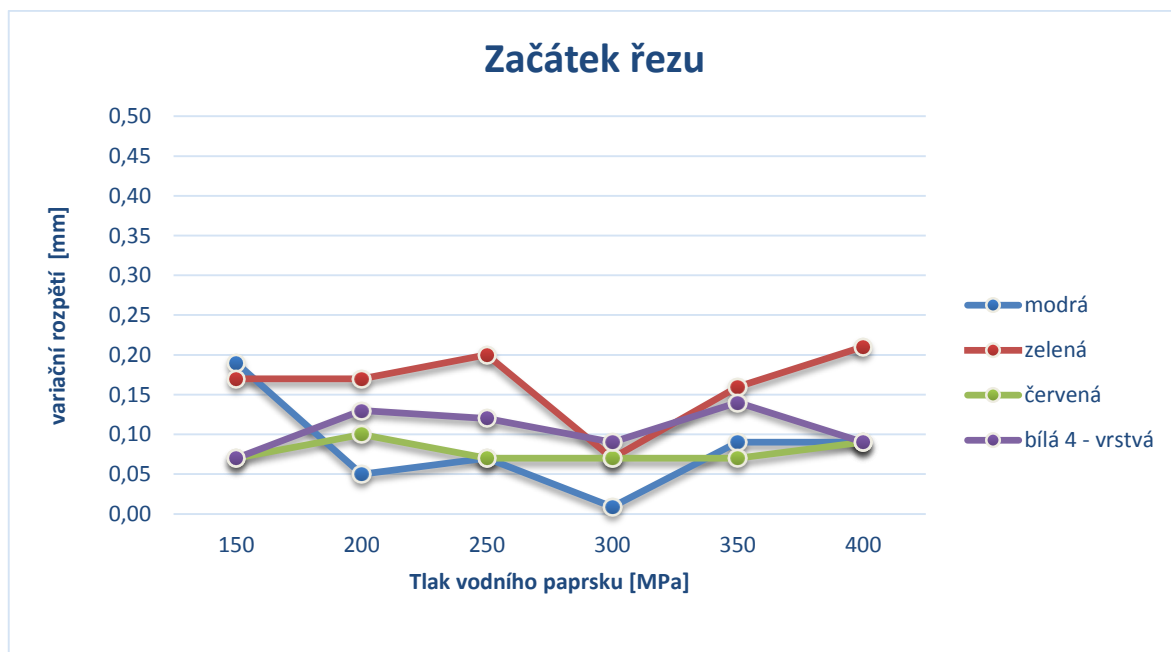


Graf 20 Závislost šířky řezu na tlaku vody (konec řezu)

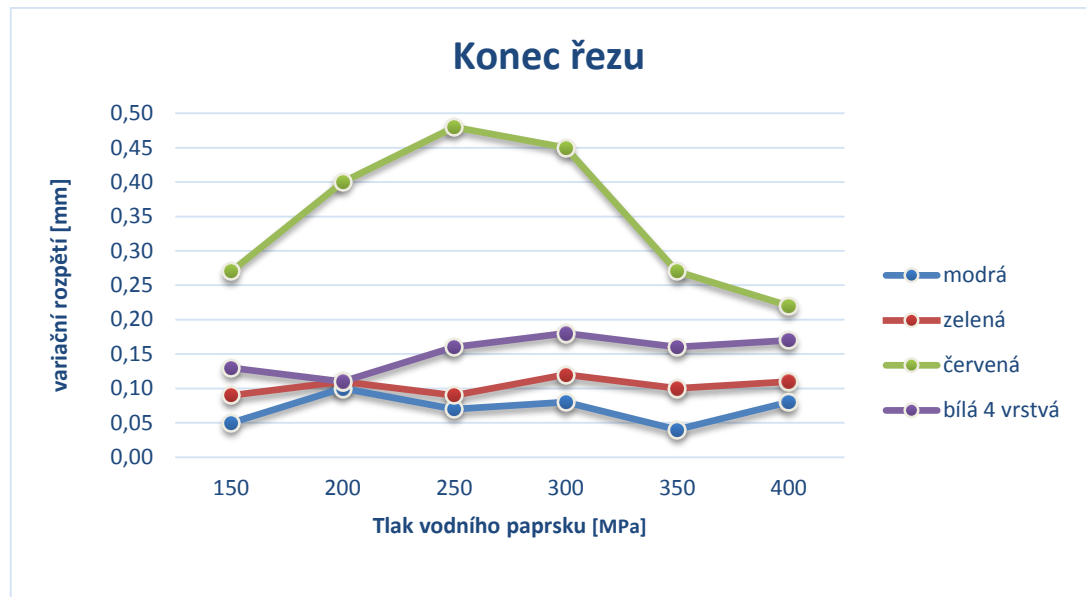
Graf 19 a 20 zobrazuje závislost šířky řezu na tlaku vodního paprsku. V grafech jsou závislosti všech desek rozdělených podle strany řezů. Z daných hodnot však nelze určit jednoznačnou závislost šířky drážky na tlaku vodního paprsku, ať už na konci nebo začátku řezu.

Tab. 9 Hodnoty variačního rozpětí v závislosti na tlaku

Typ desky	Typ řezu	150 MPa	200 MPa	250 MPa	300 MPa	350 MPa	400 MPa
1. modrá deska	začátek řezu	0,19	0,05	0,07	0,01	0,09	0,09
	konec řezu	0,05	0,10	0,07	0,08	0,04	0,08
2. zelená deska	začátek řezu	0,17	0,17	0,20	0,07	0,16	0,21
	konec řezu	0,09	0,11	0,09	0,12	0,10	0,11
3. červená deska	začátek řezu	0,07	0,10	0,07	0,07	0,07	0,09
	konec řezu	0,27	0,40	0,48	0,45	0,27	0,22
4. bílá deska	začátek řezu	0,07	0,13	0,12	0,09	0,14	0,09
	konec řezu	0,13	0,11	0,16	0,18	0,16	0,17



Graf 21 Závislost variačního rozpětí na tlaku vody (začátek řezu)



Graf 22 Závislost variačního rozpětí na tlaku vody (konec řezu)

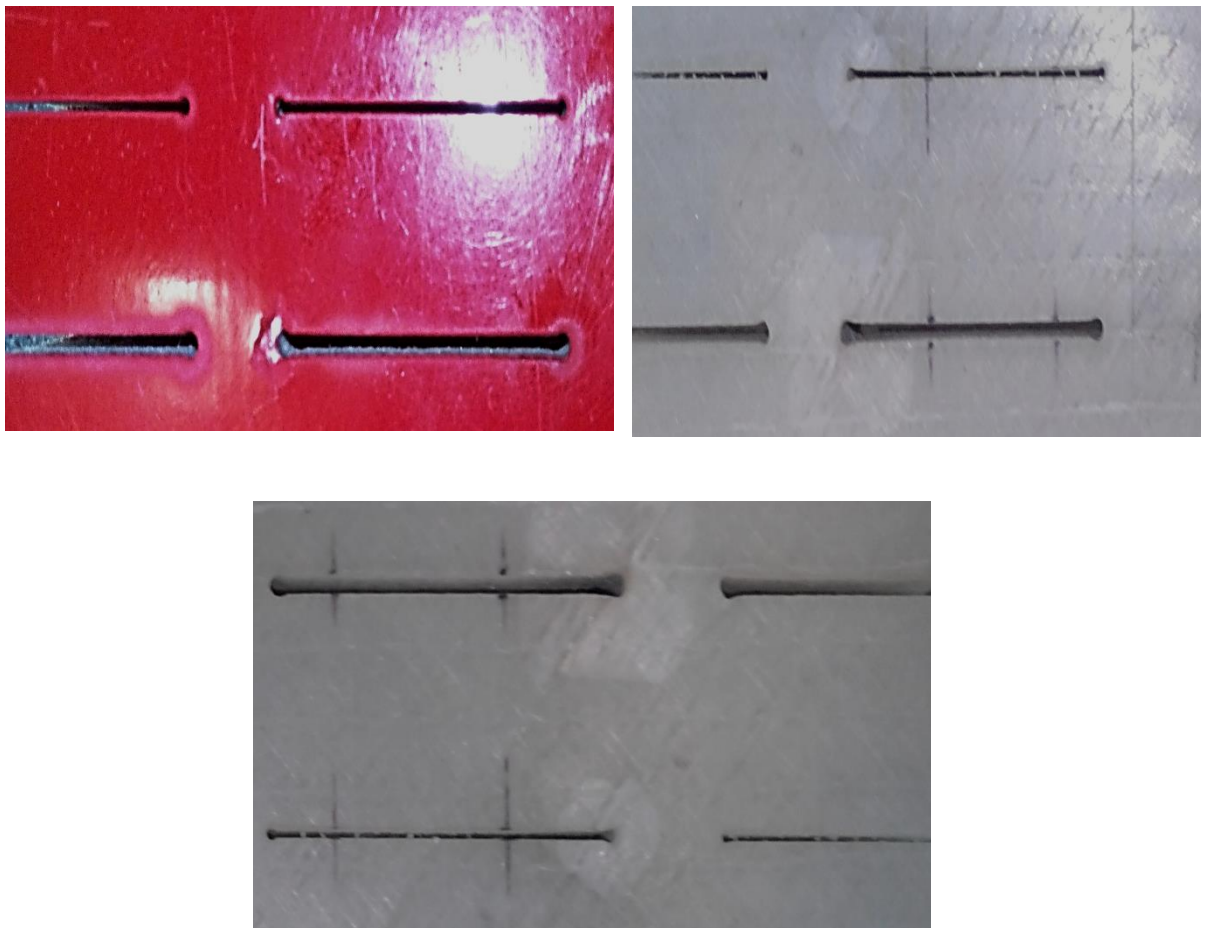
Z grafu 21 a 22 lze vidět, že hodnota variačního rozpětí na konci řezu roste s rostoucím tlakem. Čím vyšším tlakem je řez proveden, tím nekvalitnější výsledný řez bude. Toto neplatí pro desku červenou, u které je na spodní straně skelná rohož a která způsobuje nižší kvalitu měřeného řezu.



### 6.3 Optimalizace řezných podmínek a skladby materiálu

Na základě výsledků měření se dále stanovily optimální řezné podmínky o rychlosti řezu 40 % při průměru trysky 0,7 mm a 1,4 mm. Dále se provedla optimalizace skladby materiálu, která je jedním z hlavních faktorů ovlivňující řez a jeho kvalitu. Obecně by mělo platit, že desky s více vrstvami skelného vlákna budou mít nižší rozbíhavost vodního paprsku na začátku a konci řezu.

Na třech kompozitních deskách byly provedeny řezy vodním paprskem o průměru trysky 0,7 mm a 1,4 mm. Řezy se prováděly o rychlosti 40 %. Jako zkušební vzorky se použily deska červená, deska bílá čtyřvrstvá a deska bílá pětivrstvá.



*Obr. 58 Desky s optimalizovanými řeznými podmínkami*

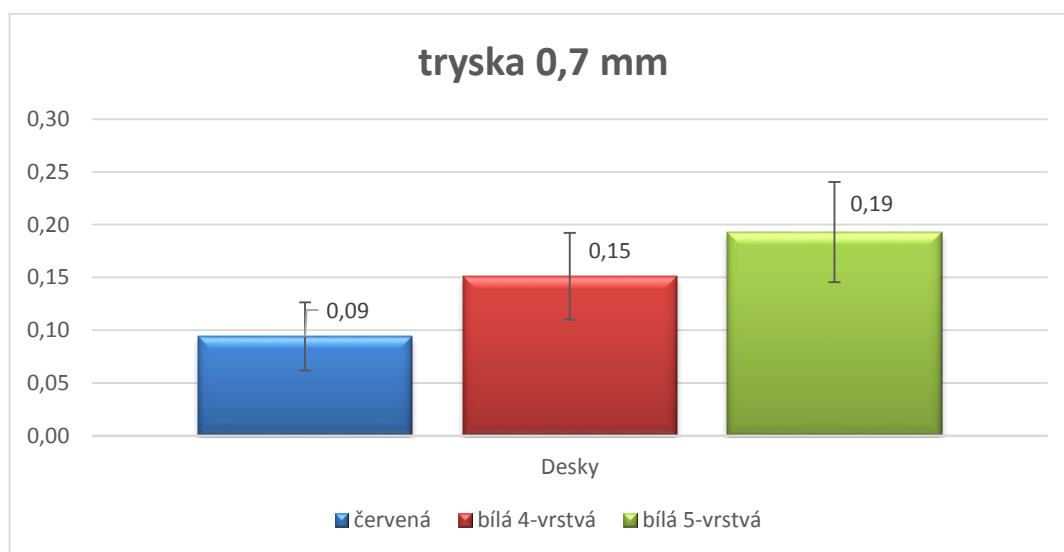
Řezy se měřili 10 krát na vrchní části desky a poté i na spodní straně. Naměřené hodnoty se zpracovaly do tabulek a vyhodnotil se rozdíl šířky na začátku řezu a na konci řezu. Z tohoto rozdílu se vyhodnotil aritmetický průměr a tato hodnota se porovnává v grafu pro všechny tři vzorky.

Tab. 10 Naměřené hodnoty kompozitních desek pro 0,7 mm trysku

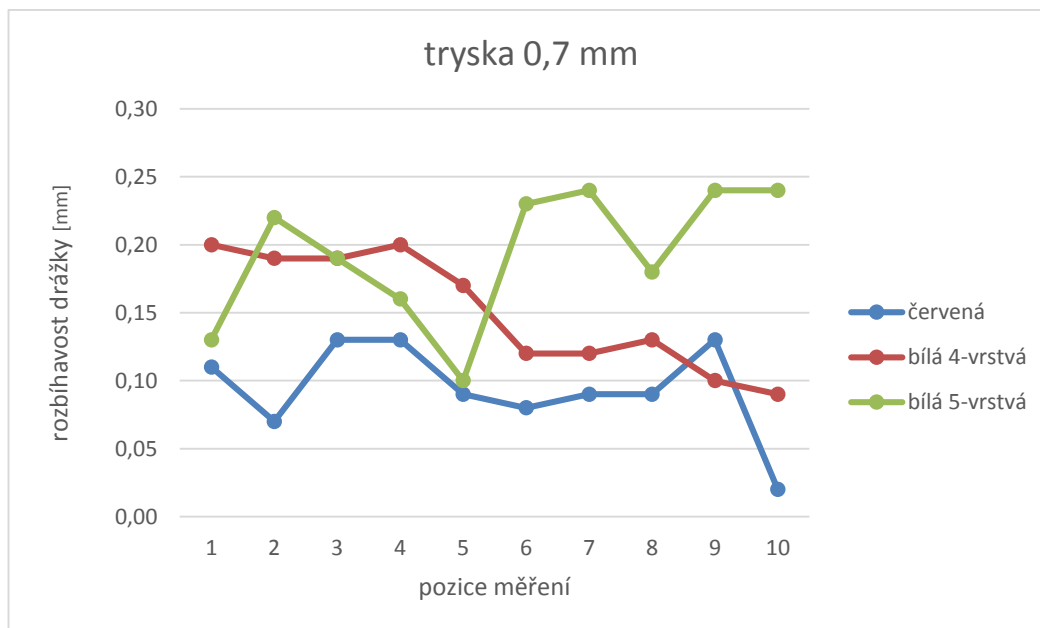
Červená deska 2 vrstvy													
Dýza $\varnothing 7$ mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$\bar{x}$	$\sigma$	R
začátek řezu [mm]	0,65	0,67	0,65	0,66	0,68	0,69	0,66	0,67	0,66	0,70	0,67	0,02	0,05
konec řezu [mm]	0,76	0,74	0,78	0,79	0,77	0,77	0,75	0,76	0,79	0,72	0,76	0,02	0,07
$\Delta$ [mm]	0,11	0,07	0,13	0,13	0,09	0,08	0,09	0,09	0,13	0,02	0,09	0,03	0,11

Bílá deska 4 vrstvy													
Dýza $\varnothing 7$ mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$\bar{x}$	$\sigma$	R
začátek řezu [mm]	0,65	0,66	0,67	0,64	0,65	0,64	0,63	0,65	0,65	0,64	0,65	0,01	0,04
konec řezu [mm]	0,85	0,85	0,86	0,84	0,82	0,76	0,75	0,78	0,75	0,73	0,80	0,05	0,13
$\Delta$ [mm]	0,20	0,19	0,19	0,20	0,17	0,12	0,12	0,13	0,10	0,09	0,15	0,04	0,11

Bílá deska 5 vrstev													
Dýza $\varnothing 7$ mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$\bar{x}$	$\sigma$	R
začátek řezu [mm]	0,60	0,54	0,53	0,59	0,62	0,58	0,58	0,59	0,56	0,57	0,58	0,03	0,09
konec řezu [mm]	0,73	0,76	0,72	0,75	0,72	0,81	0,82	0,77	0,80	0,81	0,77	0,04	0,10
$\Delta$ [mm]	0,13	0,22	0,19	0,16	0,10	0,23	0,24	0,18	0,24	0,24	0,19	0,05	0,14



Graf 23 Srovnání průměrné rozbihavosti vodního paprsku pro 0,7 mm trysku



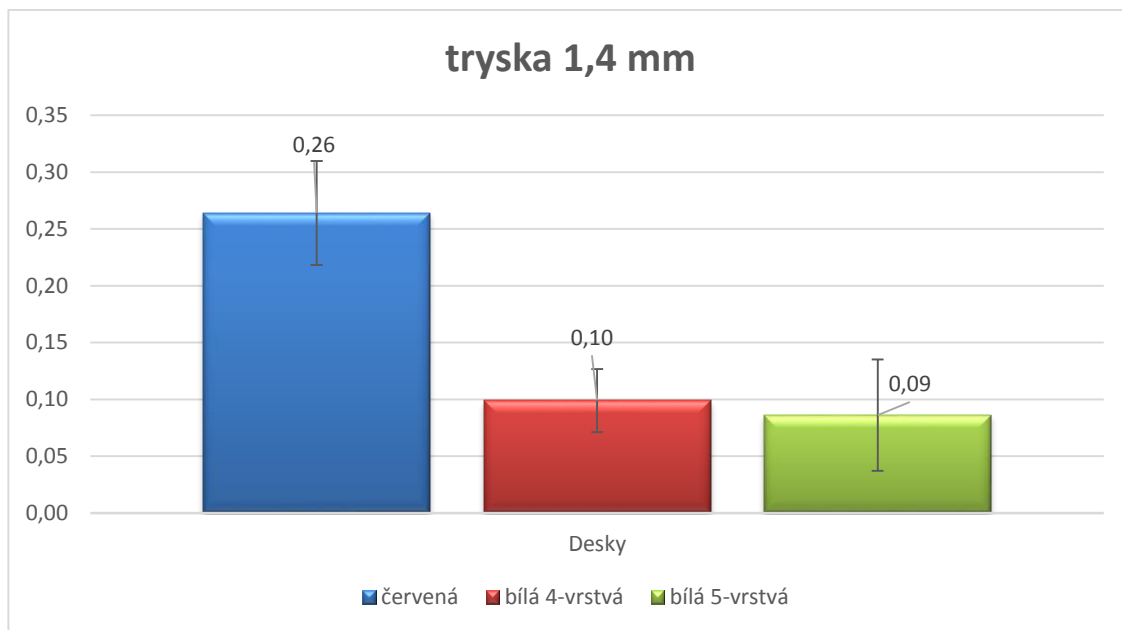
Graf 24 Rozbíhavost drážky v závislosti na měřené pozici (0,7 mm)

Tab. 11 Naměřené hodnoty kompozitních desek pro trysku 1,4 mm

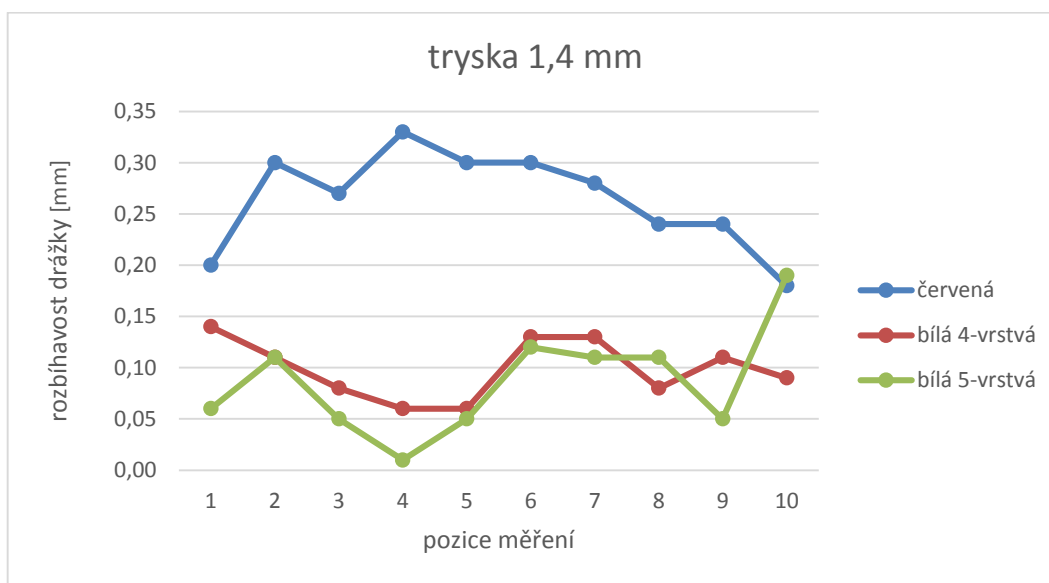
Červená deska 2 vrstvy													
Dýza Ø 14 mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$\bar{x}$	$\sigma$	R
začátek řezu [mm]	1,34	1,29	1,30	1,27	1,32	1,29	1,32	1,33	1,30	1,34	1,31	0,02	0,07
konec řezu [mm]	1,54	1,59	1,57	1,60	1,62	1,59	1,60	1,57	1,54	1,52	1,57	0,03	0,10
$\Delta$ [mm]	0,20	0,30	0,27	0,33	0,30	0,30	0,28	0,24	0,24	0,18	0,26	0,05	0,15

Bílá deska 4 vrstvy													
Dýza Ø 14 mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$\bar{x}$	$\sigma$	R
začátek řezu [mm]	1,24	1,22	1,21	1,24	1,23	1,18	1,23	1,24	1,23	1,21	1,22	0,02	0,06
konec řezu [mm]	1,38	1,33	1,29	1,30	1,29	1,31	1,36	1,32	1,34	1,30	1,32	0,03	0,09
$\Delta$ [mm]	0,14	0,11	0,08	0,06	0,06	0,13	0,13	0,08	0,11	0,09	0,10	0,03	0,08

Bílá deska 5 vrstev													
Dýza Ø 14 mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$\bar{x}$	$\sigma$	R
začátek řezu [mm]	1,31	1,31	1,30	1,32	1,30	1,33	1,28	1,29	1,31	1,28	1,30	0,02	0,05
konec řezu [mm]	1,37	1,42	1,35	1,33	1,35	1,45	1,39	1,40	1,36	1,47	1,39	0,04	0,14
$\Delta$ [mm]	0,06	0,11	0,05	0,01	0,05	0,12	0,11	0,11	0,05	0,19	0,09	0,05	0,18



Graf 25 Srovnání průměrné rozbíhavosti vodního paprsku pro 1,4 mm trysku



Graf 26 Rozbíhavost drážky v závislosti na měřené pozici (1,4 mm)

Z grafu 23 a 24 lze vypočítat, že pro trysku o velikosti 0,7 mm při rychlosti řezu 40 %, má nejmenší rozbíhavost paprsku deska červená. Drážka na spodní straně vzorku se ve srovnání s horní stranou řezu rozšiřuje průměrně o 0,09 mm. U desky čtyřvrstvé je to 0,15 mm a u pětivrstvé 0,19 mm.

Pro řez s větší tryskou platí, že nejmenší rozbíhavost drážky vykazoval naopak vzorek pětivrstvý s 0,09 mm. Dále vzorek čtyřvrstvý měl průměrnou rozbíhavost 0,1 mm a deska červená 0,26 mm.

## DISKUZE VÝSLEDKŮ

### Řezání drážek laserem

Jak již bylo zmíněno výše, při řezání drážky laserem došlo k tavení a hoření polymerního jádrového materiálu. To by znemožnilo praktické použití takto znehodnocených desek. Proto se dále řezy prováděly vodním paprskem. Vrstvy ze skelného vlákna nevykazovaly téměř žádné teplotní ovlivnění laserovým paprskem. Dobrou teplotní odolnost vykazovala pouze deska modrá, u které byl jako jádrový materiál použit blíže nespecifikovaný samozhášivý materiál. Tato deska však měla velkou hmotnost a průměrná rozbíhavost paprsku je 0,22 mm, proto není možné použít tuto desku jako náhradu za desku dřevěnou, která nevykazuje tak velkou rozbíhavost laseru.

Pro aplikaci této technologie k obrábění kompozitních desek bych doporučoval pokračovat v dalším výzkumu, se zaměřením na hledání optimální skladby materiálu.



*Obr. 59 Vypálený jádrový materiál při řezu laserem*

### Řezání drážek vodním paprskem

Pro drážky řezané vodním paprskem se nejprve stanovily faktory ovlivňující kvalitu a rozbíhavost řezu. Mezi hlavní faktory patří rychlost řezu a skladba (hustota) materiálu. Tlak vody nemá na řez žádný prokazatelný vliv.

Z výsledků měření se stanovila optimální rezná rychlost 40 % a skladba materiálu. Skladba materiálu je důležitá z toho hlediska, že na přechodu vrstvy laminátu a pěny dochází k odskoku materiálu. Čím hlouběji se v řezu nacházíme, tím jsou tyto odskoky pěny vyšší. Proto je nutné pěnu vyztužit více vrstvami laminátu, aby se vliv těchto odskoků na šířku spáry co nejvíce snížil.



*Obr. 60 Znázorněný odskok materiálu na přechodu sklo/laminát*

Se zvyšující se rychlostí řezu se zvyšuje i šířka štěrbin, zvláště na spodní straně řezu a tím se zvětšuje i průměrná rozbíhavost vodního paprsku. Na šířku spáry měl vliv i samotný materiál, protože při řezu nedocházelo k plynulému prořezání skelné tkaniny, ale vlákna byla vytrhávána ze struktury.

U optimalizovaných desek měl nejnižší hodnotu rozbíhavosti u trysky 0,7 mm vzorek desky červené a u 1,4 mm trysky vzorek bílý pětivrstvý. U červeného vzorku však výsledek úplně neodpovídá skutečnosti, protože tato deska má pouze dvě vrstvy laminátu a zbytek struktury je tvořen pěnou. Tím došlo při řezu k znatelnému odskoku materiálu, který by měl negativní vliv na stabilitu střížného nástroje. Proto bych doporučil pro aplikaci desky se čtyřmi nebo pěti vrstvami laminátu, které vykazují, jak dobrou toleranci šířky drážky, tak i dobrou kompenzaci odskoku materiálu.

U malého průměru trysky tj. 0,7 mm bych doporučil zvýšit řeznou rychlost nebo tlak, protože na spodní straně desek nedošlo k úplně kvalitnímu prořezání drážky a výsledná jakost nebyla optimální.

## ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo zjistit faktory, které ovlivňují kvalitu a šířku řezu na kompozitních sendvičových deskách. Tyto desky by měly sloužit k vytvoření střížných nástrojů pro papírenský průmysl, kde by měly nahradit stávající těžké nevyhovující desky dřevěné. Řezy se prováděly laserem a vodním paprskem a bylo nutné zajistit řezy o malé toleranci a zamezit rozbíhavost paprsku. Desky byly vyrobeny technologií vakuového lisování pod separační fólií. Tato technologie slouží k optimalizaci skladby materiálu.

Při vytváření řezů na laseru došlo k vypalování a vytavení polymerního jádrového materiálu, což by znemožnilo aplikaci takto znehodnocených desek pro jejich plánované účely. Proto se další řezy prováděly jen na vodním paprsku.

Provedlo se celkem deset řezů na vodním paprsku pro každou vyrobenou desku. Pět řezů se udělalo o rozdílné řezné rychlosti (20 %, 40 %, 60 %, 80 %, 100 %) při konstantním tlaku 200 MPa a dalších pět o rozdílném tlaku vodního paprsku (150, 200, 250, 300, 350, 400 MPa) při konstantní řezné rychlosti 60 %. Na takto vyřezaných drážkách se měřila šířka štěrbin na začátku a konci řezu a vyhodnocoval se aritmetický průměr a variační rozpětí hodnot, ze kterých se vytvořily závislosti na řezné rychlosti a tlaku.

Závislosti řezné rychlosti na drsnosti vzorku se měřily dotykovým drsnoměrem na vzorcích z duralu a legované, nelegované oceli. Z měření vyplývá, že se zvyšující se rychlostí řezu se zhoršuje jakost povrchu u všech vzorků. U rychlosti řezu 100 % se kvalita povrchu zhoršuje velmi rychle a výslednou strukturu již nebylo možné změřit na měřicím zařízení. Z měřených vzorků měla nejlepší jakost povrchu ocel nelegovaná.

Po vyhodnocení naměřených hodnot a závislostí se optimalizovala řezná rychlost a skladba materiálu. Na deskách s více vrstvami laminátu se provedly dva řezy s průměrem trysky 0,7 mm a 1,4 mm o konstantní rychlosti řezu 40 %. Z takto vyřezaných drážek se naměřila šířka štěrbin na začátku a konci řezu. Rozdíl těchto hodnot nám ukázal průměrnou hodnotu rozbíhavosti paprsku.

Z výsledků vyplývá, že největší vliv na kvalitu řezu má rychlost řezu a skladba materiálu. Z tohoto důvodu je nutné těmto faktorům věnovat největší pozornost. Kompozitní desky s více vrstvami laminátu vyhovují danému zadání, hlavně z hlediska rozbíhavosti paprsku, a doporučil bych jejich aplikaci pro praxi.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

1. MAŇKOVÁ, I. *Progresivní technologie*. Košice: Vienala, 2000. ISBN 80-7099-430-4.
2. HOLEŠOVSKÝ, F. a MÁDL, J.: *Integrita obrobených povrchů z hlediska funkčních vlastností*. Ústí nad Labem: UJEP, 2008. ISBN 978-80-7414-095-2.
3. LUKOVICS, I. *Konstrukční materiály a technologie*. Brno, VUT, 1992. ISBN 80-214-0399-3.
4. BHAGWAN, D. A. a jiní. *Vláknové kompozity*. Praha: SNTL, 1987.
5. MILIKIČ, D. *Nekonvenční postupci obrade*. Univerzita Novi Sad, 2002. ISBN 86-499-0116-6.
6. MORÁVEK, R. *Nekonvenční metody obrábění*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 1999. ISBN 80-7082-518-9.
7. Vy-tech.cz. *Řezání vodním paprskem* [online]. [cit. 23.1.2014]. Dostupné z: <http://www.vytech.cz/clanky/technologie/>.
8. KOCMAN, K. *Technologické procesy obrábění*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 330 s. ISBN 978-80-7204-722-2.
9. VLACH, B. *Technologie obrábění a montáží*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1990, 464 s. ISBN 8003001439.
10. MIKOVEC, M. *Obrábění materiálů s velkou pevností a tvrdostí*. 1. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1982, 196 s.
11. BARTOŠ, V. *Optimalizace svařovacích parametrů pro technologii svařování laserem u vybraných termoplastů*. Diplomová práce. Zlín: UTB, 2009.
12. KOŘÍNEK, Zdeněk. [online]. [cit. 22.1.2014]. *Kompozity*. Dostupné na: [www.volny.cz/zkorinek](http://www.volny.cz/zkorinek).
13. PLEŠKOVÁ, Iva. [online]. [cit. 22.1.2014]. *Mechanické vlastnosti kompozitních materiálů s krátkovlákným čedičem*. Dostupné na: <http://www.kht.tul.cz>.
14. Umi.fs.cvut.cz: *Vláknové kompozity*. [online]. [cit. 22.1.2014]. Dostupné na: [umi.fs.cvut.cz](http://umi.fs.cvut.cz).
15. DILLINGER, J. *Moderní strojírenství pro školu i praxi*. 1. vyd. Praha: Europa-Sobotáles, 2007, 608 s. ISBN 978-80-86706-19-1.



16. BUMBÁLEK, B. [online]. [cit. 6.2.2014]. *Integrita povrchu a její význam pro posouzení vhodnosti dané plochy pro její funkci*. Dostupné na: <gps.fme.vutbr.cz>.
17. BUMBÁLEK, B, a spol. *Drsnost povrchu*. 1. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1989, 338 s.
18. ČSN EN ISO 4287 (014450) *Geometrické požadavky na výrobky – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 1999, 24 s.
19. KARÁSEK, J. [online]. [cit. 6.2.2014]. *Geometrické vlastnosti povrchu*. Dostupné na: [www.techno-mat.cz](http://www.techno-mat.cz).
20. KNOT, T. *CNC obrábění a technologie přípravy tvarově složitých sendvičových jader*. Bakalářská práce. Zlín: UTB, 2012.
21. ŠANTAVÝ, P. *Optimalizace procesu obrábění kompozitních materiálů laserem a vodním paprskem*. Bakalářská práce. Zlín: UTB, 2012.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

AJM	Abrasive Jet Machining
WJM	Water Jet Machining
LBM	Laser Beam Machining
USM	Ultra Sonic Machining
EDM	Electrical Discharge Machining
AWJM	Abrasive Water Jet Machining
Ra	Střední aritmetická úchylka profilu
Rz	Největší výška profilu
Rt	Celková výška nerovnosti povrchu
Rmr	Materiálový podíl
PP	Polypropylen
PVC	Polyvinylchlorid
PUR	Polyuretan
PE	Polyetylen
PS	Polystyren

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Přehled a rozdělení konstrukčních materiálů s důrazem na těžkoobrobitelné materiály z pohledu obrábění. [1]</i> .....	13
<i>Obr. 2 Porovnání výkonových charakteristik úběru materiálu pro klasické (KON) a následující nekonvenční technologie obrábění: .....</i>	14
<i>Obr. 3 Dělení nekonvenčních technologií podle hlavního zdroje energie i s mezinárodním značením jednotlivých technologií. [1]</i> .....	15
<i>Obr. 4 Princip řezání vodním paprskem. [1]</i> .....	19
<i>Obr. 5 Porovnání technologií čistého vodního paprsku a abrazivního vodního paprsku. [1]</i> .....	20
<i>Obr. 6 Schéma konstrukce dýzy pro vodní paprsek. [21]</i> .....	20
<i>Obr. 7 Schéma ultrazvukového nárazového broušení. [6]</i> .....	22
<i>Obr. 8 Schéma vzniku laserového paprsku. [11]</i> .....	23
<i>Obr. 9 Přesun elektronu. [11]</i> .....	24
<i>Obr. 10 Vyzáření fotonu. [11]</i> .....	24
<i>Obr. 11 Schéma obrábění laserem. [8]</i> .....	25
<i>Obr. 12 Diodový laser. [21]</i> .....	25
<i>Obr. 13 Schéma obrábění paprskem elektronů. [8]</i> .....	28
<i>Obr. 14 Princip elektrojiskrového obrábění. [8]</i> .....	28
<i>Obr. 15 Rozdíl mezi mikrokompozitem a nanokompozitem na bázi jílů. [12]</i> .....	29
<i>Obr. 16 Dělení výztuže podle orientace vláken. [12]</i> .....	30
<i>Obr. 17 Způsob výroby kompozitních vodivých drátů. [12]</i> .....	31
<i>Obr. 18 Detail skelných vláken. [12]</i> .....	32
<i>Obr. 19 Detail uhlíkového vlákna. [12]</i> .....	33
<i>Obr. 20 Rozdíl v křivkách poměrné prodloužení – napětí vybraných matric v porovnání s uhlíkovým vláknem. [14]</i> .....	34
<i>Obr. 21 Namáhání tlakovými a tahovými silami. [20]</i> .....	35
<i>Obr. 22 Příklady konstrukčních vlastností sendvičových panelů. [20]</i> .....	35
<i>Obr. 23 Odchyvky povrchu od požadovaného tvaru. [15]</i> .....	37
<i>Obr. 24 Primární povrch profilu (P-profil). [15]</i> .....	38
<i>Obr. 25 Diagramy profilů povrchu. [15]</i> .....	38
<i>Obr. 26 Střední hodnota drsnosti. [15]</i> .....	39
<i>Obr. 27 Maximální a střední hloubka drsnosti profilu. [15]</i> .....	40

<i>Obr. 28 Závislost velikosti zbytkových napětí na mezi únavy v ohybu. [16]</i> .....	41
<i>Obr. 29 Způsoby měření dotykovým způsobem. [19]</i> .....	42
<i>Obr. 30 Schéma střížného nástroje</i> .....	44
<i>Obr. 31 Dřevěná deska na střížný nástroj</i> .....	44
<i>Obr. 32 Skelná tkanina</i> .....	45
<i>Obr. 33 Skelná rohož</i> .....	45
<i>Obr. 34 Pěna Herex</i> .....	45
<i>Obr. 35 Odsávací rohož</i> .....	46
<i>Obr. 36 Skladba červené kompozitní desky</i> .....	46
<i>Obr. 37 Skladba zelené desky</i> .....	47
<i>Obr. 38 Skladba modré desky</i> .....	47
<i>Obr. 39 Skladba bílé desky 4 vrstvé</i> .....	48
<i>Obr. 40 Skladba bílé desky 5 vrstvé</i> .....	48
<i>Obr. 41 Naseparovaná forma</i> .....	49
<i>Obr. 42 Zaizolovaná forma materiálem</i> .....	50
<i>Obr. 43 Lisování desky vakuem</i> .....	50
<i>Obr. 44 Měřicí zařízení Mitutoyo SJ-301</i> .....	51
<i>Obr. 45 Měřené vzorky oceli s popisem rychlostí</i> .....	52
<i>Obr. 46 Vzorky oceli s označenými hladinami a směrem řezu</i> .....	52
<i>Obr. 47 Měřené vzorky oceli s popisem rychlostí</i> .....	55
<i>Obr. 48 Vzorky oceli s označenými hladinami a směrem řezu</i> .....	55
<i>Obr. 49 Vzorky duralu s různými rychlostmi</i> .....	58
<i>Obr. 50 Rozdělený vzorek podle jednotlivých hladin s vyznačeným směrem řezu</i> .....	58
<i>Obr. 51 Dílenský mikroskop Zeiss</i> .....	61
<i>Obr. 52 Začátek a konec řezu laserem na červeném vzorku</i> .....	62
<i>Obr. 53 Začátek a konec řezu laserem na modrém vzorku</i> .....	62
<i>Obr. 54 Začátek a konec řezu laserem na bílé desce</i> .....	62
<i>Obr. 55 Stroj pro řezání vodním paprskem MACH 3</i> .....	65
<i>Obr. 56 Řezy o různých posuvových rychlostech a rozdílném tlaku provedených na červené desce</i> .....	66
<i>Obr. 57 Řezy o různých posuvových rychlostech a rozdílném tlaku provedených na zelené desce</i> .....	66
<i>Obr. 58 Desky s optimalizovanými řeznými podmínkami</i> .....	73

---

<i>Obr. 59 Vypálený jádrový materiál při řezu laserem .....</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 60 Znázorněný odskok materiálu na přechodu sklo/laminát.....</i>	<i>78</i>

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1 Srovnání základních parametrů technologií WJM (čistý vodní paprsek) a AWJ (abrazivní vodní paprsek). [1].....</i>	<i>19</i>
<i>Tab. 2 Závislosti parametrů drsnosti <math>R_a</math>, <math>R_z</math>, <math>R_t</math>, <math>R_{mr}</math> na posuvové rychlosti .....</i>	<i>52</i>
<i>Tab. 3 Závislosti <math>R_a</math>, <math>R_z</math>, <math>R_t</math>, <math>R_{mr}</math> na posuvové rychlosti <math>v_f</math>.....</i>	<i>55</i>
<i>Tab. 4 Závislost <math>R_a</math>, <math>R_z</math>, <math>R_{mr}</math> na hloubce a rychlosti řezu.....</i>	<i>58</i>
<i>Tab. 5 Naměřené hodnoty řezů pro obrábění laserem kompozitních desek .....</i>	<i>63</i>
<i>Tab. 6 Šířka řezu v závislosti na řezné rychlosti.....</i>	<i>67</i>
<i>Tab. 7 Závislost variačního rozpětí na posuvové rychlosti .....</i>	<i>69</i>
<i>Tab. 8 Aritmetické průměry hodnot šířky štěrbiny v závislosti na tlaku.....</i>	<i>70</i>
<i>Tab. 9 Hodnoty variačního rozpětí v závislosti na tlaku .....</i>	<i>71</i>
<i>Tab. 10 Naměřené hodnoty kompozitních desek pro 0,7 mm trysku.....</i>	<i>74</i>
<i>Tab. 11 Naměřené hodnoty kompozitních desek pro trysku 1,4 mm.....</i>	<i>75</i>

## SEZNAM GRAFŮ

<i>Graf 1 Závislost <math>R_a</math> na posuvové rychlosti</i> .....	53
<i>Graf 2 Závislost <math>R_z</math> na posuvové rychlosti</i> .....	54
<i>Graf 3 Závislost <math>R_{mr}</math> na posuvové rychlosti</i> .....	54
<i>Graf 4 Závislost <math>R_a</math> na posuvové rychlosti</i> .....	56
<i>Graf 5 Závislost <math>R_z</math> na posuvové rychlosti</i> .....	56
<i>Graf 6. Závislost <math>R_{mr}</math> na posuvové rychlosti</i> .....	57
<i>Graf 7 Závislost <math>R_a</math> na posuvové rychlosti</i> .....	59
<i>Graf 8 Závislost <math>R_z</math> na posuvové rychlosti</i> .....	59
<i>Graf 9 Závislost <math>R_{mr}</math> na posuvové rychlosti</i> .....	60
<i>Graf 10 Srovnání laserem řezaných drážek</i> .....	64
<i>Graf 11 Závislost rozdílu šířky řezu na měřené pozici</i> .....	64
<i>Graf 12 Závislost šířky řezu na rychlosti řezu (začátek řezu)</i> .....	67
<i>Graf 13 Závislost šířky řezu na rychlosti řezu (konec řezu)</i> .....	67
<i>Graf 14 Závislost šířky řezu na posuvové rychlosti u modré desky</i> .....	68
<i>Graf 15 Závislost šířky řezu na posuvové rychlosti u zelené desky</i> .....	68
<i>Graf 16 Závislost šířky řezu na posuvové rychlosti u červené desky</i> .....	68
<i>Graf 17 Závislost řezné rychlosti na variačním rozpětí (začátek řezu)</i> .....	69
<i>Graf 18 Závislost řezné rychlosti na variačním rozpětí (konec řezu)</i> .....	69
<i>Graf 19 Závislost šířky řezu na tlaku vody (začátek řezu)</i> .....	70
<i>Graf 20 Závislost šířky řezu na tlaku vody (konec řezu)</i> .....	70
<i>Graf 21 Závislost variačního rozpětí na tlaku vody (začátek řezu)</i> .....	71
<i>Graf 22 Závislost variačního rozpětí na tlaku vody (konec řezu)</i> .....	72
<i>Graf 23 Srovnání průměrné rozbíhavosti vodního paprsku pro 0,7 mm trysku</i> .....	74
<i>Graf 24 Rozbíhavost drážky v závislosti na měřené pozici (0,7 mm)</i> .....	75
<i>Graf 25 Srovnání průměrné rozbíhavosti vodního paprsku pro 1,4 mm trysku</i> .....	76
<i>Graf 26 Rozbíhavost drážky v závislosti na měřené pozici (1,4 mm)</i> .....	76

## **SEZNAM PŘÍLOH**

**Příloha P I:** Materiálové listy ocelí a duralu

**Příloha P II:** Naměřené hodnoty drsnosti vzorků

**Příloha P III:** Naměřené hodnoty šířky štěrbiny pro vodní paprsek

**Příloha P IV:** Naměřené hodnoty šířky štěrbiny pro laser

**Příloha P V:** Naměřené hodnoty šířky štěrbiny pro optimalizovaný řez vodním paprskem



## PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÉ LISTY OCELÍ A DURALU

CSN EN 573 STN EN 573 TŘÍDÍCÍ ZNAK 42 1401		Slitina hliníku tvářená pro všeobecné účely						SLITINA EN AW-6082 [AlSi1MgMn]		
Chemické složení [hm. %]										
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	ostatní		Al
								jednotl.	celkem	
0,7–1,3	0,50	0,10	0,4–1,0	0,6–1,2	0,25	0,20	0,10	0,05	0,15	zbytek
Polotovary										
[1]	plechy, pásy, desky tvářené za tepla				ČSN EN 485-1(42 1416) <sup>1)</sup> ČSN EN 485-2(42 4081) <sup>2)</sup> ČSN EN 485-3(42 7332) <sup>3)</sup>					
[2]	plechy, pásy, desky tvářené za studena				ČSN EN 485-1(42 1416) <sup>1)</sup> ČSN EN 485-2(42 4081) <sup>2)</sup> ČSN EN 485-4(42 7336) <sup>3)</sup>					
[3]	tyče a trubky tažené za studena				ČSN EN 754-1 <sup>1)</sup> ČSN EN 754-2(42 4085) <sup>2)</sup> – tyče kruhové ČSN EN 754-3(42 7611) <sup>3)</sup> – tyče čtvercové ČSN EN 754-4(42 7621) <sup>3)</sup> – tyče ploché ČSN EN 754-5(42 7625) <sup>3)</sup> – tyče šestihřanné ČSN EN 755-6(42 7631) <sup>3)</sup> – trubky bezešvé prČSN EN 755-7 <sup>3*)</sup> – trubky lis. komorovou matricí prČSN EN 754-8 <sup>3*)</sup>					
[4]	lisované tyče, trubky a profily				ČSN EN 755-1(42 1419) <sup>1)</sup> ČSN EN 755-2(42 4086) <sup>2)</sup> – tyče kruhové ČSN EN 755-3(42 7511) <sup>3)</sup> – tyče čtvercové ČSN EN 755-4(42 7521) <sup>3)</sup> – tyče ploché ČSN EN 755-5(42 7525) <sup>3)</sup> – tyče šestihřanné ČSN EN 755-6(42 7531) <sup>3)</sup> – trubky bezešvé prČSN EN 755-7 <sup>3*)</sup> – trubky lis. komor. matricí prČSN EN 755-8 <sup>3*)</sup> – profily prČSN EN 755-9 <sup>3*)</sup>					
[5]	tažené dráty				ČSN EN 1301-1(42 1418) <sup>1)</sup> ČSN EN 1301-2(42 4087) <sup>2)</sup> ČSN EN 1301-3(42 7412) <sup>3)</sup>					
[6]	výkovky				ČSN EN 586-1 <sup>1*)</sup> ČSN EN 586-2(42 4082) <sup>2)</sup>					
[7]	tvářené přířezy pro kování				ČSN EN 603-1(42 4082) <sup>1)</sup> ČSN EN 603-2(42 1441) <sup>2)</sup> ČSN EN 603-3(42 4090) <sup>3*)</sup>					

<b>WNr.</b> (číslo materiálu) <b>1.4301</b>		<b>Cr-Ni</b> austenitická korozivzdorná ocel				<b>OCEL</b> Kurzname (značka) <b>X5CrNi18-10</b>	
<b>Chemické složení [hm. %]</b>							
C	Si	Mn	P	S <sup>1)</sup>	Cr	Ni	N
max 0,07	max 1,00	max 2,00	max 0,045	max 0,015	17,0–19,5	8,00–10,5	max 0,11
<b>Normy DIN</b>							
DIN EN 10088 /1-3-95 korozivzdorné oceli							
DIN EN 10028/7-97 ploché výrobky z ocelí na tlakové nádoby; korozivzdorné oceli							
DIN EN 100222/5-00 výkovky z ocelí na tlakové nádoby; martenzitické, austenitické a austeniticko-fertické korozivzdorné oceli							
DIN EN 10250/4-00 volné výkovky z oceli pro všeobecné použití; korozivzdorné oceli							
DIN EN 10269-99 oceli a niklové slitiny na upevňovací části pro zvýšené a/nebo snížené teploty							
DIN 4133-91 ocelové komíny							
DIN 5512/3-91 oceli na kolejová vozidla; ploché výrobky z korozivzdorných ocelí							
DIN 17440-96 korozivzdorné oceli; plech, pás válcovaný za tepla a válcované tyče na tlakové nádoby, tažený drát a výkovky							
DIN 17441-97 korozivzdorné oceli; pás válcovaný za studena na tlakové nádoby							
DIN 17442-77 vývalky, výkovky a odličky z korozivzdorných ocelí na lékařské nástroje							
<b>Mechanické vlastnosti</b>							
Rozměr t, d [mm]		≤ 6 <sup>2)</sup>	≤ 12 <sup>3)</sup>	≤ 75 <sup>4)</sup>	≤ 160 <sup>5)</sup> 10)	161–250 <sup>5)</sup>	
Stav		po rozpouštěcím žhání					
Mez kluzu R <sub>p</sub> 0,2 [MPa] min		230 <sup>6)</sup>	210 <sup>6)</sup>		190 <sup>9)</sup>		
Mez kluzu R <sub>p</sub> 1,0 [MPa]		260 <sup>6)</sup>	250 <sup>6)</sup>		225 <sup>9)</sup>		
Mez pevnosti R <sub>m</sub> [MPa]		540–750	520–720		500–700		
Tažnost A [%] min		45 <sup>6)</sup> 7)		45 <sup>6)</sup>	45 <sup>9)</sup>	35 <sup>6)</sup> 9)	
Kontrakce Z [%]							
Nárazová práce KV [J]	podél min	–	90		100 <sup>9)</sup>		–
	napříč min	–	60		–		60 <sup>9)</sup>
Tvrdost HB max		–	–		215 <sup>9)</sup>		
Modul pružnosti E [GPa]		200					
Rozměr t <sub>n</sub> [mm]		250 <sup>11)</sup>					
Stav		po rozpouštěcím žhání					
Mez kluzu R <sub>p</sub> 0,2 [MPa] min		200					
Mez kluzu R <sub>p</sub> 1,0 [MPa]		230					
Mez pevnosti R <sub>m</sub> [MPa]		500–700					
Tažnost A %	podél min	45					
	napříč min	35					

<b>ČSN 41 1343</b>		<b>Ocel obvyklých jakostí</b>		<b>OCEL</b>			
<b>STN 41 1343</b>		<b>vhodná ke svařování</b>		<b>11 343</b>			
<b>Chemické složení [hm. %]</b>							
C	P	S	N				
max 0,16	0,045	max 0,045	max 0,007				
<b>Polotovary</b>							
[1] tyče válcované za tepla	[8] výkovky						
[2] dráty válcované za tepla	[9] tyče tažené za studena						
[3] tvarové tyče válcované za tepla	[10] tenké plechy tažené za studena						
[4] pásy válcované za tepla	[11] pásy a pruhy válcované za studena						
[5] tenké plechy válcované za tepla	[12] svařované závitové trubky válcované za tepla						
[6] tlusté plechy válcované za tepla	[13] podélně svařované hladké trubky tažené za studena						
[7] široká ocel válcovaná za tepla	[14] tenkostěnné profily tvářené za studena						
<b>Mechanické vlastnosti</b>							
Polotovary	[1] [8]						
Rozměr t, d [mm]	≤ 16	16–40	40–63	63–100	100–150	150–200	> 200
Stav	.0						
Mez kluzu $R_b$ [MPa] min	205	195	185		175	165	155
Mez pevnosti $R_m$ [MPa]	310–440						
Tažnost $A_5$ [%] min podél	30		29	28	26	25	
Modul pružnosti E [GPa]	206						
Polotovary	[6]		[13]	[14]			
Rozměr t, d [mm]	3–16	16–40	–	14–152			
Stav $R_b$	.0 .1		.0	.0 .1		.2	
Mez kluzu $R_b$ [MPa] min	205	195	195	200	180	190	
Mez pevnosti $R_m$ [MPa]	319–440		min 315	min 320	min 300	min 320	
Tažnost $A_5$ [%] min napříč	28		–	–			
Tažnost $A_{10}$ [%] min podél	–		20	8	20	18	
<b>Fyzikální vlastnosti</b>							
Hustota	Měrná tepelná kapacita	Tepelný součinitel roztažnosti	Tepelná vodivost	Konduktivita			
$\rho$ [kg . m <sup>-3</sup> ]	$c_p$ [J . kg <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> ]	$\alpha$ [K <sup>-1</sup> ]	$\lambda_t$ [W . m <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> ]	$\lambda_e$ [MS . m <sup>-1</sup> ]			
7 850	–	11,1.10 <sup>-6</sup>	54,5	–			



60%		Ra	Rz	Rt	Rmr		60%		Ra	Rz	Rt	Rmr
1	25%	2,47	16,12	20,23	64%		1	25%	2,85	18,12	25,32	85%
2		3,66	21,80	28,42	71%		2		2,97	19,08	25,00	66%
3		2,80	16,89	22,54	66%		3		3,47	20,10	26,54	51%
4		2,55	15,58	18,76	71%		4		3,64	20,49	26,07	52%
5		3,26	11,56	26,71	48%		5		3,16	18,78	24,81	67%
$\bar{x}$		2,95	16,39	23,33	64%		$\bar{x}$		3,22	19,31	25,55	64%
$\sigma$		0,45	3,27	3,70	8,46%		$\sigma$		0,30	0,87	0,66	12,38%
R	1,19	10,24	9,66	23%		R	0,79	2,37	1,73	34%		
6	50%	2,69	18,87	24,00	68%		6	50%	3,11	17,99	23,35	50%
7		5,93	30,91	39,21	52%		7		3,62	20,58	27,91	33%
8		4,50	22,85	31,47	65%		8		2,98	17,71	29,80	51%
9		4,64	25,50	31,57	50%		9		3,62	21,23	26,40	65%
10		3,79	22,73	29,51	71%		10		3,78	22,47	25,30	67%
$\bar{x}$		4,31	24,17	31,15	61%		$\bar{x}$		3,42	20,00	26,55	53%
$\sigma$		1,06	3,98	4,88	8,57%		$\sigma$		0,32	1,86	2,20	12,27%
R	3,24	12,04	15,21	21%		R	0,80	4,76	6,45	34%		
11	75%	3,71	19,24	28,28	67%		11	75%	3,27	22,32	31,54	78%
12		10,33	40,84	54,93	51%		12		4,86	23,53	30,93	62%
13		6,15	28,15	39,95	46%		13		4,74	23,40	29,88	52%
14		7,98	37,09	43,69	48%		14		4,25	23,09	34,13	58%
15		3,88	25,48	36,60	38%		15		4,06	21,81	27,74	68%
$\bar{x}$		6,41	30,16	40,69	50%		$\bar{x}$		4,24	22,83	30,84	64%
$\sigma$		2,51	7,84	8,75	9,53%		$\sigma$		0,57	0,66	2,09	8,89%
R	6,62	21,60	26,65	29%		R	1,59	1,72	6,39	26%		
80%		Ra	Rz	Rt	Rmr		80%		Ra	Rz	Rt	Rmr
1	25%	2,77	17,38	22,19	60%		1	25%	2,95	18,23	23,89	76%
2		2,97	19,41	24,70	69%		2		3,53	21,32	28,97	72%
3		3,37	21,58	24,50	69%		3		4,14	24,20	36,24	49%
4		2,63	17,29	21,77	53%		4		4,21	25,74	32,46	67%
5		2,86	19,70	23,88	86%		5		3,86	21,64	29,13	70%
$\bar{x}$		2,92	19,07	23,41	67%		$\bar{x}$		3,74	22,23	30,14	67%
$\sigma$		0,25	1,60	1,20	11,07%		$\sigma$		0,46	2,58	4,10	9,37%
R	0,74	4,29	2,93	33%		R	1,26	7,51	12,35	27%		
6	50%	2,78	17,76	24,19	65%		6	50%	2,81	18,20	23,03	72%
7		4,34	20,79	27,81	45%		7		3,63	21,70	29,28	62%
8		4,60	21,89	28,90	59%		8		3,43	19,54	23,64	66%
9		9,02	40,72	48,83	30%		9		3,75	21,47	27,15	62%
10		3,18	19,20	21,56	71%		10		3,40	20,53	28,27	46%
$\bar{x}$		4,78	24,07	30,26	54%		$\bar{x}$		3,40	20,29	26,27	62%
$\sigma$		2,23	8,44	9,65	14,78%		$\sigma$		0,32	1,29	2,50	8,62%
R	6,24	22,96	27,27	41%		R	0,94	3,50	6,25	26%		
11	75%	3,98	20,81	27,59	60%		11	75%	3,16	19,09	22,62	55%
12		8,68	37,46	46,83	38%		12		5,29	26,90	38,03	31%
13		9,78	38,32	54,98	60%		13		5,10	23,60	31,28	61%
14		6,02	26,11	35,37	62%		14		3,91	20,65	25,76	54%
15		4,60	23,72	31,81	54%		15		3,13	18,03	21,37	67%
$\bar{x}$		6,61	29,28	39,32	55%		$\bar{x}$		4,12	21,65	27,81	54%
$\sigma$		2,26	7,23	10,11	8,82%		$\sigma$		0,92	3,23	6,15	12,22%
R	5,80	17,51	27,39	24%		R	2,16	8,87	16,66	36%		



Ocel					
100%		Ra[ $\mu$ m]	Rz[ $\mu$ m]	Rt[ $\mu$ m]	Rmr
1	25%	4,75	30,45	37,68	66%
2		4,44	29,95	36,88	72%
3		4,89	33,95	43,06	56%
4		5,44	31,24	37,04	60%
5		5,15	33,81	39,39	72%
$\bar{x}$		4,93	31,88	38,81	65%
$\sigma$	0,34	1,68	2,30	6,40%	
R	1,00	4,00	6,18	16%	
6	50%	Mimo rozsah měřičho zařízení			
7					
8					
9					
10					
$\bar{x}$					
$\sigma$					
R					
11	75%	Mimo rozsah měřičho zařízení			
12					
13					
14					
15					
$\bar{x}$					
$\sigma$					
R					

Ocel legovaná					
100%		Ra	Rz	Rt	Rmr
1	25%	3,73	24,74	31,07	77%
2		4,49	28,57	39,33	55%
3		4,08	26,03	33,71	74%
4		4,36	29,91	37,40	54%
5		3,58	25,26	32,07	56%
$\bar{x}$		4,05	26,90	34,72	63%
$\sigma$	0,35	2,00	3,16	10,11%	
R	0,91	5,17	8,26	23%	
6	50%	Mimo rozsah měřičho zařízení			
7					
8					
9					
10					
$\bar{x}$					
$\sigma$					
R					
11	75%	Mimo rozsah měřičho zařízení			
12					
13					
14					
15					
$\bar{x}$					
$\sigma$					
R					

Dural:

Dural				
40%		Ra	Rz	Rmr
1	25%	3,57	25,19	69%
2		3,13	20,72	66%
3		4,27	21,03	75%
4		3,43	19,10	70%
5		2,97	20,64	70%
$\bar{x}$		3,47	21,34	70%
$\sigma$	0,45	2,04	2,90%	
R	1,30	6,09	9%	
6	50%	6,73	31,15	47%
7		6,56	29,53	62%
8		7,11	31,22	69%
9		7,10	30,78	68%
10		6,37	30,00	67%
$\bar{x}$		6,77	30,54	63%
$\sigma$	0,29	0,66	8,16%	
R	0,74	1,69	22%	
11	75%	9,91	31,13	64%
12		8,89	30,09	57%
13		9,95	32,03	62%
14		9,57	31,22	63%
15		10,66	30,16	67%
$\bar{x}$		9,80	30,93	63%
$\sigma$	0,58	0,73	3,26%	
R	1,77	1,94	10%	

80%		Ra	Rz	Rmr
1	25%	4,10	24,34	85%
2		4,58	26,84	66%
3		3,72	24,58	68%
4		3,36	26,28	67%
5		4,47	23,88	67%
$\bar{x}$		4,05	25,18	71%
$\sigma$	0,46	1,16	7,23%	
R	1,22	2,96	19%	
6	50%	12,14	46,73	59%
7		12,49	42,15	55%
8		9,58	36,18	67%
9		9,66	40,36	46%
10		7,76	31,98	48%
$\bar{x}$		10,33	39,48	55%
$\sigma$	1,76	5,05	7,62%	
R	4,73	14,75	21%	
11	75%	13,78	52,87	52%
12		16,54	55,98	40%
13		15,06	53,35	56%
14		14,12	63,14	54%
15		20,23	80,02	42%
$\bar{x}$		15,95	61,07	42%
$\sigma$	2,35	10,16	6,93%	
R	6,45	27,15	18%	

60%		Ra	Rz	Rmr
1	25%	4,14	23,08	90%
2		4,28	28,22	72%
3		3,98	24,01	71%
4		4,05	20,69	74%
5		3,60	21,31	64%
$\bar{x}$		4,01	23,46	74%
$\sigma$	0,23	2,66	8,59%	
R	0,68	7,53	26%	
6	50%	6,63	30,22	53%
7		7,79	33,44	72%
8		6,98	30,62	84%
9		6,74	30,01	86%
10		7,22	28,93	67%
$\bar{x}$		7,07	30,64	72%
$\sigma$	0,41	1,51	12,04%	
R	1,16	4,51	33%	
11	75%	7,59	32,76	62%
12		9,95	37,90	55%
13		8,47	37,05	65%
14		10,64	35,65	44%
15		10,69	38,21	54%
$\bar{x}$		9,47	36,31	56%
$\sigma$	1,23	1,99	7,29%	
R	3,10	5,45	21%	

100%		Ra	Rz	Rmr	
1	25%	4,90	23,65	38%	
2		5,40	35,77	45%	
3		5,55	36,73	70%	
4		5,52	35,06	57%	
5		6,54	43,69	58%	
$\bar{x}$		5,58	34,98	54%	
$\sigma$	0,53	6,45	11,11%		
R	1,64	20,04	32%		
6	50%	Mimo rozsah měřičho zařízení			
7					
8					
9					
10					
$\bar{x}$					
$\sigma$					
R					
11	75%	Mimo rozsah měřičho zařízení			
12					
13					
14					
15					
$\bar{x}$					
$\sigma$					
R					

## PŘÍLOHA P III: NAMĚŘENÉ HODNOTY ŠÍŘKY ŠTĚRBINY PRO VODNÍ PAPERSEK

		Vodní paprsek										
		1. modrá deska										
		šířka řezu při konstantním tlaku 200 Mpa a proměnné rychlosti vf [mm]					šířka řezu při konstantní rychlosti vf 60 % a proměnném tlaku P [mm]					
		20%	40%	60%	80%	100%	150 MPa	200 MPa	250 MPa	300 MPa	350 MPa	400 MPa
začátek řezu	1	0,89	0,76	0,75	0,67	0,65	0,85	0,75	0,79	0,76	0,73	0,79
	2	0,85	0,77	0,72	0,66	0,67	0,88	0,72	0,76	0,76	0,76	0,82
	3	0,91	0,75	0,73	0,69	0,66	0,89	0,73	0,75	0,75	0,72	0,84
	4	0,93	0,73	0,70	0,67	0,69	0,90	0,70	0,75	0,71	0,70	0,81
	5	0,87	0,77	0,72	0,66	0,68	0,91	0,72	0,77	0,73	0,73	0,78
	6	0,92	0,76	0,74	0,70	0,67	0,82	0,74	0,81	0,74	0,72	0,83
	7	0,88	0,77	0,70	0,71	0,70	0,80	0,70	0,77	0,71	0,76	0,86
	8	0,89	0,78	0,72	0,69	0,71	0,77	0,72	0,76	0,75	0,77	0,80
	9	0,91	0,80	0,74	0,66	0,74	0,73	0,74	0,78	0,80	0,73	0,82
	10	0,95	0,78	0,72	0,74	0,73	0,72	0,72	0,82	0,79	0,78	0,87
	$\bar{x}$	0,90	0,77	0,72	0,69	0,69	0,83	0,72	0,78	0,75	0,74	0,82
	$\sigma$	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,07	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03
R	0,10	0,07	0,05	0,08	0,09	0,19	0,05	0,07	0,09	0,08	0,09	
konec řezu	1	1,24	1,29	1,31	1,28	1,25	1,30	1,31	1,30	1,37	1,38	1,35
	2	1,32	1,28	1,30	1,29	1,24	1,33	1,30	1,31	1,38	1,38	1,34
	3	1,32	1,26	1,28	1,27	1,26	1,34	1,28	1,30	1,31	1,36	1,38
	4	1,31	1,28	1,27	1,29	1,24	1,32	1,27	1,34	1,32	1,35	1,39
	5	1,37	1,30	1,29	1,31	1,23	1,34	1,29	1,35	1,30	1,36	1,36
	6	1,34	1,27	1,31	1,30	1,22	1,32	1,31	1,37	1,34	1,35	1,38
	7	1,35	1,32	1,30	1,28	1,20	1,29	1,30	1,35	1,34	1,38	1,41
	8	1,33	1,31	1,29	1,29	1,23	1,30	1,29	1,36	1,35	1,35	1,40
	9	1,29	1,32	1,31	1,28	1,20	1,31	1,31	1,34	1,33	1,36	1,39
	10	1,27	1,36	1,37	1,26	1,23	1,32	1,37	1,35	1,35	1,34	1,42
	$\bar{x}$	1,31	1,30	1,30	1,29	1,23	1,32	1,30	1,34	1,34	1,36	1,38
	$\sigma$	0,04	0,03	0,03	0,01	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,01	0,02
R	0,13	0,10	0,10	0,05	0,06	0,05	0,10	0,07	0,08	0,04	0,08	

		2. zelená deska										
		šířka řezu při konstantním tlaku 200 Mpa a proměnné rychlosti vf [mm]					šířka řezu při konstantní rychlosti vf 60 % a proměnném tlaku P [mm]					
		20%	40%	60%	80%	100%	150 MPa	200 MPa	250 MPa	300 MPa	350 MPa	400 MPa
začátek řezu	1	1,04	1,02	0,98	0,82	0,96	0,95	0,98	0,93	0,85	0,96	0,96
	2	1,00	0,99	0,98	0,80	0,94	0,88	0,98	0,83	0,78	0,92	0,90
	3	1,00	1,00	0,89	0,78	0,89	0,85	0,89	0,73	0,84	0,83	0,83
	4	1,01	1,01	0,93	0,81	0,80	0,87	0,93	0,83	0,84	0,85	0,86
	5	1,01	1,02	0,91	0,79	0,88	0,78	0,91	0,79	0,83	0,82	0,82
	6	1,02	1,00	0,95	0,83	0,81	0,84	0,95	0,84	0,82	0,84	0,79
	7	1,00	0,93	0,89	0,84	0,86	0,81	0,89	0,82	0,84	0,80	0,85
	8	1,00	0,99	0,81	0,80	0,78	0,82	0,81	0,92	0,81	0,81	0,80
	9	1,01	0,97	0,83	0,81	0,88	0,79	0,83	0,79	0,79	0,85	0,75
	10	1,01	1,00	0,84	0,88	0,96	0,84	0,84	0,73	0,78	0,80	0,78
	$\bar{x}$	1,01	0,99	0,90	0,82	0,88	0,84	0,90	0,82	0,79	0,85	0,83
	$\sigma$	0,01	0,03	0,06	0,03	0,06	0,05	0,06	0,06	0,03	0,05	0,06
R	0,04	0,09	0,17	0,10	0,18	0,17	0,17	0,20	0,07	0,16	0,21	
konec řezu	1	1,36	1,44	1,46	1,39	1,40	1,39	1,46	1,40	1,42	1,38	1,41
	2	1,39	1,43	1,42	1,36	1,38	1,32	1,42	1,38	1,43	1,38	1,38
	3	1,37	1,40	1,42	1,38	1,34	1,31	1,42	1,39	1,40	1,36	1,36
	4	1,40	1,41	1,40	1,38	1,40	1,33	1,40	1,39	1,39	1,43	1,34
	5	1,39	1,39	1,39	1,37	1,37	1,34	1,39	1,36	1,38	1,42	1,34
	6	1,39	1,41	1,43	1,33	1,32	1,37	1,43	1,33	1,39	1,41	1,33
	7	1,37	1,39	1,40	1,35	1,31	1,35	1,40	1,32	1,40	1,40	1,33
	8	1,34	1,38	1,41	1,37	1,32	1,35	1,41	1,34	1,41	1,41	1,32
	9	1,35	1,36	1,37	1,30	1,34	1,32	1,37	1,35	1,31	1,38	1,30
	10	1,32	1,30	1,35	1,29	1,31	1,30	1,35	1,31	1,38	1,33	1,35
	$\bar{x}$	1,37	1,39	1,41	1,35	1,35	1,34	1,41	1,36	1,39	1,39	1,35
	$\sigma$	0,02	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
R	0,08	0,14	0,11	0,10	0,09	0,09	0,11	0,09	0,12	0,10	0,11	

		3. červená deska										
		šířka řezu při konstantním tlaku 200 Mpa a proměnné rychlosti vf [mm]					šířka řezu při konstantní rychlosti vf 60 % a proměnném tlaku P [mm]					
		20%	40%	60%	80%	100%	150 MPa	200 MPa	250 MPa	300 MPa	350 MPa	400 MPa
začátek řezu	1	1,49	1,46	1,39	1,35	1,39	1,36	1,39	1,46	1,41	1,44	1,43
	2	1,46	1,48	1,38	1,34	1,44	1,37	1,38	1,42	1,39	1,41	1,39
	3	1,49	1,41	1,34	1,37	1,38	1,39	1,34	1,44	1,37	1,43	1,40
	4	1,48	1,46	1,39	1,39	1,33	1,38	1,39	1,40	1,42	1,40	1,41
	5	1,47	1,43	1,36	1,36	1,32	1,36	1,36	1,42	1,39	1,42	1,40
	6	1,49	1,47	1,40	1,31	1,33	1,37	1,40	1,39	1,41	1,38	1,36
	7	1,50	1,49	1,38	1,35	1,32	1,37	1,38	1,41	1,44	1,37	1,38
	8	1,48	1,45	1,36	1,41	1,32	1,41	1,36	1,43	1,42	1,39	1,37
	9	1,49	1,47	1,39	1,46	1,38	1,39	1,39	1,42	1,40	1,40	1,43
	10	1,48	1,42	1,44	1,34	1,33	1,43	1,44	1,45	1,41	1,43	1,45
	$\bar{x}$	1,48	1,45	1,38	1,37	1,35	1,38	1,38	1,42	1,41	1,41	1,40
	$\sigma$	0,01	0,02	0,03	0,04	0,04	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03
R	0,04	0,08	0,10	0,15	0,12	0,07	0,10	0,07	0,07	0,07	0,09	
konec řezu	1	1,75	1,94	1,72	1,62	2,08	2,11	1,72	1,66	1,81	2,05	1,92
	2	1,83	2,05	1,85	1,94	1,96	2,17	1,85	1,78	1,76	2,00	1,96
	3	2,00	2,04	2,06	2,13	1,75	1,95	2,06	1,72	1,98	2,03	2,02
	4	2,04	1,97	2,12	2,02	1,62	1,90	2,12	1,63	2,21	1,98	2,00
	5	2,10	2,08	2,02	2,26	2,17	2,01	2,02	1,71	2,10	1,83	2,02
	6	1,87	2,12	2,08	2,10	2,35	2,09	2,08	1,87	1,98	1,81	2,10
	7	2,02	2,13	1,92	2,31	2,47	2,06	1,92	1,94	1,91	1,78	2,01
	8	1,95	2,02	2,05	1,90	2,11	2,15	2,05	1,94	2,03	1,92	1,94
	9	2,06	1,83	2,12	1,93	1,86	2,10	2,12	1,96	1,82	1,84	1,88
	10	2,09	1,89	2,01	2,16	2,06	2,08	2,01	2,11	1,88	1,89	1,91
	$\bar{x}$	1,97	2,01	2,00	2,04	2,04	2,06	2,00	1,83	1,95	1,91	1,98
	$\sigma$	0,11	0,09	0,12	0,19	0,25	0,08	0,12	0,15	0,13	0,09	0,06
R	0,35	0,30	0,40	0,69	0,85	0,27	0,40	0,48	0,45	0,27	0,22	

		Deska bílá 4-vrstvá										$\bar{x}$	$\sigma$	R
		Mpa	1	2	3	4	5	6	7	8	9			
začátek řezu	150	0,82	0,84	0,82	0,86	0,81	0,79	0,85	0,85	0,83	0,80	0,83	0,02	0,07
	200	0,77	0,84	0,81	0,87	0,85	0,81	0,85	0,83	0,90	0,87	0,84	0,04	0,13
	250	0,66	0,71	0,69	0,73	0,69	0,73	0,67	0,62	0,61	0,65	0,68	0,04	0,12
	300	0,57	0,63	0,58	0,62	0,65	0,66	0,61	0,63	0,60	0,61	0,62	0,03	0,09
	350	0,56	0,62	0,66	0,61	0,63	0,64	0,67	0,64	0,69	0,70	0,64	0,04	0,14
	400	0,96	0,97	1,01	1,03	0,98	0,99	1,05	0,96	0,98	0,97	0,99	0,03	0,09
konec řezu	150	0,85	0,96	0,90	0,92	0,96	0,93	0,86	0,94	0,98	0,94	0,92	0,04	0,13
	200	0,86	0,88	0,91	0,94	0,90	0,93	0,97	0,93	0,86	0,88	0,91	0,03	0,11
	250	1,15	1,12	1,04	1,10	1,02	1,01	1,02	0,99	1,03	1,09	1,06	0,05	0,16
	300	1,27	1,20	1,21	1,25	1,38	1,32	1,34	1,30	1,32	1,32	1,29	0,05	0,18
	350	1,28	1,24	1,25	1,29	1,23	1,30	1,31	1,21	1,24	1,15	1,25	0,05	0,16
	400	0,80	0,84	0,81	0,85	0,86	0,83	0,95	0,97	0,91	0,95	0,88	0,06	0,17



## PŘÍLOHA P IV: NAMĚŘENÉ HODNOTY ŠÍŘKY ŠTĚRBINY PRO LASER

1. červená deska													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$\bar{x}$	$\sigma$	R
začátek řezu	0,98	0,99	0,96	0,97	0,95	0,98	0,96	0,98	0,99	0,97	0,97	0,01	0,04
konec řezu	1,05	1,03	1,02	1,06	1,04	1,05	1,06	1,01	1,04	1,05	1,04	0,02	0,05

2. modrá deska													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$\bar{x}$	$\sigma$	R
začátek řezu	0,66	0,82	0,74	0,63	0,81	0,73	0,68	0,66	0,72	0,83	0,73	0,07	0,20
konec řezu	0,94	0,91	0,93	0,92	0,91	0,94	0,96	0,98	0,97	0,99	0,95	0,03	0,08

3. bílá vícevrstvá deska													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$\bar{x}$	$\sigma$	R
začátek řezu	0,69	0,62	0,55	0,54	0,57	0,55	0,59	0,58	0,62	0,61	0,59	0,04	0,15
konec řezu	0,38	0,31	0,32	0,39	0,45	0,33	0,31	0,32	0,32	0,49	0,36	0,06	0,18

4. dřevěná deska														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$\bar{x}$	$\sigma$	R	
začátek řezu	3-bod	1,17	1,16	1,12	1,16	1,11	1,15	1,08	1,09	1,14	1,16	1,13	0,03	0,09
	2-bod ver.	0,90	0,72	0,76	0,75	0,76	0,77	0,78	0,89	0,78	0,79	0,79	0,06	0,18
	2-bod hor.	0,81	0,76	0,85	0,73	0,75	0,76	0,84	0,79	0,74	0,82	0,79	0,04	0,12
konec řezu	3-bod	1,22	1,23	1,22	1,20	1,17	1,23	1,21	1,24	1,25	1,16	1,21	0,03	0,09
	2-bod ver.	0,89	0,89	0,87	0,86	0,85	0,86	0,78	0,79	0,89	0,85	0,85	0,04	0,11
	2-bod hor.	0,87	0,86	0,76	0,78	0,85	0,86	0,77	0,91	0,87	0,84	0,84	0,05	0,15

5. deska bílá 4-vrstvá													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$\bar{x}$	$\sigma$	R
začátek řezu	0,79	0,79	0,78	0,77	0,78	0,79	0,79	0,80	0,77	0,79	0,79	0,01	0,03
konec řezu	0,98	0,99	0,97	1,02	1,00	0,97	0,96	0,92	0,93	0,95	0,97	0,03	0,10

## PŘÍLOHA P V: NAMĚŘENÉ HODNOTY ŠÍŘKY ŠTĚRBINY PRO OPTIMALIZOVANÉ PODMÍNKY ŘEZU VODNÍM PAPRSKEM

Tryska 0,7 mm:

Červená deska 2 vrstvy													
Dýza $\varnothing 0,7$ mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$\bar{x}$	$\sigma$	R
začátek řezu [mm]	0,65	0,67	0,65	0,66	0,68	0,69	0,66	0,67	0,66	0,70	0,67	0,02	0,05
konec řezu [mm]	0,76	0,74	0,78	0,79	0,77	0,77	0,75	0,76	0,79	0,72	0,76	0,02	0,07
$\Delta$ [mm]	0,11	0,07	0,13	0,13	0,09	0,08	0,09	0,09	0,13	0,02	0,09	0,03	0,11
Bílá deska 4 vrstvy													
Dýza $\varnothing 0,7$ mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$\bar{x}$	$\sigma$	R
začátek řezu [mm]	0,65	0,66	0,67	0,64	0,65	0,64	0,63	0,65	0,65	0,64	0,65	0,01	0,04
konec řezu [mm]	0,85	0,85	0,86	0,84	0,82	0,76	0,75	0,78	0,75	0,73	0,80	0,05	0,13
$\Delta$ [mm]	0,20	0,19	0,19	0,20	0,17	0,12	0,12	0,13	0,10	0,09	0,15	0,04	0,11
Bílá deska 5 vrstev													
Dýza $\varnothing 0,7$ mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$\bar{x}$	$\sigma$	R
začátek řezu [mm]	0,60	0,54	0,53	0,59	0,62	0,58	0,58	0,59	0,56	0,57	0,58	0,03	0,09
konec řezu [mm]	0,73	0,76	0,72	0,75	0,72	0,81	0,82	0,77	0,80	0,81	0,77	0,04	0,10
$\Delta$ [mm]	0,13	0,22	0,19	0,16	0,10	0,23	0,24	0,18	0,24	0,24	0,19	0,05	0,14

Tryska 1,4 mm:

Červená deska 2 vrstvy													
Dýza $\varnothing 1,4$ mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$\bar{x}$	$\sigma$	R
začátek řezu [mm]	1,34	1,29	1,30	1,27	1,32	1,29	1,32	1,33	1,30	1,34	1,31	0,02	0,07
konec řezu [mm]	1,54	1,59	1,57	1,60	1,62	1,59	1,60	1,57	1,54	1,52	1,57	0,03	0,10
$\Delta$ [mm]	0,20	0,30	0,27	0,33	0,30	0,30	0,28	0,24	0,24	0,18	0,26	0,05	0,15
Bílá deska 4 vrstvy													
Dýza $\varnothing 1,4$ mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$\bar{x}$	$\sigma$	R
začátek řezu [mm]	1,24	1,22	1,21	1,24	1,23	1,18	1,23	1,24	1,23	1,21	1,22	0,02	0,06
konec řezu [mm]	1,38	1,33	1,29	1,30	1,29	1,31	1,36	1,32	1,34	1,30	1,32	0,03	0,09
$\Delta$ [mm]	0,14	0,11	0,08	0,06	0,06	0,13	0,13	0,08	0,11	0,09	0,10	0,03	0,08
Bílá deska 5 vrstev													
Dýza $\varnothing 1,4$ mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$\bar{x}$	$\sigma$	R
začátek řezu [mm]	1,31	1,31	1,30	1,32	1,30	1,33	1,28	1,29	1,31	1,28	1,30	0,02	0,05
konec řezu [mm]	1,37	1,42	1,35	1,33	1,35	1,45	1,39	1,40	1,36	1,47	1,39	0,04	0,14
$\Delta$ [mm]	0,06	0,11	0,05	0,01	0,05	0,12	0,11	0,11	0,05	0,19	0,09	0,05	0,18