

Optimalizace procesu obrábění kompozitních materiálů laserem a vodním paprskem

Bc. Pavel Šantavý

Diplomová práce
2012



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Pavel ŠANTAVÝ**
Osobní číslo: **T100020**
Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**

Téma práce: **Optimalizace procesu obrábění kompozitních materiálů laserem a vodním paprskem.**

Zásady pro vypracování:

- 1. Teorie nekonvenčních metod obrábění,**
- 2. rozdělení, výroba kompozitních materiálů,**
- 3. popis optimalizačních metod v technologii obrábění,**
- 4. experimentální obrábění kompozitů,**
- 5. vyhodnocení výsledků experimentů.**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

AGARWAL, B. D. Vláknové kompozity. Praha: SNTL, 1987.

PTÁČEK, L. Nauka o materiálu I. Brno: CERM, 2001. ISBN 80-7204-193-2.

JANÁČ, A. Technológia obrábania. Bratislava: STU, 2004. ISBN 80-227-2031-3.

KOČMAN, K. Technologické procesy – obrábění. Brno: CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.

MAŇKOVÁ, I. Progresívne technológie. Košice: Vienala, 2000. ISBN 80-7099-430-4.

MILIKIČ, D. Nekonzvencionalni postupci obrade. Universitet v Novom Sadu, 2002. ISBN 86-499-0116-6.

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

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **13. února 2012**

Termín odevzdání diplomové práce: **18. května 2012**

Ve Zlíně dne 2. února 2012



doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.

děkan



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.

ředitel ústavu

Příjmení a jméno: Šantavý Pavel

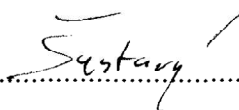
Obor: Výrobní inženýrství

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 ¹⁾;
- 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 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ 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 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užit své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, 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 17.5.2012

.....


¹⁾ 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 nevdělečně 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.

²⁾ 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 vzdělávacího zařízení (školní dílo).

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

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

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

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

ABSTRAKT

Cílem této práce je stanovit faktory ovlivňující kvalitu řezu laserem a vodním paprskem a způsob, jakým tyto řezy ovlivňují. Materiály, na nichž jsou experimenty prováděny, jsou především sendvičové desky s pěnovými jádry a kompozitními materiály. Tyto desky by měly sloužit pro výrobu střížných nástrojů pro papírenský průmysl, kde je potřeba vytvořit v desce úzkou drážku o velmi malé toleranci šířky. Konvenčními technologiemi je díky malé šířce tuto drážku obtížné vytvořit, proto je využito nekonvenčních metod obrábění.

Klíčová slova: nekonvenční technologie, optimalizace, vodní paprsek, laser, kompozitní materiály

ABSTRACT

The aim of this work is to set factors affecting the quality of cut by laser and water jet and the way how these factors affect the cuts. Materials for the experiments are mainly sandwich panels with foam cores and composite materials. These panels should be used for the production of cutting tools for paper industry, where it is needed to create a narrow groove in the panel with a very narrow tolerance of width. It is difficult to create this groove by conventional technologies due to the small width, therefore non-conventional machining methods are used.

Keywords: non-conventional technologies, optimization, water jet, laser, composite materials

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval všem, kteří mě při psaní diplomové práce podporovali, především pak děkuji svému vedoucímu Prof. Ing. Imrichu Lukovicsovi CSc. za jeho odborné vedení a rady, které byly neocenitelnou pomocí během vypracování této práce.

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

OBSAH

ÚVOD.....	10
I TEORETICKÁ ČÁST.....	12
1 TEORIE NEKONVENČNÍCH METOD OBRÁBĚNÍ.....	13
1.1 MECHANICKÉ PROCESY OBRÁBĚNÍ:	15
1.1.1 Obrábění ultrazvukem (USM).....	15
1.1.2 Obrábění abrazivním paprskem (AJM – Abrasive Jet Machining)	17
1.1.3 Obrábění vodním (WJM) a abrazivním vodním paprskem (AWJM)	18
1.2 ELEKTROTEPELNÉ PROCESY OBRÁBĚNÍ	22
1.2.1 Elektroerozivní obrábění (EDM)	23
1.2.2 Laserový paprsek	24
1.2.2.1 Laser-Microjet	37
1.2.3 Plazmový paprsek	39
1.2.4 Elektronový paprsek.....	40
1.2.5 Iontový paprsek.....	41
1.3 ELEKTROCHEMICKÉ A CHEMICKÉ PROCESY OBRÁBĚNÍ.....	42
1.3.1 Chemické procesy obrábění	42
1.3.2 Elektrochemické obrábění.....	43
2 ROZDĚLENÍ A VÝROBA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	44
2.1 ROZDĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	44
2.2 VÝROBA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ.....	46
2.2.1 Ruční laminování	46
2.2.2 RTM (Resin Transfer Molding)	47
2.2.3 Vakuová infuze (VIP – Vacuum Infusion Process)	48
2.2.4 Vakuové lisování prepregů	49
2.2.5 Pultruze	49
2.2.6 Navíjení	51
2.3 VYZTUŽUJÍCÍ VLÁKNA.....	52
2.3.1 Skleněná vlákna – GF (Glass Fiber)	52
2.3.2 Aramidová vlákna – AF (Aramid Fiber).....	54
2.3.3 Uhlíková vlákna – CF (Carbon Fiber)	56
2.3.4 Srovnání aramidových, uhlíkových a sklem vyztužených kompozitů.....	57
2.3.5 Upravené produkty z vláken	59
3 POPIS OPTIMALIZAČNÍCH METOD V TECHNOLOGII OBRÁBĚNÍ.....	62
3.1 KONVENČNÍ OPTIMALIZACE ŘEZNÝCH PODMÍNEK	63
3.2 LINEÁRNÍ PROGRAMOVÁNÍ.....	63
II PRAKTICKÁ ČÁST	64
4 EXPERIMENTÁLNÍ OBRÁBĚNÍ KOMPOZITŮ A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	65
4.1 POPIS A VÝROBA DESEK.....	65
4.1.1 Aplikace vyrobených desek	65
4.1.2 Skladba jednotlivých desek.....	66
4.1.3 Postup výroby.....	67

4.2	MĚŘENÍ SIL PŮSOBÍCÍCH PŘI FRÉZOVÁNÍ	70
	Všechna měření byla provedena na CNC frézce dostupné v laboratořích ÚVI s otáčkami $n = 8000 \text{ ot.min}^{-1}$ a posuvovou rychlostí $v_f = 1500$ mm.min^{-1}	71
4.2.1	Vzorky pro měření	71
4.2.2	Obvodové frézování	71
4.2.3	Frézování drážky (100% D)	75
4.3	ŘEZY NA LASERU	76
4.4	ŘEZY NA VODNÍM PAPERU	77
4.4.1	Naměřené hodnoty drsnosti na vzorku z duralu	77
4.4.2	Šířka štěrbin po řezu	81
4.4.2.1	Závislost kvality štěrbin na rychlosti řezu	82
4.4.2.2	Závislost kvality štěrbin na tlaku vodního paprsku	85
4.4.2.3	Závislost kvality štěrbin na hustotě materiálu	88
4.4.3	Příčný tvar řezu	88
	ZÁVĚR	98
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	100
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	102
	SEZNAM OBRÁZKŮ	103
	SEZNAM TABULEK	106
	SEZNAM GRAFŮ	107
	SEZNAM PŘÍLOH	108

ÚVOD

V průběhu historie lidská společnost prošla několika dobami, které nesly svůj název po materiálech, které byl člověk schopný zpracovávat a používat. Lidé si tedy prošli dobou kamennou, bronzovou a železnou. Schopnost využívat nového materiálu přinesla vždy lidské společnosti velký užitek a posunula úroveň techniky o krok dopředu. [10]

Ani v současnosti tomu není jinak a bez nových materiálů by nebylo možné dělat takové pokroky v technice, medicíně nebo např. informatice. Názorně lze uvést příklad lékařských zařízení, sportovních potřeb a dopravních prostředků. Nové materiály tedy umožňují člověku dále posouvat hranice lidské společnosti a otevírají tak brány novým technickým možnostem. [10]

Dnes již rozsáhle používanými materiály jsou polymery a kompozity na jejich bázi. Tyto materiály jsou pravděpodobně i nejrychleji se rozvíjející skupinou, která se vyskytuje stále častěji téměř ve všech odvětvích. Polymerní materiály jsou využívány pro nejrůznější aplikace od obalů, přes výrobky pro domácnost, zdravotnické pomůcky, až ke konstrukčním prvkům především v automobilovém a leteckém průmyslu. Polymerní materiály však mají hranice definované především jejich tuhostí, pevností a tepelnou odolností. Pokud ale do polymerního materiálu přidáme výztuž ve formě vláken, která mají vysokou tuhost, pevnost a teplotní stabilitu, získáme tím zcela novou, unikátní skupinu materiálů. Tyto materiály vynikají kombinací mechanických vlastností výztuže se snadností zpracování polymerů při zachování nízké měrné hmotnosti. Tato skupina materiálů se nazývá vláknové polymerní kompozity či vláknové kompozity s polymerními matricemi. [10]

Kompozitní materiály jsou dnes již velmi využívanými materiály v konstrukci výrobků v řadě různých odvětví. Výborným příkladem použití kompozitních materiálů je konstrukce Boeingu 787, který je prvním velkým dopravním letadlem vyrobeným převážně z kompozitu s uhlíkovými vlákny. Kompozity zde tvoří až 50% váhy celého letadla a něco kolem 80% jeho objemu. Cena těchto materiálů je oproti kovovým sice mnohem vyšší, nicméně tento nedostatek je vyvážen nízkou hmotností a malými nároky na údržbu kompozitních dílů. Jsou to právě náklady na údržbu a palivo, které tvoří většinu z celkových nákladů takového letadla. Dalším velmi známým využitím kompozit je v konstrukci větrných turbín. Použití kompozitních materiálů je velmi rozsáhlé a díky jejich výborným vlastnostem, jako je jejich pevnost, tuhost, trvanlivost, odolnost vůči chemickým vlivům,

otěruvzdornost a nízká hmotnost, se stále rozšiřuje. Proto je nutné se také zabývat způsoby, jak tyto materiály co nejefektivněji obrábět. [16]

Právě obrábění kompozitních materiálů může způsobovat poměrně značné potíže. Tyto materiály totiž nejsou homogenní, ale skládají se alespoň ze dvou složek tak, aby celek získal lepší vlastnosti, než by tyto složky mohly dosáhnout samostatně. Jednou složkou je zde matrice a alespoň jednou složkou je výztuž. Problémy při obrábění konvenčními metodami nastávají s oběma složkami. Matrice, která je v mnoha případech polymerní, se může od příliš vysokého horka od nástroje roztavit, zatímco například uhlíková vlákna sloužící jako výztuž se namísto plynulého odřezávání vylamují. Jiné typy vláken se pak při řezu můžou například vytrhávat z matrice. Velké problémy při obrábění vznikají i v důsledku, že kompozity se skládají z několika vrstev, které spojuje matrice. Tyto vrstvy se pak při obrábění od sebe mohou oddělovat. Pokud se součást z kompozitních materiálů při obrábění poškodí, vzniklá finanční škoda může být hodně vysoká. [5, 9, 16]

Z těchto důvodů se velmi často přistupuje k obrábění těchto materiálů nekonvenčními způsoby obrábění. Nejčastěji se používají metody laserového nebo vodního paprsku, jejichž optimalizací pro proces obrábění kompozitních materiálů se zabývá tato diplomová práce.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 TEORIE NEKONVENČNÍCH METOD OBRÁBĚNÍ

Nekonvenční metody obrábění jsou založeny na využití fyzikálního nebo chemického principu úběru materiálu. Jedná se většinou o bezsilové působení na obráběný materiál, bez vzniku klasických třísek, které známe z obrábění řeznými nástroji. Podle principu úběru materiálu se fyzikální technologie obrábění dělí do následujících skupin: [3]

- a) obrábění mechanické:
 - obrábění ultrazvukem, kapalinovým paprskem a proudem brusiva,
- b) obrábění elektrochemické a chemické obrábění,
- c) elektrotepelné obrábění:
 - elektroerozivní obrábění, paprskem plazmy, laseru, technologie iontového a elektronového paprsku. [1]

U prvních tří skupin je obrobiteľnosť materiálu dána jeho:

- tepelnou vodivostí
- teplotou tání
- elektrickou vodivostí
- odolností proti elektrické erozi
- odolností proti chemické erozi
- vzájemnou vazbou atomů a molekul. [3]

U těchto metod obrábění nezávisí obrobiteľnosť materiálu na jeho mechanických vlastnostech (tj. na pevnosti, tvrdosti apod.) jako je tomu u klasického třískového obrábění a u čtvrté skupiny, tj. u uvedených mechanických procesů obrábění. Jednotlivé metody jsou popsány dále v této diplomové práci. [3]

Využití těchto metod je především pro materiály, které jsou běžnými mechanickými způsoby těžce obrobiteľné nebo jsou neobrobiteľné. Těžkosti vznikající při obrábění těchto materiálů vyplývají z jejich vysoké tvrdosti, křehkosti, žáruvzdornosti, nevhodných tepelných vlastností, chemické reaktivity s řezným nástrojem, nehomogenní mikrostruktury apod. [2]

Důvody stále rozšiřujícího zavádění fyzikálních technologií do průmyslu jsou: [1, 2, 3]

- Rostoucí podíl těžkoobrobitelných materiálů v konstrukci strojů (tj. žárovevných a žáruvzdorných ocelí, kalených ocelí a litin, keramických materiálů, slitinových kovů, titanových slitin, kompozitních slitin atd.),
- možnost komplexního opracování i značně nepravidelných tvarů (vnějších i vnitřních),
- nároky na tvarovou složitost a rozměrovou přesnost součástí (nástrojů, forem, zápusťek),
- miniaturizace, tj. výroba přesných miniaturních součástí (vyšetřovací sondy v medicíně, v řídicí a regulační technice),
- vhodnost uplatnění v automatizovaných provozech, využití systémů CAD, CAM.

Tato práce se zabývá optimalizací obrábění kompozitních materiálů pomocí laseru a vodního paprsku. Z toho důvodu bude v následujících kapitolách kladen větší důraz především na tyto dvě metody nekonvenčního obrábění. Ostatním metodám zde není věnována zvláštní pozornost.

Odlíšnosti v porovnání s klasickými technologiemi

- V místě oddělování částic materiálu nevzniká řezný odpor, řezná síla, obrobky se nedeformují vlivem mechanického zatížení. [6]
- Úběr materiálu nezávisí na mechanických vlastnostech materiálů, jako je třeba tvrdost, pevnost, houževnatost a klasický pojem obrobitelnost ztrácí svůj význam. [6]
- Úběr materiálu - oddělování částic je po čas jednoho cyklu (např. jeden impuls výboje při elektrojiskrovém opracování) a dochází k němu na velkém počtu lokalit současně. V závislosti na rozměrech odebíraných částic, může být úběr materiálu vyjádřen jedno, dvoj nebo trojrozměrnými hodnotami tj. délkou, plochou, průřezem nebo objemem. [6]
- Možnost opracovávání celého povrchu obrobku najednou. [5]
- Možnost mikroobrábění a dosahování až nano (10^{-6}) mm rozměrů. [5]

1.1 Mechanické procesy obrábění:

Ačkoli je pro konvenční způsoby obrábění charakteristické právě to, že jako primární zdroj energie na obrábění využívají energii mechanickou, řadí se zde také několik nekonvenčních způsobů opracování materiálu. Mezi tyto procesy patří obrábění: [1]

- ultrazvukem,
- abrazivním paprskem,
- vodním paprskem.

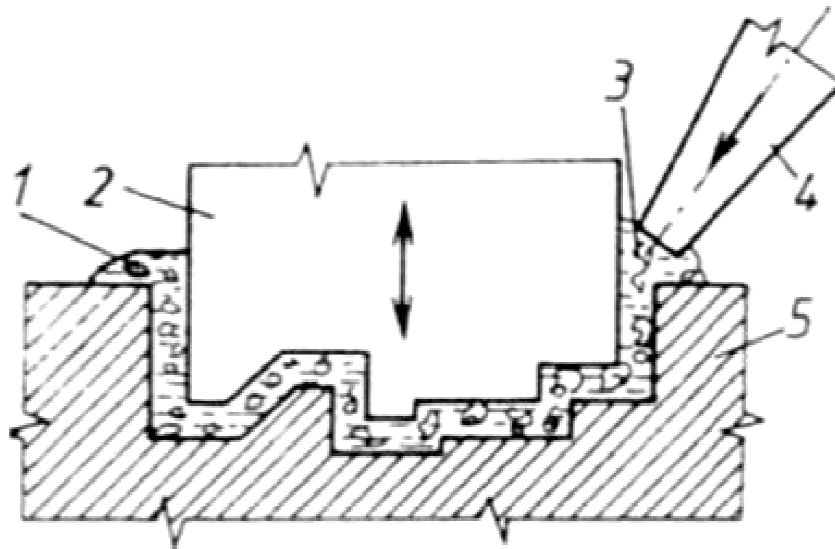
Při všech těchto třech způsobech obrábíme materiál přímým mechanickým účinkem volných brusných částí, které dopadají za určité kinetické energie na povrch materiálu. Vodní paprsek se mezi mechanické úběry materiálu řadí z toho důvodu, že úběr materiálu je způsoben erozí materiálu, ale k tomu je potřeba hydromechanická energie. [6]

1.1.1 Obrábění ultrazvukem (USM)

Obrábění ultrazvukem, jinak též USM (Ultra Sonic Machining), je řízené rozrušování materiálu obrobku účinkem pohybu zrn abrazivního materiálu a působením kavitační eroze. Je založeno na mechanickém úběru materiálu. [4]

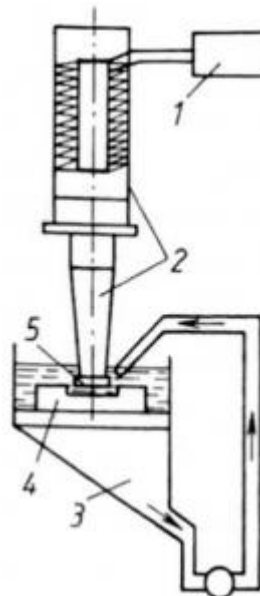
Princip metody

Zrna abrazivního materiálu jsou přiváděna mezi obráběný povrch a nástroj, který kmitá kolmo k obráběnému povrchu kmity o frekvenci 18 až 25 kHz. Zrna jsou nástrojem přitlačována řízenou stálou silou na obráběný povrch, čímž dochází k překopírování tvaru činné části nástroje do obrobku (Obr. 1). Nástroj může vykonávat ještě přímočarý posuvný pohyb nebo kombinaci obou pohybů. [4]



Obr. 1 - Princip metody pro obrábění ultrazvukem (1 – kapalina, 2 – nástroj, 3 – brousící zrna, 4 – přívod brousících zrn a kapaliny, 5 – obrobek). [4]

Zařízení pro obrábění materiálů ultrazvukem

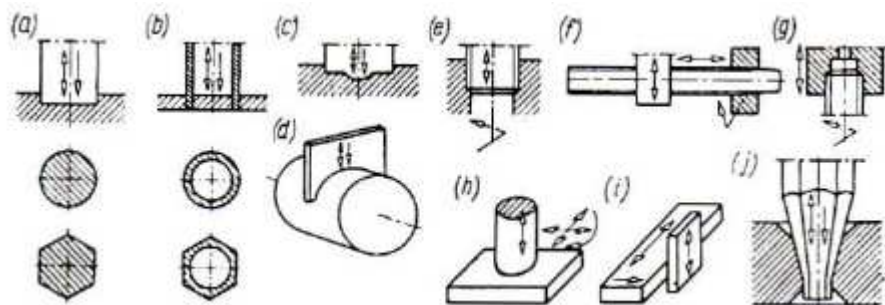


Obr. 2 - Zařízení pro obrábění ultrazvukem (1 – generátor ultrazvukových kmitů, 2 – systém pro vytvoření mechanických kmitů, 3 – přívod brousících zrn a kapaliny, 4 – obrobek, 5 – nástroj) [4]

Použití

Postupy USM se používají v celé řadě výrobních procesů. Doporučují se pro materiály s tvrdostí od 35 ÷ 40 HRC a víc, tehdy se dosahuje optimální produktivita procesu. Všeobecně se doporučuje pro opracování ploch do průřezu 1000 mm². [1]

Příklady použití ultrazvukového obrábění jsou vyobrazeny na Obr. 3.

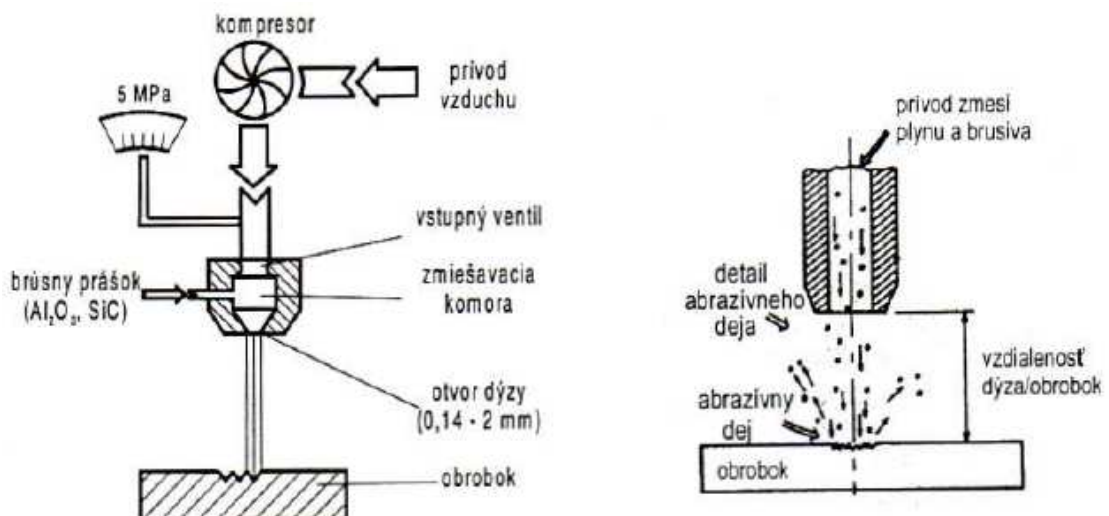


- a), b) výroba kruhových a tvarových otvorů; c) gravírování; d) dělení; e), f) řezání vnitřních závitů; g) řezání vnějších závitů; h), i), j) lapování a leštění rovinných, bočních ploch a otvorů.

Obr. 3 – Druhy ultrazvukového obrábění. [1]

1.1.2 Obrábění abrazivním paprskem (AJM – Abrasive Jet Machining)

Při této technologii se využívá k úběru materiálu abrazivních účinků brusiva unášeného proudem vzduchu o vysoké rychlosti. Základní princip a detail tohoto procesu lze vidět na Obr. 4. [9]



Obr. 4 - Princip opracování abrazivním paprskem a detail procesu AJM. [1]

1.1.3 Obrábění vodním (WJM) a abrazivním vodním paprskem (AWJM)

Technologie obrábění vodním paprskem se začala využívat od roku 1970. Původní využití bylo převážně na dělení dřeva, popř. plastů. [1]

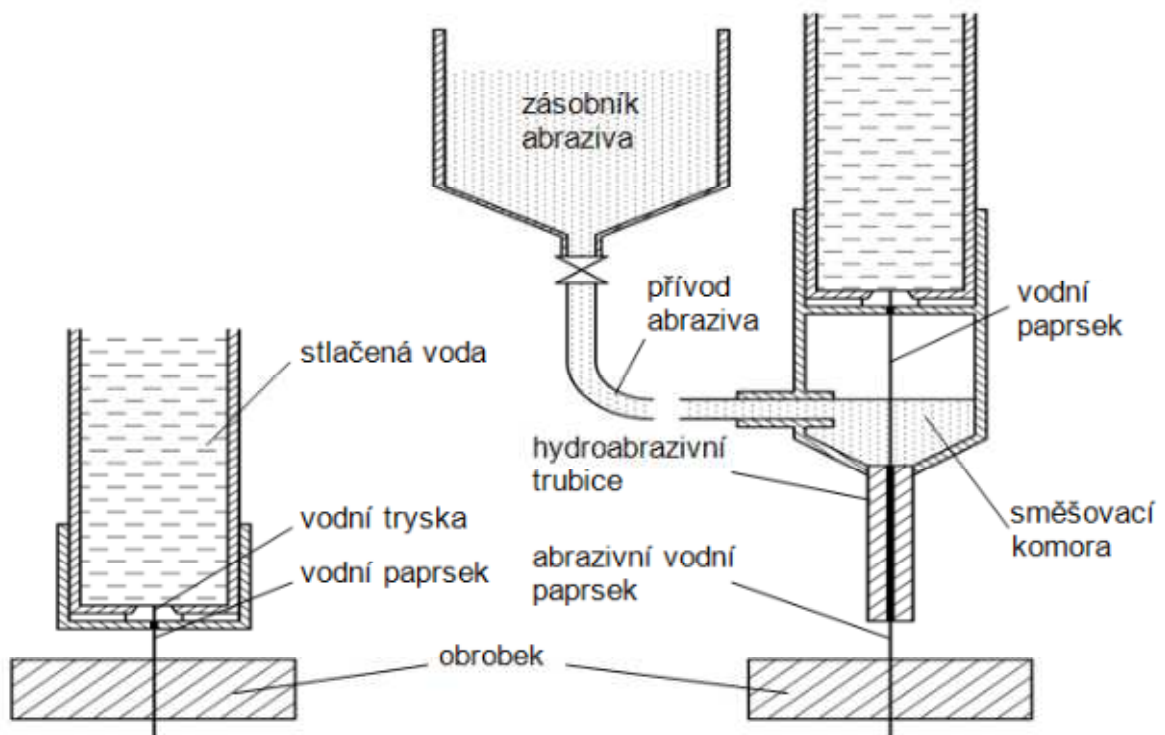
Tento technologický proces využívá úzký vysokotlaký a vysokorychlostní proud vody jako řezný nástroj. Přidáním jemného brusiva se značně zvyšuje výkon, s čímž se rozšiřuje také možnost využití vodního paprsku. [1]

Tuto technologii rozlišujeme do dvou skupin: [9]

- čistý vodní paprsek (WJM) – slouží převážně pro obrábění nekovových materiálů (např. lamináty, grafitové kompozity, sklotextil, gumotextil, atd.);
- vodní paprsek s abrazivní příměsí (AWJM) – využívaný k obrábění tvrdých a velmi tvrdých materiálů (titan, kobalt, sklo, atd.).

Zkratky AWJ a AWJM vznikly z anglických názvů Water Jet Machining a Abrasive Water-jet Machining.

Na obrázku (Obr. 5) lze vidět principiální rozdíly mezi technologiemi WJM a AWJM.



Obr. 5 - schéma WJM a AWJM [8]

Abrazivní vodní paprsek jako moderní technologie vhodná pro 21. století se vyznačuje mnoha přednostmi, z kterých nejdůležitější jsou: [1]

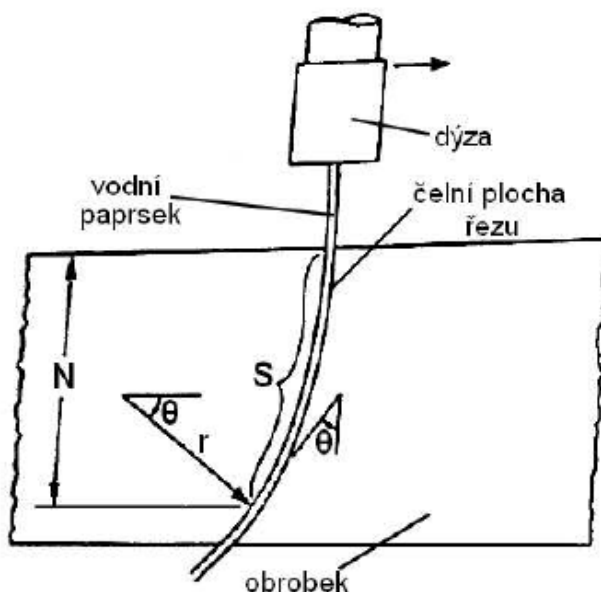
- vysoká rychlost řezu,
- schopnost řezat rovinné, ale i tvarově složité plochy v úzkých tolerancích,
- minimální tepelné ovlivnění povrchu,
- malé deformační napětí v opracovaném povrchu,
- možnost řezat v různých směrech bez ztráty účinnosti paprsku,
- možnost řídit dráhu paprsku počítačem.

Univerzálnost technologie AWJM nachází široké uplatnění nejen při vyřezávání tvarů, ale i při technologii obrábění jako soustružení, frézování, vrtání a řezání závitů. [1]

Princip

Řezání vodním paprskem spočívá v odebrání materiálu mechanickým účinkem dopadu úzkého vodního proudu s vysokou rychlostí a kinetickou energií na jednotku plochy. Abra- zivo jako přísada znásobuje mechanický účinek dopadu. [1]

Proud vody po průchodu přes mezeru dýzy s průměrem okolo 0,3 mm proniká do obrobku, postupně ztrácí svou kinetickou energii a vychyluje se. Obr. 6 ilustruje průběh dráhy vodního paprsku a jeho vychýlení. [1]



N – vzdálenost ve svislém směru, kterou projde paprsek za dobu t

r – poloměr zaoblení paprsku

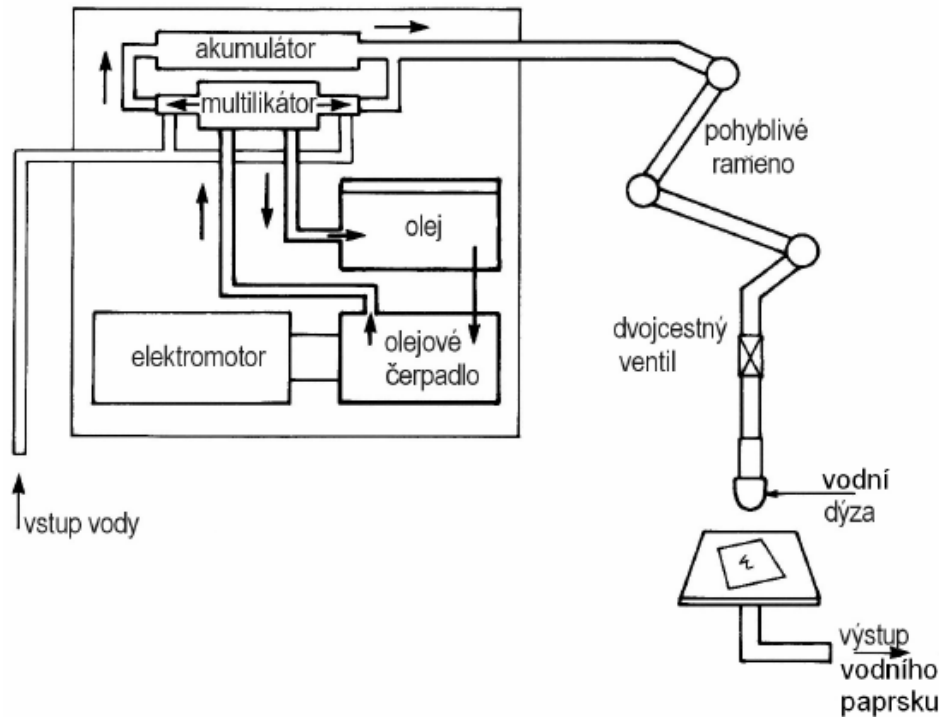
S – délka stopy paprsku podle čelní plochy řezu [m]

Θ - úhel vychýlení paprsku mezi skutečným a výchozím směrem paprsku

Obr. 6 - Schematické znázornění procesu řezání vodním proudem a dráhy proudu. [1]

Zařízení pro vodní paprsek

Hlavní prvky zařízení (viz. Obr. 7) jsou hydraulická jednotka, multiplikátor, akumulátor, filtry, potrubí na rozvod vody, dvojcestný propustný ventil, dýza, nádoba na zachytávání vody, přísady na úpravu vody. [1]



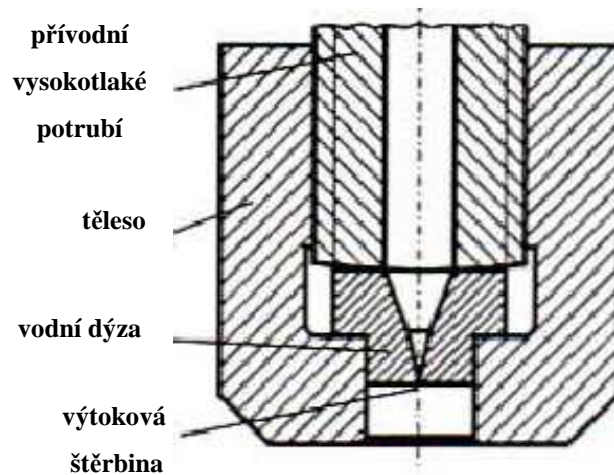
Obr. 7 - Hlavní komponenty zařízení pro obrábění vodním paprskem. [1]

Schéma zařízení je tvořeno dvěma okruhy. Primární okruh vytváří pomocí vysokotlakého olejového čerpadla a multiplikátoru tlak v druhém okruhu, ve kterém proudí voda. Primární hydraulický okruh tedy zajišťuje tlak v okruhu sekundárním. [2]

Multiplikátor – je používán ke zvýšení tlaku vody (obvyčejně na 380 MPa). Znásobení tlaku je závislé na poměru pracovních ploch obou vzájemně spojených pístů. [1, 2]

Akumulátor tlaku – vysokotlaká nádoba, která zde slouží pro tlumení rázů v kapalině, které jsou vyvolané multiplikátorem. Jeho hlavní úlohou je tedy udržovat stálý tlak a rychlost proudící vody. [1, 2]

Dýza – základní a nejdůležitější část zařízení, která nejvíce ovlivňuje kvalitu řezu. Část dýzy, ve které je úzká štěrbina s průměrem od 0,075 mm se vyrábí nejčastěji ze safíru nebo sliutého karbidu. Safírové části se dnes také nahrazují diamantem, který má až 10 krát vyšší pracovní životnost. Cena je ale také 7 až 10 krát vyšší oproti safírové nebo korundové dýze. Na Obr. 8 je příklad konstrukce dýzy. [1]

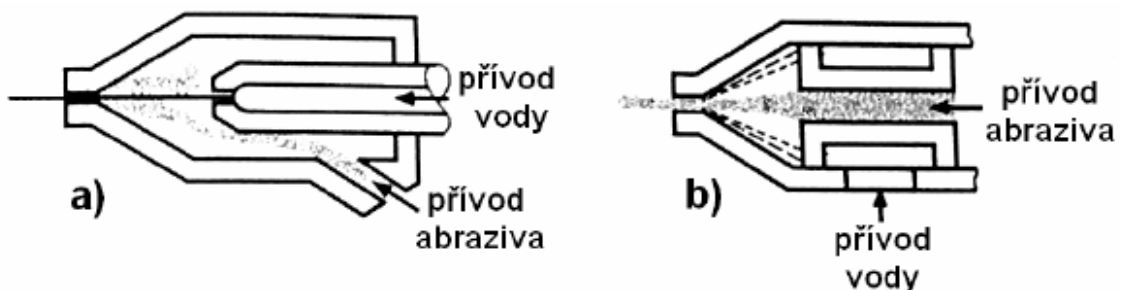


Obr. 8 - Příklad konstrukce dýzy pro čistý vodní paprsek [1]

Jak je již výše uvedeno, základní rozdíl mezi čistým vodním paprskem a abrazivním vodním paprskem je v přidání jemného brusiva do proudu vody přes různé systémy přívodních mechanismů, k čemuž jsou přizpůsobeny také konstrukční řešení jednotlivých dýz. [1]

Na Obr. 9 jsou vidět dva typy dýz pro abrazivní vodní paprsek. Konstrukce dýzy na Obr. 9a má výhodu, že je snadno vyrobitelná. Má radiální přívod brusiva a axiální přívod tlakové kapaliny. Druhá konstrukce dýzy (Obr. 9b) má naopak axiální přívod brusiva a radiální přívod tlakové kapaliny. Tento způsob přívodu brusiva zlepšuje jeho smíchávání s vodou a tím zmenšuje opotřebení obvodu dýzy. [1, 5, 8]

- a) dýza s jednoduchým vodním paprskem a radiálním přívodem brusiva
- b) dýza se směšovací paprskem a axiálním přívodem brusiva



Obr. 9 - Konstrukční řešení dýzy pro abrazivní vodní paprsek [5]

Podle konstrukce dýzy jsou rozlišovány i způsoby řezání vodním paprskem s příměsí brusiva. Používané jsou tyto tyhle základní technologie: [1]

- systém s přímým přívodem brusiva (AWJ abrasive waterjet), při kterém je brusivo vedené ze zásobníku do směšovací komory, ve které je vysokotlakým vodním paprskem strháváno a urychlováno. Tento systém používá vysokorychlostní vodní paprsek na smíchávání a následné tvoření abrazivního paprsku. Používané tlaky vody jsou 7 až 400 MPa.
- Systém s přímým vstřikováním brusiva (ASJ abrasive slurry jet), v tomto případě se do dýzy přivádí stlačená suspenze smíšená s vodou v tlakové nádobě. Používané tlaky jsou do 100 MPa.

Z kvalitativního porovnání obou systémů vyplývá, že ASJ systém má vyšší účinnost a vyšší hustotu narážejících částic oproti AWJ. Přitom však ASJ systém umožňuje použití užšího průměru paprsku a dýzu kompaktní konstrukce. [1]

Úprava vody

Je dalším velmi důležitým faktorem. Otvor dýzy musí být chráněn před různými příměsemi ve vodě, které mají tendenci se usazovat v štěrbině. Z toho důvodu je nejvýhodnější demineralizovaná a deionizovaná voda. [1]

Aditiva – používají se přísady různých polymerů s lineárními molekulami. Roztok vody s polymery typu PAA (polyakrylamid) nebo PEO (polyetyloxid) vytváří souvislý paprsek a ani po styku s materiálem se paprsek nerozbije. Ten je pak účinnější, energie koncentrovanější a paprsek si tak zachová kompaktní jádro (polymery zabraňují nadměrné turbulenci proudění). Úprava vody polymery se vyžaduje např. pro vytváření ostrých hran na nedělených dílech. [1]

1.2 Elektrotepelné procesy obrábění

Elektrotepelné nebo tepelné procesy využívají na úběr materiálu jako primární zdroj tepelnou energii, kterou poskytují vysokoenergetické paprsky elektronů, fotonů, iontů a plazmy. Do této skupiny patří: [1, 9]

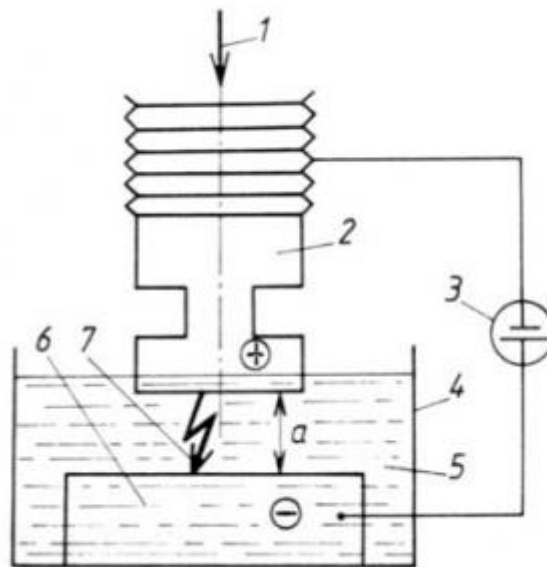
- elektroerozivní opracování (EDM),
- laserový paprsek (LBM),
- plazmový paprsek (PAM),
- elektronový paprsek (EBM),
- iontový paprsek (IBM).

Charakteristické pro tyto procesy je, že úběr materiálu se děje pomocí zvyšování vnitřní energie atomů v povrchu obrobku. Úběr materiálu je výsledkem reakce elementární částice energetického paprsku (atom, elektron, iont, atd.) na částici materiálu. [9]

alaserového paprsku, protože obráběním s jeho pomocí se zabývá tato práce i v praktické části.

1.2.1 Elektroerozivní obrábění (EDM)

Elektroeroze probíhá mezi dvěma elektrodami ponořenými do kapalného media. Tímto mediem je kapalina s vysokým elektrickým odporem – dielektrikum. Vlivem působení elektrického napěťového pole mezi elektrodami se uvádějí do pohybu volné záporné a kladné ionty, zrychlují se a nabývají vysoké rychlosti. Tím se vytvoří ionizovaný kanál. V tomto stavu začíná mezi elektrodami protékat el. proud a vzniká výboj, který vyvolá řadu dalších srážek částic. Vzniklé plasmové pásmo s teplotami 3000 – 12000 °C způsobuje tavení a odpařování materiálu na elektrodách. Odpařováním dielektrika vzniká plynová bublina s vysokým tlakem. V okamžiku přerušení proudu vyvolá pokles teploty implozní bubliny, do uzavřeného prostoru proniká dielektrikum a velké dynamické síly vymrštují roztavený materiál z kráteru. Chladícím účinkem dielektrika materiál tuhne a je jím odváděn ve formě drobných částek. Na povrchu elektrod vznikají drobné krátery. Objem erodovaného kovu závisí na časové a energetické charakteristice výboje a na termofyzikálních vlastnostech kovu. Za vhodných podmínek při opakovaných výbojích mezi dvěma elektrodami ponořenými v kapalném dielektriku je eroze (odebírání materiálu) na jedné z elektrod mnohonásobně intenzivnější než na druhé. Elektrické výboje vznikají jen v těch místech, kde jsou elektrody vzdálené méně než je průrazná vzdálenost dielektrika a tím dochází postupně k vytváření negativního tvaru nástrojové elektrody do protilehlé elektrody (obráběného materiálu) při malé erozi materiálu nástrojové elektrody. Vhodný mechanismus (zpětná vazba) udržuje elektrody v optimální vzdálenosti. [9]



Obr. 10 - Princip opracování abrazivním paprskem a detail procesu AJM. [3]

1.2.2 Laserový paprsek

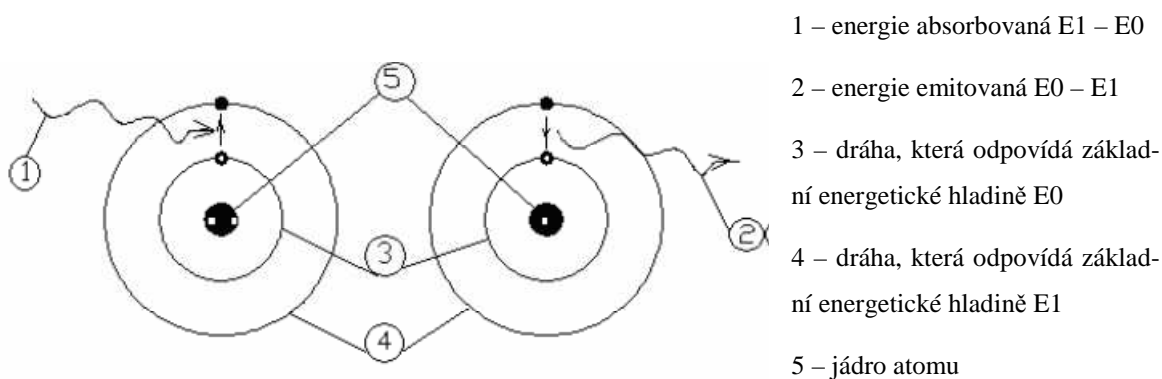
Obrábění laserem (z anglického Laser Beam Machining – LBM) patří k jednomu z mnohých průmyslových aplikací laserového paprsku. V současné době nachází laser široké uplatnění v různých oblastech. Nejznámější jsou: [1]

- průmyslové aplikace laseru jako je řezání, vrtání, sváření a tepelné opracování (kalení), povrchové natavení, legování, nanášení povlaků, tvarování, obrábění, příprava kovových soustav v amorfním stavu, tepelné zpracování povrchů. Laser je vhodný pro opracování materiálů jako jsou kompozity, plasty, keramika, sklo, diamant, těžko-obrobitelné oceli;
- nedestruktivní metody zkoušení;
- měřicí systémy v metrologii;
- CD přehrávače (kompakt disk);
- informační a telekomunikační technologie (přenos a uchování informací);
- medicína (laserový skalpel).

Princip

Princip funkce laseru lze objasnit na základě pojmů kvantové fyziky. LASER pochází z anglického názvu Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (v překladu – zesílení světla pomocí vybuzené emise záření). Vycházíme přitom ze zjednodušeného planetárního modelu atomu. Kolem kladně nabitého jádra (protonu) krouží po uzavřených drahách elektrony, které podléhají přitažlivým elektrostatickým silám. Přitom každé dráze přísluší přesně určené množství energie, zvané energetická hladina. Vzdálenější dráze elektronu přísluší větší množství energie, což je způsobeno nutností vykonat větší práci na překonání přitažlivé síly protonu. Čím je tato dráha elektronu bližší jádru, tím je jeho energie menší. Za normálních podmínek se nachází atom v kvantovém stavu s nejmenší energií (tzv. základním stavu). Elektron se může nacházet pouze na vymezených energetických hladinách. To znamená, že změny energie elektronu nemohou probíhat plynule, nýbrž po skocích odpovídajících drahám, na kterých se může elektron nacházet. Hmotné prostředí může záření buď pohlcovat (absorbovat), anebo také vysílat (emitovat). [5]

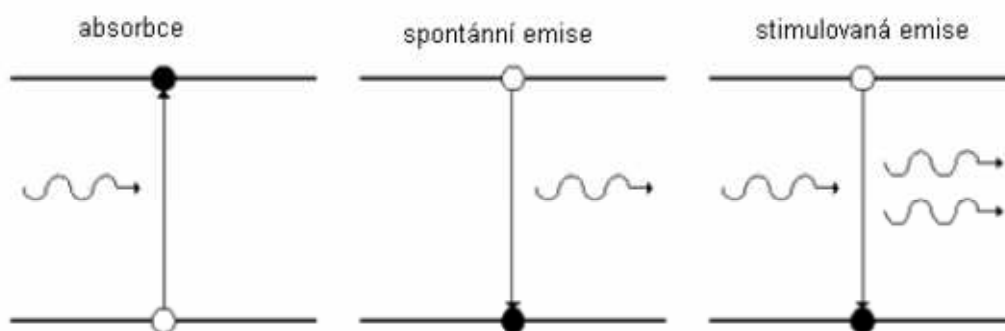
Přechod elektronu ze základní energetické hladiny E_0 na vyšší energetickou hladinu E_1 je doprovázen absorpcí a zpětný přechod z hladiny vyšší na hladinu nižší je naopak doprovázen emisí přesně určené hodnoty energie. [5]



Obr. 11 – Model atomu (absorpce, emise). [2]

Emise může být buď samovolná (spontánní), nebo vynucená (indukovaná či stimulovaná). Jak již bylo řečeno dříve, atom má určitou energii (je na určité energetické hladině) a částice přitom mění své energetické stavy (nabytím energie přecházejí do stavů vyšší energetické hladiny a naopak) a mohou v nich různě dlouho setrvávat. U spontánní emise dříve nebo později atom vyšší hladinu opustí a vyzáří elektromagnetické kvantum, ovšem učiní tak sám od sebe, spontánně, a proto hovoříme o spontánní emisi záření. U vynucené emise

dopadá na atom kvantum elektromagnetického záření. Zastihne-li ho na spodní energetické hladině, může být atomem pohlceno a atom přeskóčí na horní energetickou hladinu, hovoříme tak o již zmiňované absorpci. Setká-li se naopak záření s atomem na horní energetické hladině, může ho donutit vyžářit další kvantum energie (elektromagnetického záření) a přejít na spodní hladinu, hovoříme o indukované emisi, tedy o fyzikálním jevu, na kterém je založena činnost laserů. [5]



Obr. 12 - Absorpce, spontánní a stimulovaná emise. [2]

Laserové světlo tedy vzniká v prostředí určitého stimulujícího elektromagnetického záření potlačením spontánní emise na úkor vnitřní energie záření. Při spontánní (samovolné) emisi, která jak už bylo řečeno, vzniká, když vybuzené atomy s energetickou hladinou E_2 mají tendenci zaujmout hladinu s nižší energií E_1 a přitom emitují kvantum světelného záření s frekvencí f , která se určí z rovnice [5]:

$$E = h \cdot f = E_2 - E_1 \quad [5]$$

kde:

h – Planckova konstanta ($h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$)

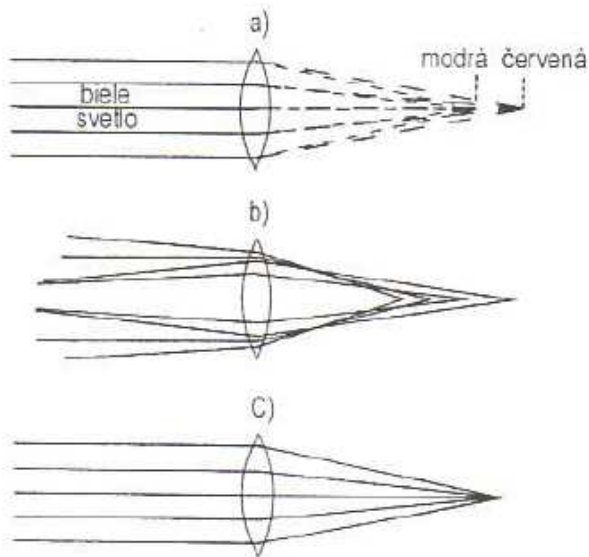
$E_2 - E_1$ – rozdíl energií hladin, mezi kterými nastal přechod.

Vlivem vnějšího podmětu se vybuzený atom vrací do základního stavu, přičemž emituje nový kvant se stejnou frekvencí, jako měl předcházející kvant. Tento způsob emise se nazývá stimulovaná (vynucená) emise záření, která zde už také byla popsána dříve. V závislosti na rozdílu těchto hladin vzniká infračervené, ultrafialové anebo viditelné světelné záření. [5]

Laserový paprsek a jeho vlastnosti

Laser je kvantovo-elektronický zesilovač a generátor světelných vln. Využívá tzv. stimulovanou emisi záření na produkci světelného paprsku, který má tyto základní vlastnosti: [1, 5, 9]

- je vysoko monochromatický – světlo v laserovém paprsku má prakticky je jednu vlnovou délku;
- má vysoký stupeň prostorové a časové koherence, v prostorovo-koherenčním prostoru kmitají všechny částice světelné vlny se stejnou fází v rovině kolmé na směr šíření paprsku, v časově koherenčním paprsku kmitají se stejnou fází všechny částice světelné vlny ve směru šíření se paprsku (Obr. 13);



- Když je fokusované bílé světlo, každá barva má jinou ohniskovou vzdálenost od čočky.
- Když je fokusované neparalelní světlo ohnisková vzdálenost závisí od úhlu dopadu částic původního paprsku.
- Laserové světlo je monochromatické a rovnoběžné, proto ho je možné soustředit do intenzivního úzkého bodového svazku.

Obr. 13 – Porovnání fokusování bílého a laserového světla. [2]

- má minimální divergenci (rozbíhavost), charakterizovanou poloviční hodnotou vrcholového úhlu kuželu, který vystupuje z rovinného okénka laseru s průměrem $2r_0$. Záření se v prostoru nešíří všemi směry, ale v úzkém svazku a fokusací na malou plochu;
- má vysokou výstupní intenzitu I [$\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$], která není limitovaná zákony záření absolutně černého tělesa.
- má módovou strukturu (TEM – „transverse electromagnetic mode“) – v průřezu paprsek vytváří buď jenom jednoduchou stopu – základní mód – nebo složitější obrazce pravouhlo nebo kruhovo symetrické. To je dané tím, že uvnitř laserového rezonátoru získává elektromagnetické pole generované stimulovanou emisi záření ur-

čítou konfiguraci – mód – v závislosti na okrajových podmínkách rezonátoru. Největší hustoty energie při dané výstupní energii laseru je možné dosáhnout lasery pracujícími v základním módu označovaném TEM₀₀ (index charakterizuje symetrii elektromagnetického pole v rovině kolmé na směr šíření paprsku). Mód laseru určuje jeho vhodnost pro průmyslové použití, jako například pro řezání, svařování apod.[1,5]

Uvedené vlastnosti umožňují laserový paprsek, za pomoci vhodné optické soustavy, fokusovat do malého bodu. V místě dopadu se soustředí mimořádně vysoké množství energie, což má za následek natavení až odpaření materiálu. V tabulce 1 jsou pro porovnání uvedeny hodnoty toku energie (hustoty výkonu), které lze dosáhnout různými zdroji energie. [1,5]

Tab. 1 - Hustoty výkonů různých energetických zdrojů [1].

Zdroj energie	Dosahovaná hustota výkonu [W.cm ⁻²]
Slunce (čočka f = 50 mm)	5.10 ²
Elektrický oblouk	1.10 ⁵
Acetylén-kyslíkový plamen	1.10 ⁴
Plazmový paprsek	1.10 ⁵
Elektronový paprsek	4.10 ⁸
CO ₂ laser cw	1.10 ⁹
Nd laser pw	1.10 ¹⁴

Průměr nesfokusovaného paprsku bývá řádově několik milimetrů. Není vhodný pro aplikace, kde se vyžaduje malá tepelně ovlivněná oblast, jako jsou technologie řezání a svaření, protože je potřebné soustředit laserový paprsek do úzkého svazku. Vhodně sfokusovaný paprsek pro řezání CO₂ laserem s výkonem do 1 kW má průměr okolo 0,3 mm a může dosahovat hustotu energie okolo 1,4.10¹⁰ W/mm² (1,4 MW/cm²).[1]

Průměr sfokusovaného paprsku se měří a vypočítává v místě, kde intenzita záření je (1/e²) násobkem jeho osové intenzity za předpokladu, že paprsek má Gaussovo rozložení v základním módu. Poloměr r_f paprsku v ohnisku a vzdálenost d_m tohoto bodu od čočky jsou dané: [1]

$$d_m = f + \frac{(d_1 - f)^2}{\left[(d_1 - f)^2 + f_H^2 \right]^{\frac{1}{2}}}$$

$$r_f = f + \frac{f \cdot r_0}{\left[(d_1 - f)^2 + f_H^2 \right]^{\frac{1}{2}}}$$

Pro multimódový paprsek je poloměr sfokusovaného paprsku daný vztahem:

$$r_f = f \cdot \Theta$$

kde: Θ je úhel divergence paprsku v radiánech.

Druhy laserů

Lasery mohou být klasifikovány podle různých hledisek, např. podle: [3]

a) aktivního prostředí (je nejpoužívanější):

- submilimetrové,
- pevnolátkové,
- polovodičové,
- plynové,
- kapalinové,
- plazmatické;

b) vlnových délek optického záření, které vysílají:

- infračervené záření (IR) $f < f_{opt}$,
- optozáření, světelné záření $f \sim f_{opt}$,
- ultrafialové záření (UV) $f > f_{opt}$,
- rentgenové a gama záření $f \gg f_{opt}$;

c) režimu paprsku:

- kontinuální (continuous wave – CW),
- pulsní (pulsed wave – PW),
- Q režim (switched – Q_s);

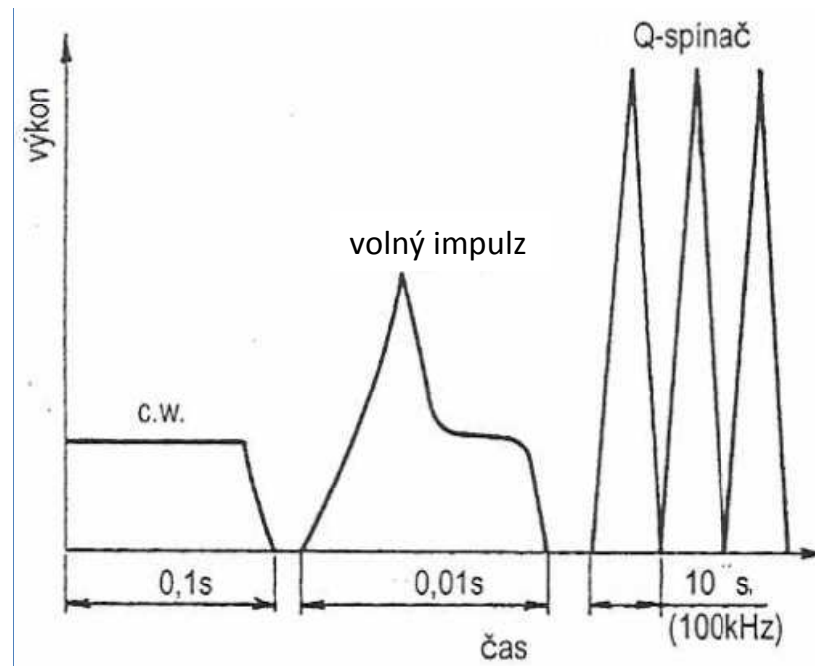
d) typu buzení:

- opticky (výbojkou, jiným laserem, slunečním světlem a radioaktivním zářením),
- elektricky (srážkami v elektrickém výboji, svazkem nabitých částic, injektáží elektronů, interakcí elektromagnetického pole se shluky nabitých částic),

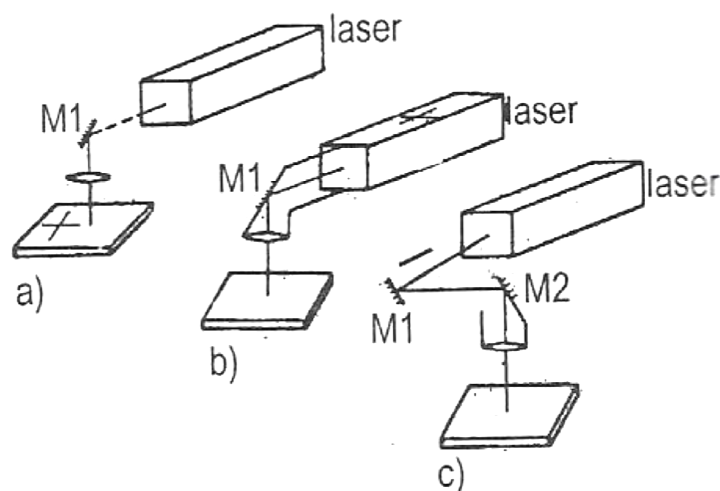
- chemicky (energií chemické vazby, fotochemickou disociací, výměnou energie mezi molekulami a atomy),
 - tepelnými (zahřáním a ochlazením plynu),
 - jadernou energií (reaktorem, jaderným výbuchem);
- e) dosahovaného výkonu:
- nízkovýkonné – desetiny až stovky Wattů (pro řezání a vrtání keramiky, rubínů, plastických hmot),
 - vysokovýkonné – 1 až 30 kW (sváření, tepelné zpracování, atd.);
- f) konstrukce zařízení: (viz Obr. 15)
- systém pevného laseru a pohyblivého stolu, na kterém je upnutý obrobek,
 - pohyblivý laserový systém a nepohyblivý obrobek,
 - systém pohyblivého paprsku, který je zabezpečen zrcadly;
- g) použití:
- výzkumné,
 - měřicí,
 - lékařské,
 - technologické,
 - energetické,
 - vojenské.

Hlavní druhy laseru používané pro tepelné aplikace v strojařském průmyslu jsou pevné lasery na bázi rubínu, Nd – YAG, Nd – sklo, alexandrit, dále plynové lasery CO₂, He-Ne, argonový, excimerový (ten se dostává do popředí pro keramiku a kompozitní materiály) a částečně kapalinový laser. [1]

Na Obr. 14 je znázorněna závislost časových režimů laseru. Pulzní režim vzniká přerušováním budícího elektrického výboje v dutině laseru. Q režim je výsledkem zvyšování činitele jakosti optického rezonátoru při kontinuálním čerpání energie do dutiny laseru. Špičkové výkony laseru v kontinuálním režimu jsou řádově $10^4 \div 10^5$ W, v pulzním režimu $10^{12} \div 10^{13}$ W. Při Q_S režimu se dosahuje nejvyšší hustoty výkonů paprsku. [1, 9]



Obr. 14 - Druhy režimu laserového paprsku. [2, 5]

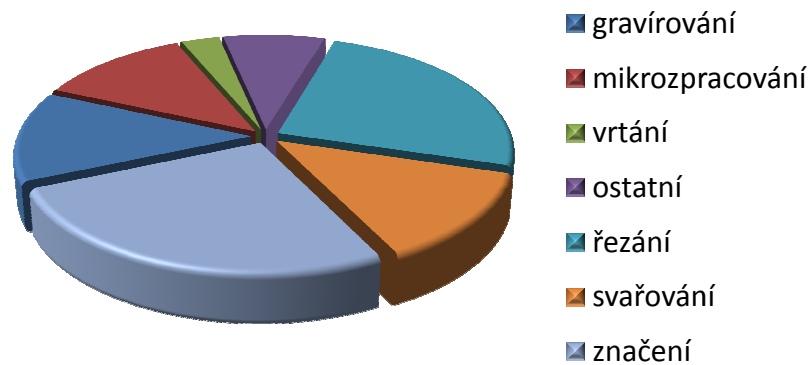


Obr. 15 - Základní typy konstrukčního řešení. [2, 5]

V současnosti jsou vyvinuté systémy plynulého řízení pohybu paprsku pomocí CNC systémů a také laserová hlavice může být součástí chapadla robotů, které zabezpečí pohyb paprsku v 5-ti osách. Paprsek laseru je možné také přenášet pomocí optických vláken. [1]

Použití laseru

Oblasti použití laseru jsou široké a zasahují do mnohých oblastí. Procentuelní rozdělení použití laseru pro jednotlivé technologie je vidět na Obr. 16.



Obr. 16 - Procento rozdělení jednotlivých technologií. [3]

V oblasti použití laseru je zaužívaná čtyřstupňová klasifikace: [1,5]

- *úběr materiálu* – do této oblasti spadá řezání, vrtání, mikroobrábění a čištění pomocí laseru, protože při procesech dochází k úběru materiálu. Mikroobrábění zahrnuje v sobě technologie jako přistřihování, ořezávání, značkování, gravírování a rytí. Čištění je odstraňování tenké povrchové vrstvy kontaminované oleji a plyny;
- *spojování a zpevňování* - zahrnuje sváření, pájení, povlakování a tvrdé pájení;
- *tepelné zpracování* – povrchu jako kalení, žíhání, povrchové legování, rekrytalizace polovodičových krystalů po iontové implantaci a taky povlakování metodami CVD (chemical vapor deposition – chemické nanášení povlaků z plynné fáze) a PVD (physical vapor deposition – nanášení povlaků ve vakuu) pomocí laserového zdroje ohřevu.
- *nové procesy* – byly nedávno vyvinuté na základě požadavku průmyslu jako růst safírových krystalů, tahání optických vláken, barvení, dělení skla a keramiky kontrolovaným lomem.

Hodnocení kvality povrchu po obrábění laserovým paprskem

Podobně jako při klasickém řezání nástrojem s určitou geometrií řezné hrany, při posuzování kvality řezání/dělení a vrtání laserem, je potřebné brát do úvahy spektrum vlivů, které jsou rozděleny do těchto skupin: [1]

- I) parametry procesu,
- II) parametry materiálu produktu,
- III) kvalita řezu.

Parametry procesu řezání laserem zahrnují: [1]

- výkon paprsku,
- rychlost posuvu paprsku (řezná rychlost),
- šířku vytvořeného zářezu,
- druh paprsku a jeho mód,
- ohniskovou vzdálenost,
- průměr fokusovaného paprsku,
- úhel vychýlení paprsku α , který je důsledkem přechodu paprsku materiálem, paprsek se odchyluje od původního směru ($\alpha = 75 \div 80^\circ$),
- přídatný plyn (druh plynu, tlak plynu).

Parametry materiálu a komplexnost vytvořeného profilu jsou charakterizované: [1]

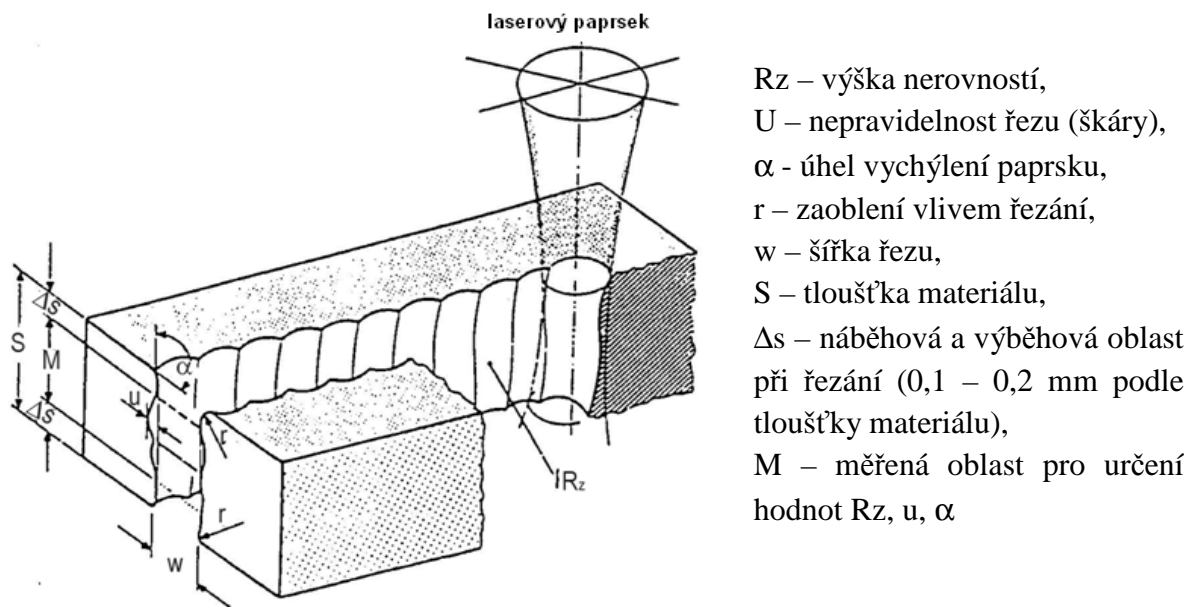
- fyzikálno-chemickými vlastnostmi materiálu,
- typem materiálu (plech, sklo, keramika, kompozit, atd.),
- termofyzikálními vlastnostmi (tepelná vodivost, viskozita taveniny, povrchové napětí, absorpce, reflektivita),
- geometrií obrobku.

Při sledování samotné kvality řezu je potřebné brát do úvahy parametry zóny řezání laserem, které zároveň mohou sloužit jako kritéria pro hodnocení laserem řezaného povrchu:

[1]

- šířka řezu,
- zaoblení hrany vlivem řezání,
- nepravidelnost hrany,
- šířka tepelně ovlivněné vrstvy (poškozené vrstvy),
- kuželovitost řezaného otvoru (rozdíl mezi šířkou vstupu a výstupu paprsku),
- tvoření trhlin,
- úbytek materiálu,
- šířka kráteru,
- vychýlení paprsku,
- změna struktury povrchu materiálu,
- zpevnění,
- zvýšení napětí.

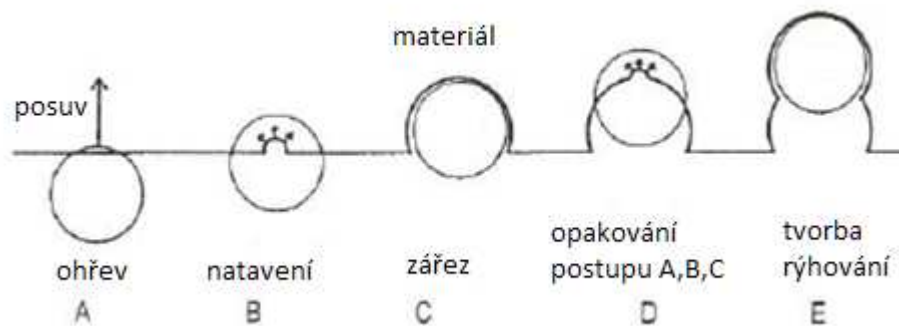
Na Obr. 17 lze vidět zónu po řezání laserem a doporučené veličiny používané pro kvantitativní hodnocení kvality řezu. Při hodnocení kvality řezu a optimalizaci laserového řezání je spektrum výše uvedených kritérií velmi široké. Nicméně většina literárních zdrojů se soustřeďuje při hodnocení na jeden až dva parametry, jako jsou výkon paprsku a rychlost posuvu, a také na jeden nebo dva parametry kvality řezu - obvyčejně HAZ (hloubka tepelně ovlivněné vrstvy) a šířku řezu.



Obr. 17 - Kritéria pro hodnocení povrchu po řezání laserem. [1]

Kvalita řezu bývá tedy zpravidla určena třemi základními parametry, a to řeznou rychlostí, která by měla být co nejvyšší, šířkou zářezu (škáry, která by měla být co nejužší), a nakonec kvalitou povrchu, která je určena parametry drsnosti Ra dle STN a ISO a Rz podle DIN.

Rýhování ve stopě řezu vzniká jako výsledek cyklické povahy energetického paprsku při interakci s materiálem v důsledku oscilace proudění taveniny. Vznik tohoto rýhování je schematicky znázorněn na Obr. 18. [1]



Obr. 18 - Model tvoření rýh v zóně tavného řezání laserem. [1]

Řezání a dělení materiálů laserem (LM – Laser Machining)

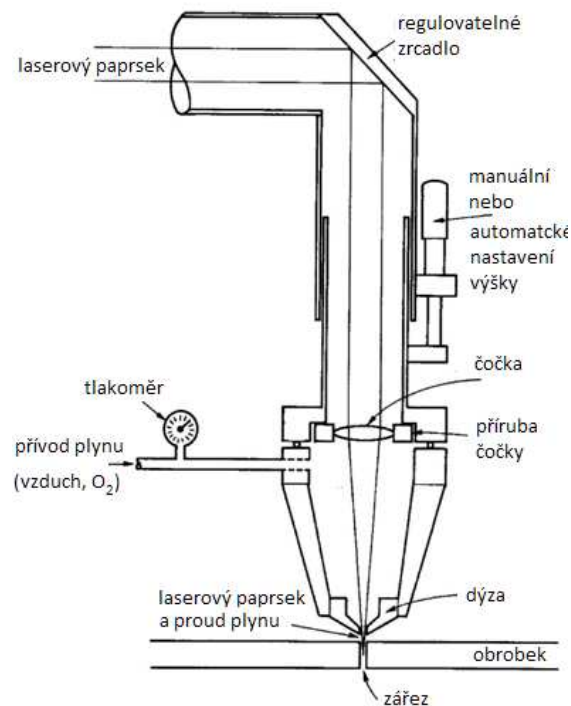
Laser je možné považovat za universální nástroj pro technologii řezání (tepelné dělení materiálů), vhodný pro sériovou a malosériovou výrobu, pro dodávky JIT (Just in Time) a také pro výrobu v dávkách. Řezání a gravírování patří mezi nejvíce používané procesy laserového obrábění (viz. Obr. 16). [1]

Na řezání se nejčastěji používají CO₂ lasery, a to většinou v kontinuálním režimu.

Mechanismus úběru materiálu při řezání laserem: [1]

- erozivní účinek vysokoenergetických částic fotonů na povrch materiálu,
- lokální natavení povrchu,
- odstranění taveniny odpařením nebo pomocí přídavného stlačeného plynu, který tlakem odstraňuje (doslova vyfukuje) natavené částice materiálu ze zóny řezání.

Laser pro řezání je vybaven řezací hlavicí (Obr. 19), která chrání optiku před poškozením a zároveň přivádí pomocný nebo ochranný plyn do zóny řezu. Volba přídavného plynu je závislá od materiálu obrobku. Pro kovy se používá kyslík. Vzduch a inertní plyny se používají pro nekovy a plasty (PMMA, PP). Kromě plynů a kyslíku se používá také dusík, a to hlavně při řezání nekovových materiálů (PVC, textil apod.). Dusík chrání řezné plochy před spálením a vznícením. [1, 5]



Obr. 19 - Schéma laserové řezací hlavy. [1]

Protože se tato práce zabývá optimalizací obrábění kompozitních materiálů, tak i popis procesu řezání laserem je zaměřen na tyto materiály.

Řezání nekovových materiálů:

Řezný proces nekovových materiálů (keramika, plasty a kompozitní materiály) zahrnuje tři dominantní mechanismy: [1]

- dělení tavením a následným stříhem je velmi rychlý způsob řezání s vysokou kvalitou řezu a je typický pro termoplasty (PP, PS, PE) a pro keramické materiály;
- odpařováním, natavením a následným odpařením materiálu v zóně řezu vzniká vysoce kvalitní řezná škára, plocha řezu je jakoby leštěná, při řezání vlivem vysoké teploty (nad teplotou tavení) dochází ke změně fáze materiálu z pevné na kapalnou a následně na páru. Mechanismus řezání je typický pro plexisklo, polyacetát, acryl;
- chemická degradace, vzniká vlivem vysoké teploty a nesourodosti složení materiálu. Některé fáze materiálu zaznamenávají chemické změny. Laserová energie láme chemické vazby a integritu materiálu. Hrany po řezu jsou rovné a povrch řezu je hladký, ale je pokrytý jemnou vrstvou zbylého uhlíkového prachu. Tento mechanismus je typický pro řezání produktů na bázi dřeva, kompozitních materiálů, ale i některých plastů, jako PVC, PUR.

Při řezání kompozitních materiálů laserem se doporučuje zvolit výkon laseru s ohledem na vlastnosti použitých vláken, nikoli vlastnosti matrice. Vysoký výkon potřebný pro řezání vláken chemicky degraduje hlavně polymerní matrice. [1]

Laserový paprsek způsobuje poškození kompozitních materiálů tavením matrice, tepelnou roztažností uhlíkových vláken, vznikem kráterů na povrchu řezné škáry, delaminací vláken a jejich lomem. Po řezu vzniká rýhovaný povrch. [1]

Nejvíce doporučované lasery pro dělení kompozitních materiálů jsou Nd-YAG lasery a excimerové lasery. Ty oproti CO₂ laseru méně tepelně ovlivňují povrch řezané části.

1.2.2.1 Laser-Microjet

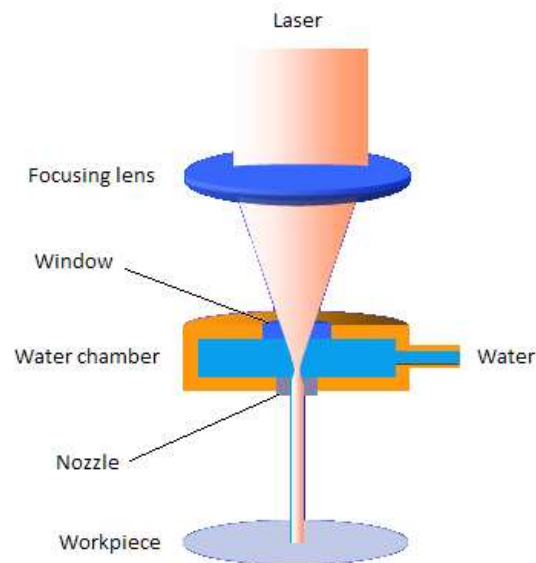
Zvláštním typem laseru je vodním paprskem vedený laser, který vyvinula Švýcarská společnost Synova. Výsledkem kombinace laseru a vodního paprsku vzniklo zařízení, které umožňuje velmi úzký, nerozbíhavý řez bez otřepů, podřezávání materiálu či tepelného ovlivnění obráběného materiálu. [21]

Princip

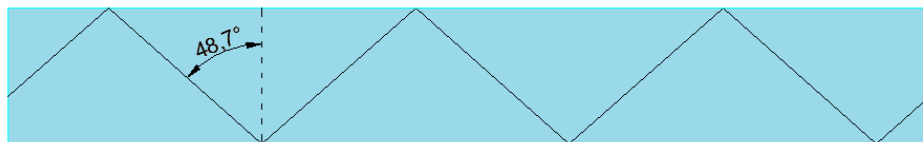
Vysokotlaká voda je tlačena přes trysku, čímž je vytvářen úzký vodní paprsek (50, 75, 100 μm). Laserový paprsek je fokusovaný skrz vodní komoru do trysky. Po opuštění trysky je paprsek laseru vedený vevnitř vodního paprsku pomocí téměř absolutního odrazu na rozhraní voda-vzduch. Na rozhraní voda-vzduch dopadá paprsek laseru pod přesným úhlem 48,7° a je veden podél paprsku vody až na povrchu obrobku. Laserový puls je absorbován materiálem a jeho energie roztaví nebo vypaří část materiálu. Voda dopadající na totéž místo materiál okamžitě chladí a odplavuje natavený materiál. [21]

Vodní paprsek zde tedy neslouží k samotnému obrábění, ale jeho funkce zde jsou: [21]

- vedení laserového paprsku,
- chlazení obrobku během laserového řezání,
- odplavení nataveného materiálu.

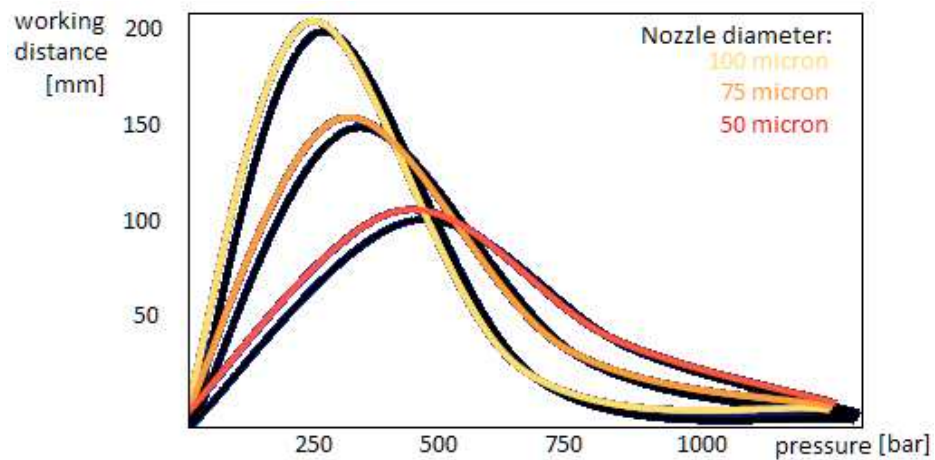


Obr. 20 - Princip Laser-Microjet. [21]



Obr. 21 - Odraz laseru v paprsku vody. [21]

Velkou výhodou je zde pracovní vzdálenost, která je oproti klasickým laserům mnohem vyšší a odpovídá délce vodního paprsku, na které je paprsek souvislý. Po určité vzdálenosti se začne rozpadat do jednotlivých kapek. Tato vzdálenost je závislá na průměru trysky (viz Obr. 22). [21]



Obr. 22 - Závislost tlaku vody na pracovní vzdálenosti Laser-Microjet. [21]

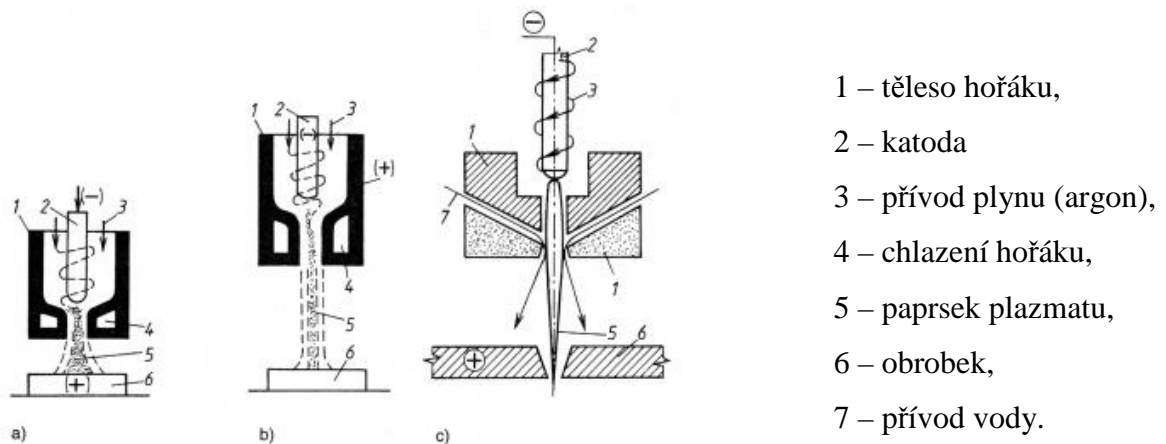
Aby nedocházelo k absorpci laserového paprsku vodou, je nutné používat lasery o vlnové délce mezi 200 nm a 1 100 nm. Nejvýkonnější z toho je laser Nd:YAG na základní frekvenci (s vlnovou délkou 1064nm). Dále se používá frekvenčně zdvojnásobený (532 nm) a ztrojnásobený Nd:YAG (355 nm). [21]

Shrnutí výhod oproti konvenčním laserům jsou: [21]

- žádné tepelné ovlivnění materiálu,
- žádné otřepy,
- žádná pevná pracovní vzdálenost,
- není potřeba řezného plynu,
- nižší množství škodlivých látek uvolněných do ovzduší,
- rovnoběžný a přímý řez,
- rychlejší řez,
- nižší síly působící na materiál (síla působící od vodního paprsku je mnohem nižší než síla od řezného plynu),
- vícevrstvý materiál nezpůsobuje při řezu problémy.

1.2.3 Plazmový paprsek

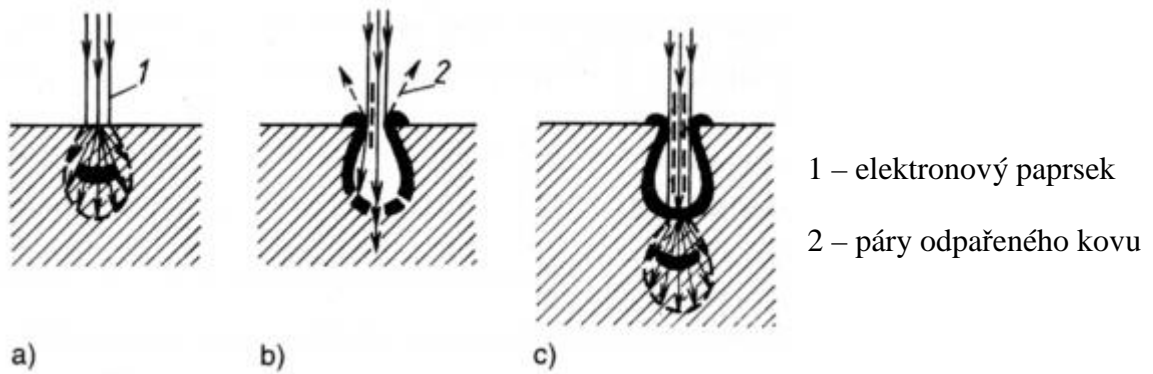
Základem obrábění plazmatem je ohřev nebo tavení materiálu za extrémně vysokých teplot (nad 1 000 °C), které vznikají rozkladem molekul plynu při jejich průchodu elektrickým obloukem. Oblouk hoří mezi netavící se katodou vyrobenou z wolframu a anodou, která je tvořena opracovávaným materiálem nebo tělesem hořáku. [3]



Obr. 23 - Plazmové hořáky s plynovou stabilizací. a) s transferovým obloukem, b) s plynovou stabilizací s netransferovým obloukem, c) s vodní stabilizací [3]

1.2.4 Elektronový paprsek

Obrábění elektronovým paprskem je založeno na využití kinetické energie proudu urychlených elektronů. Základní princip je zobrazen na Obr. 24.

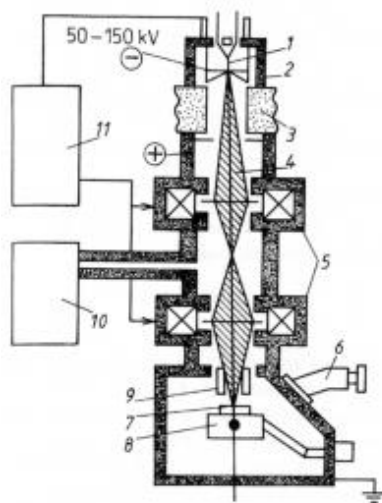


a) vnik elektronů do materiálu, b) erupční odpařování materiálu, c) opětový vnik elektronů do materiálu

Obr. 24 - Princip metody obrábění elektronovým paprskem. [3]

Princip

V místě dopadu paprsku elektronů se jejich kinetická energie mění v energii tepelnou. Materiál obrobku se taví a následně odpařuje. Paprsek vniká do materiálu do určité hloubky, kde se pohyb elektronů zastaví. Vzniklá tepelná energie koncentrovaná pod povrchem způsobuje erupční odpařování materiálu. Částičky vypařujícího se materiálu se pohybují značnou rychlostí z otvoru. Vzniklé páry odpařeného materiálu jsou zionizovány a způsobí nové zaostření paprsku v pracovním místě. Opakováním tohoto procesu dojde k úběru materiálu. [3]



- 1 – wolframový drát,
- 2 – elektronové dělo,
- 3 – izolátor,
- 4 – elektronový paprsek,
- 5 – elektromagnetické čočky,
- 6 – průzor,
- 7 – obrobek,
- 8 – pracovní stůl,
- 9 – elektrostatické vychylování elektronového paprsku,
- 10 – vývěvy,
- 11 – napájecí zdroj.

Obr. 25 - Schéma zařízení pro obrábění paprskem elektronů. [3]

1.2.5 Iontový paprsek

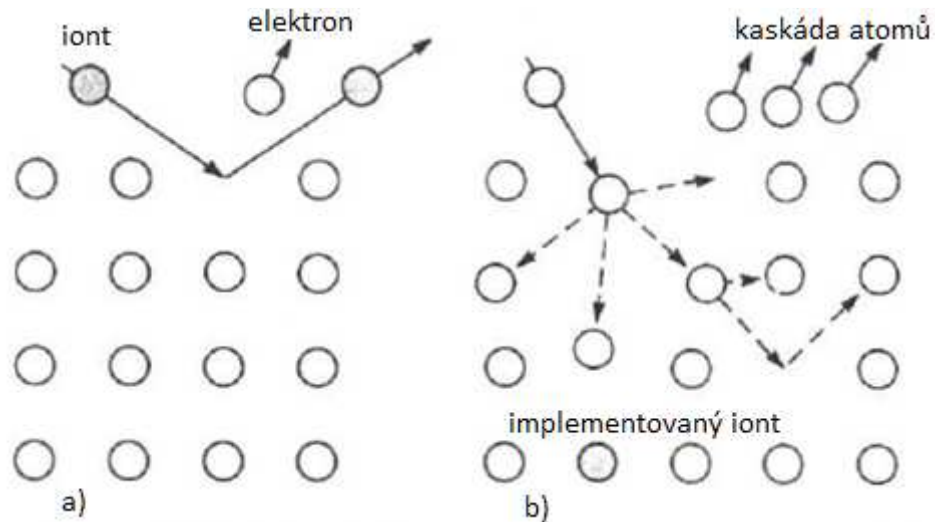
Technologie iontového paprsku probíhá ve vakuu, kde nabité atomy (ionty) ze zdroje iontů odstřelují (bombardují) povrch obrobku pomocí urychlovacího napětí. Tento proces pracuje podobně jako proces opracování svazkem elektronů, ale mechanismus úběru materiálu je celkem jiný. [1]

Princip

Iontový paprsek je svazkem vysoce energetických iontů inertního plynu jako argon, krypton, xenon, které mohou být lehko urychlovány a řízené elektrickým polem. [1]

Proces opracování iontovým paprskem je založený na vyražení atomů z povrchu obrobku pomocí elektroelastické kolize (srážkou a odražením), ke které dochází při dopadu iontů na povrch cíle. To je nazýváno iontové rozprašování. [1]

Průměr argonových iontů je asi 0,1 nm a vzdálenost mezi atomy v mřížce kovů je okolo 0,3 nm. Následkem toho dopadající ionty často kolidují s atomy povrchu a vyrážejí nebo je rozprašují do okolí. Některé ionty s menší energií se odráží z povrchu do okolí, přičemž mohou vyrazit atomy z povrchu. Ionty s vyšší energií zůstávají v mřížce materiálu jako implantované ionty (viz Obr. 26). [1]



a) iont s nízkou energií b) iont s vysokou energií

Obr. 26 - Účinek dopadu iontů na povrch cíle. [1]

1.3 Elektrochemické a chemické procesy obrábění

Využívají chemické a elektrochemické reakce v plynném nebo kapalném prostředí na odstranění částic (atomů nebo molekul) materiálu a vytvoření požadovaného tvaru dílce. [2]

Ačkoliv jsou uváděny společně, tvoří dvě větší skupiny procesů: [2]

- 1) chemické procesy – primárním zdrojem energie je chemický děj rozpouštění materiálu;
- 2) elektrické/elektrochemické procesy – primárním zdrojem energie je zde elektrická energie a její působení na kapalinový vodič – elektrolyt. Tyto procesy využívají k úběru elektrolýzu.

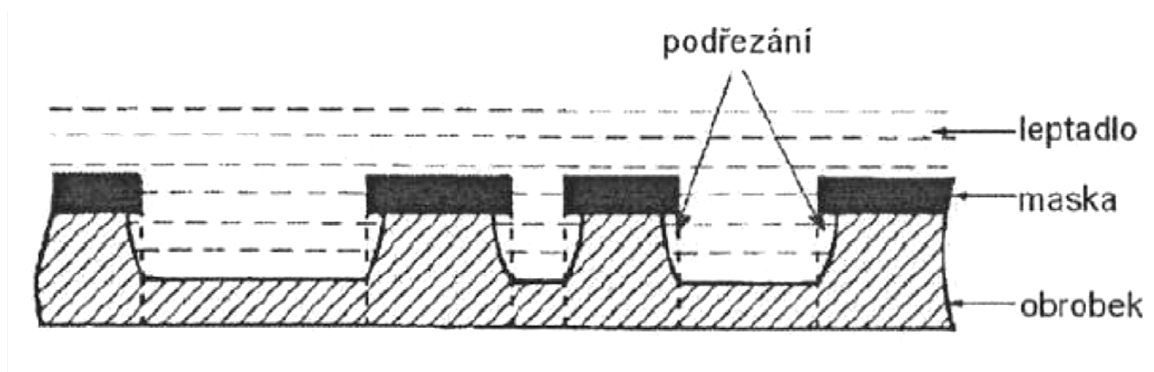
1.3.1 Chemické procesy obrábění

Tyto procesy využívají chemických reakcí jako primárního zdroje energie na úběr materiálu. [1]

Princip

Základem chemického obrábění je v řízeném odleptávání materiálu z povrchu obrobku. Tloušťka obrobku se pohybuje od několika desetin milimetru až do několika milimetrů. Odleptávání je výsledek reakce mezi materiálem obrobku a reaktivním prostředím, které tvoří kyseliny nebo zásady. Místa, která mají zůstat neporušená, musíme chránit tzv. mas-

kami. To jsou speciální povlaky, které mají vysokou odolnost vůči působící chemikálii reaktivního prostředí. [1]



Obr. 27 - Princip chemického obrábění. [1]

Typickým jevem je zde tzv. podřezání. Jedná se o odleptání materiálu, který se nachází již pod maskou. Obvykle je hodnota podřezání přibližně rovná tloušťce odleptané vrstvy. [1]

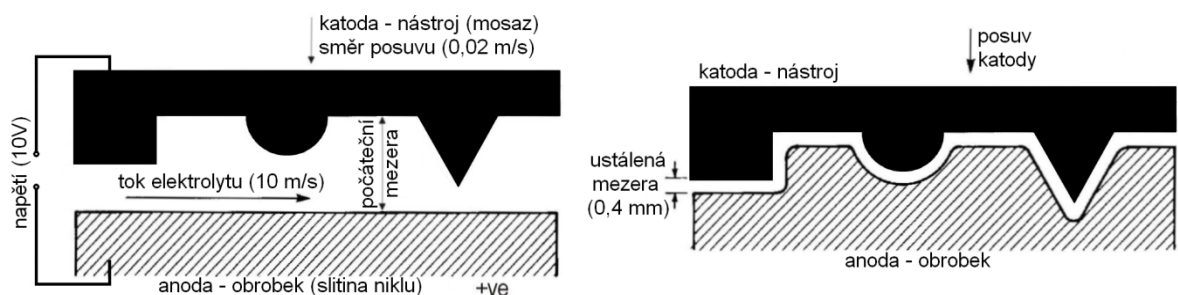
Intenzita úběru materiálu se pohybuje okolo 0,025 mm/min => jedná se o velmi pomalý proces. Dosahovaná drsnost R_a je v rozsahu 0,75 ÷ 3,75 μm (v závislosti na materiálu obrobku). [1]

Chemické obrábění se využívá především na kovové materiály jako jsou hliník, zinek, ocel, měď, titan, atd. Jeho možnost využití pro kompozitní materiály je malá.

1.3.2 Elektrochemické obrábění

Základem tohoto procesu je elektrolyza. Je to tedy řízený lokalizovaný úběr materiálu jeho anodickým rozpouštěním v elektrolytu, kde anoda je obrobek a katoda nástroj, jehož negativní tvar se kopíruje do obrobku. Je to děj, který probíhá na atomární úrovni.

Základní princip elektrochemického procesu obrábění je znázorněn na Obr. 28.



Obr. 28 - Základní princip elektrochemického obrábění. [1]

2 ROZDĚLENÍ A VÝROBA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Kompozitní materiály jsou složeny ze dvou nebo více chemicky a fyzikálně odlišných složek (fází). Tvrdší, tužší a pevnější nespojitá složka se nazývá **výztuž**, spojitá a obvykle poddajnější složka, která zastává funkci pojiva výztuže, se nazývá se **matrice**. Podle současného chápání pojmu kompozit musí být k zařazení vícefázového materiálu mezi kompozitní materiály splněny následující podmínky: [19]

- podíl výztuže musí být větší než 5 %
- vlastnosti výztuže a matrice (mechanické, fyzikální i chemické) se liší, výztuž je významně pevnější v tahu a obvykle tužší než matrice
- kompozit musí být připraven smícháním složek

Kompozitní materiály mohou obsahovat vyztužující fáze různých rozměrů. V průmyslu mají největší význam **mikrokompozitní materiály**, u kterých největší příčné rozměry výztuže (vláken nebo částic) jsou v rozmezí 10^0 až 10^2 μ m. Oproti kovům a jejich slitinám mají mikrokompozitní materiály menší hustotu a tedy příznivý poměr pevnosti v tahu a modulu pružnosti k hustotě, tj. dosahují velké měrné pevnosti (σ_{pu}/ρ) a měrného modulu (E/ρ). [19]

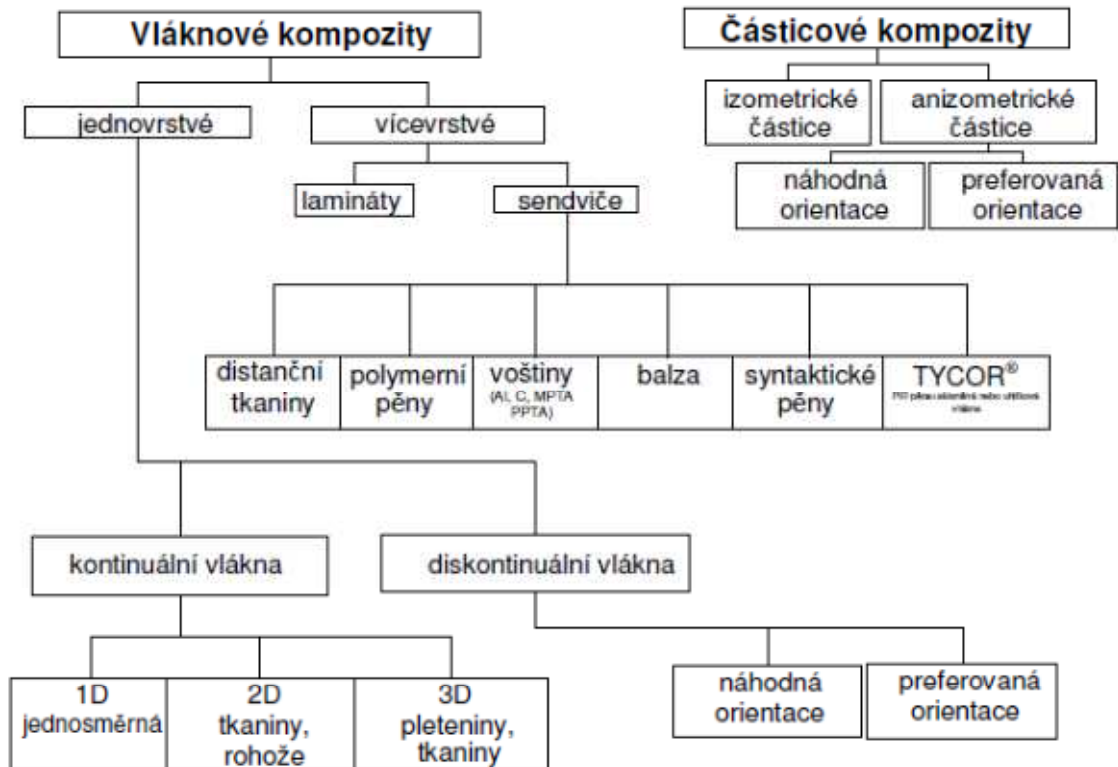
Makrokompozity obsahují výztuž o velikosti příčného rozměru 10^0 až 10^2 mm a jsou používány především ve stavebnictví (železobeton, tj. beton zpevněný ocelovými lany nebo pruty, polymerbetony obsahující drcené kamenivo a pryskyřici). Za makrokompozity lze považovat i plátované kovy, vícevrstvé materiály a konstrukce (např. chodníky a vozovky). [19]

Nanokompozity jsou kompozitní materiály, které mají rozměr výztuže (délka částice nebo průměr vlákna) v jednotkách nm. [19]

2.1 Rozdělení kompozitních materiálů

Kompozitní materiály nejčastěji rozdělujeme podle vlastností vyztužujících materiálů. Jako kritéria se užívá zejména tvar, velikost, rozměry a orientace vyztužujících částic. [12]

Na následujícím schématu je možné vidět rozdělení kompozitních materiálů podle geometrie a orientace výztuže:



Obr. 29 - Rozdělení kompozitů dle geometrie a orientace výztuže. [19]

Dále je možné kompozitní materiály dělit podle matrice: [10, 12, 19]

- polymerní,
- kovová,
- keramická,
- skleněná, sklokeramická,
- uhlíková.

Kompozitní materiály se také často dělí podle typu vyztužujících vláken. Nejčastěji používané jsou tyto: [10, 12, 19]

- skleněná vlákna,
- aramidová vlákna,
- uhlíková vlákna,
- přírodní vlákna.

2.2 Výroba kompozitních materiálů

Technologií výroby kompozitů je dnes již poměrně hodně. Jejich základní dělení je možné provést podle formy, ve které se kompozit vyrábí. A to na: [19]

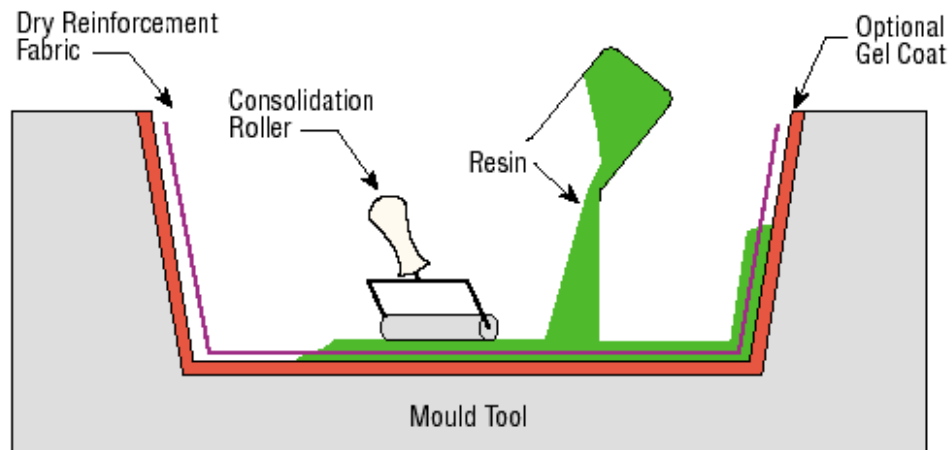
- otevřenou (jednodílná),
- uzavřenou.

Z technologií výroby je zde uvedeno několik nejpoužívanějších.

2.2.1 Ruční laminování

Ručním kladením výztuže na otevřenou formu lze vyrobit i velmi rozměrné výrobky. Výztuž musí být v podobě tkaniny nebo rohože. Pryskyřice při teplotě výroby musí téci. Prosyčování výztuže tekutou pryskyřicí je prováděno ručně (pomocí štětce, stěrky nebo válečku). Pro dokonalé prosycení výztuže jsou používány válečky složené z disků. Mezi disky je mezera, umožňující tok pryskyřice. [19]

Vyrobené díly se vytvrzují nejčastěji za studena, tj. při pokojové teplotě a dotvrzují za zvýšené teploty (80 °C).



Obr. 30 - Princip ručního laminování [20]

Výhody: [20]

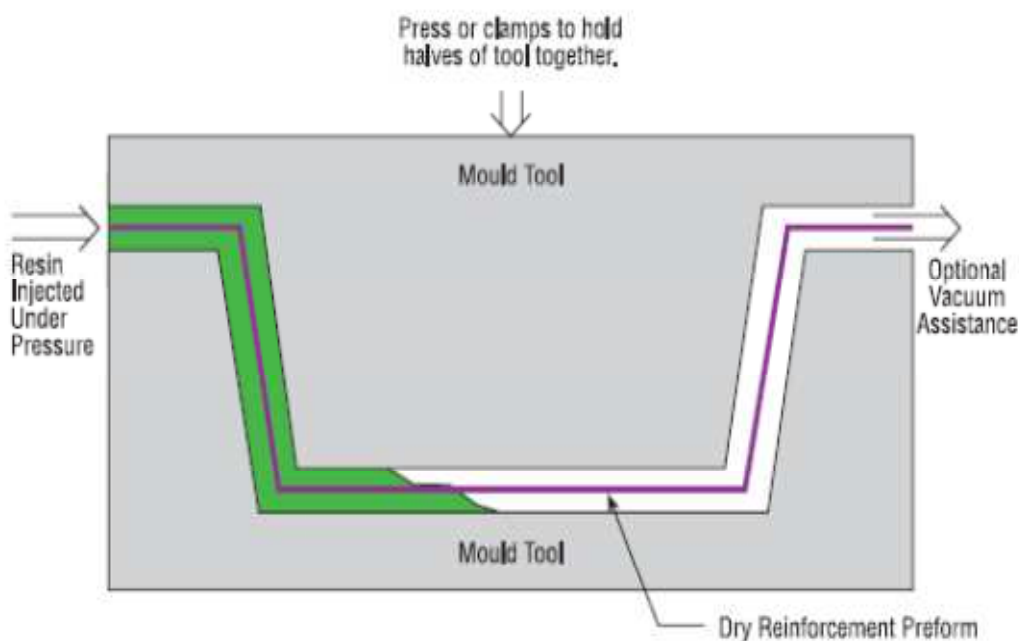
- jednoduchá a rozšířená technologie,
- nízké náklady na výrobu formy,
- vhodná technologie pro malé série,
- vhodná techn. pro velkorozměrné a tvarově složité výrobky.

Nevýhody: [20]

- kvalita výroby závisí na zručnosti pracovníků,
- pracovníci jsou vystaveni výparům styrenu.

2.2.2 RTM (Resin Transfer Molding)

Jde o technologii s uzavřenou formou, při které se při použití UP a VE pryskyřic do okolního prostoru neuvolňuje reaktivní rozpouštědlo. Ohřátá pryskyřice a ohřáté tvrdidlo se pomocí nízkotlakých čerpadel dopravují do mísící hlavy bezprostředně před injektáží směsi do ocelové nebo hliníkové formy. [19]



Obr. 31 - Princip RTM technologie. [20]

Výhody:

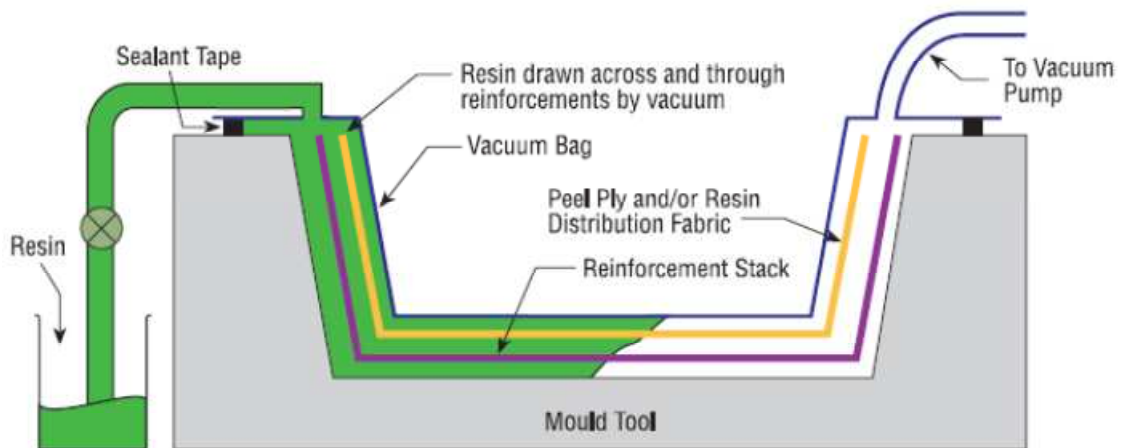
- jednoduchá a rozšířená technologie,

v porovnání s ručním laminováním produktivnější a přesnější,

- vhodná pro střední série 300 – 5000 ks
- obě strany výrobku jsou hladké.

2.2.3 Vakuová infuze (VIP – Vacuum Infusion Process)

Rozvod polyesterové nebo vinylesterové pryskyřice zajišťují hadice a tzv. distribuční médium, které se z povrchu vytvrzeného výrobku sejme (je odděleno od výrobku odtrhovou vrstvou). Krycí fólie zamezuje odpařování reaktivního rozpouštědla (obvykle styren u UP a VE pryskyřice). Mezi nosné vrstvy je možno vložit jádro (pěnové, voštinové) nebo distanční tkaninu. [19]



Obr. 32 - Princip vakuové infuze. [20]

Technologie je vhodná pro výrobu sendvičových velkoplošných výrobků (chladírenské železniční vagóny, čluny a lodě, kontejnery, karosérie autobusů). [20]

Obdobou této technologie jsou technologie SCRIMP (Seemann Composite Resin Infusion Molding Process), FASTRAC (Fast Remotely Actuated Resin Channeling), VARIM (Vacuum Assisted Resin Infusion Molding). Všechny tyto technologie pracují na tomtéž principu, kdy pryskyřice je nasávána do vakuového prostoru. [19]

Výhody:

- kontrolovaný proces zaručuje lepší kvalitativní a mechanické vlastnosti produktu,
- vhodná pro malé série,
- vhodná pro velkorozměrové výrobky.

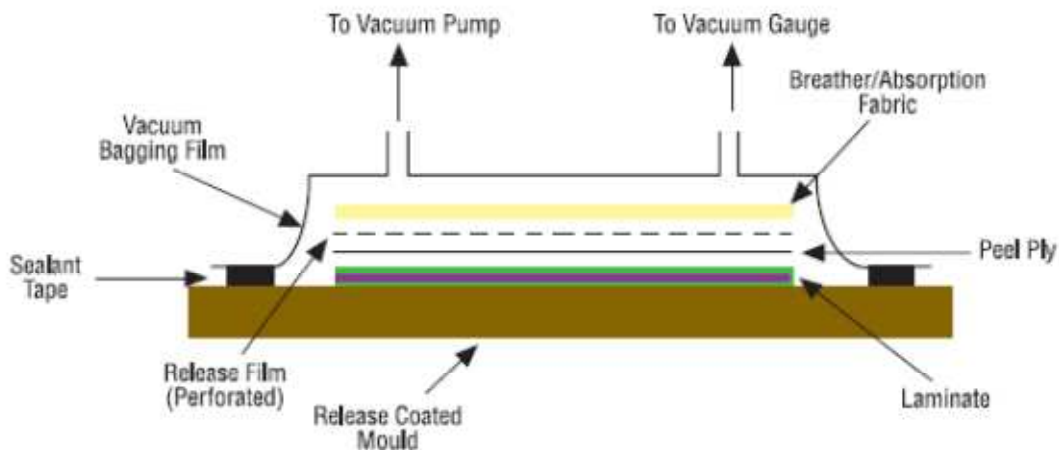
Nevýhody:

- technologicky složitý proces,

- zvýšené náklady na pomocný technologický materiál – rozváděcí tkaninu, separační a vakuovací fólii, atd.

2.2.4 Vakuové lisování prepregů

Tato technologie využívá pryskyřici již předimpregnované materiály, které se vytvrzují za zvýšených teplot (tzv. prepregy). Ty se podle přesného plánu kladou do dutiny formy ve více vrstvách. Na takto naskládané prepregy ve formě se postupně kladou další pomocné technologické materiály (odtrhovací tkanina, separační folie, odsávací rohož, vakuovací folie, atd.). Pomocí vakua se všechny materiály ve formě slisují a celá forma se takto transportuje do pece nebo autoklávu. [20]



Obr. 33 - Princip vakuového lisování prepregů [20]

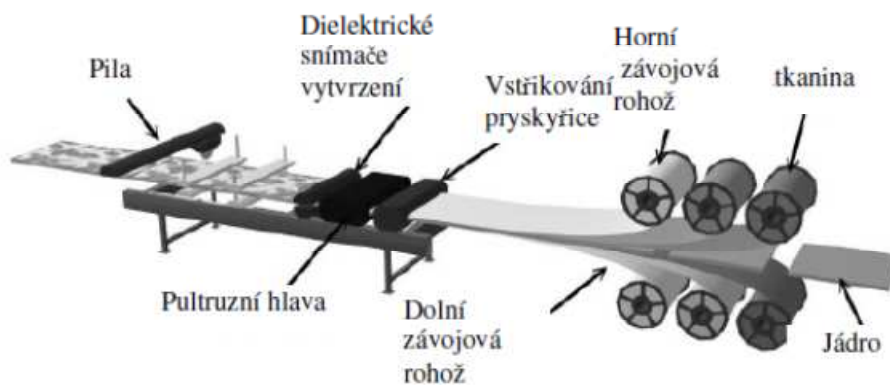
Tato technologie nachází největší uplatnění především pro interiéry v leteckém průmyslu a také pro kosmický průmysl.

2.2.5 Pultruze

Při klasické pultruzi je výztuž kontinuálně impregnována tekutou UP nebo VE pryskyřicí a vtahována do tvarovací a vytvrzovací hlavy. V ohřívané části vytvrzovací hlavy (mikrovlnný ohřev pryskyřice (pro skleněná vlákna) nebo indukční ohřev (pro uhlíková vlákna) je pryskyřice vytvrzena a hotový profil je odtahován housenkovými pásy nebo dvojicí střída-

vě popojíždějících vozíků a řezán na potřebnou délku. Stroje obvykle mívají horizontální uspořádání. [19]

U novějších pultruzních strojů je pryskyřice do tvarovací hlavy vstřikována (RIP, “Resin Injection Pultrusion”), což zajistí lepší prosycení výztuže a odstranění par reaktivního rozpouštědla při použití UP a VE pryskyřic. Nekonečný profil je řezán na potřebné délky strojní pilou vybavenou diamantovým kotoučem. Pultruzí se vstřikováním lze vyrábět i sendvičové panely, jak ukazuje následující obrázek. [19]



Obr. 34 - Princip pultruze se vstřikováním pryskyřice. [19]

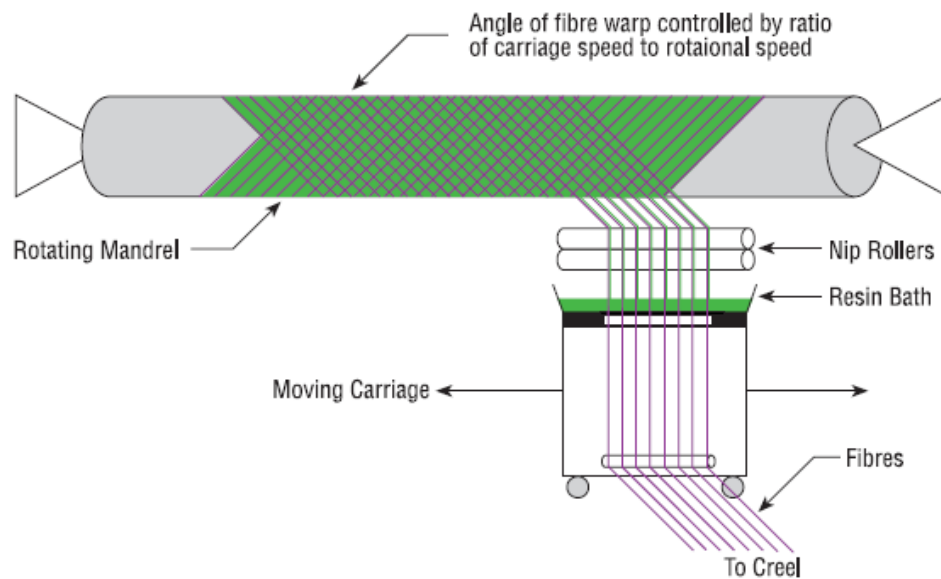
Pultruzí se vyrábějí různé profily do různých odvětví průmyslu. Příklad profilů vyrobených pultruzí je na Obr. 35. Výhodou této technologie je její vysoká produktivita. Nevýhodou ovšem je náročný rozběh technologického cyklu a tvarové omezení vyráběných profilů. [20]



Obr. 35 - Profily vyrobené pultruzí. [20]

2.2.6 Navíjení

Výztuž ve formě nekonečného vlákna je tahána přes pryskyřicovou vanu. Poté je navíjena na rotující trn, či jiný tvar (většinou válcovitého charakteru). Pryskyřice pak tuhne při zvýšené teplotě. Tato technologie nachází využití pro výrobu rour nebo speciálních nádob (příklady výrobků jsou na Obr. 36). [20]



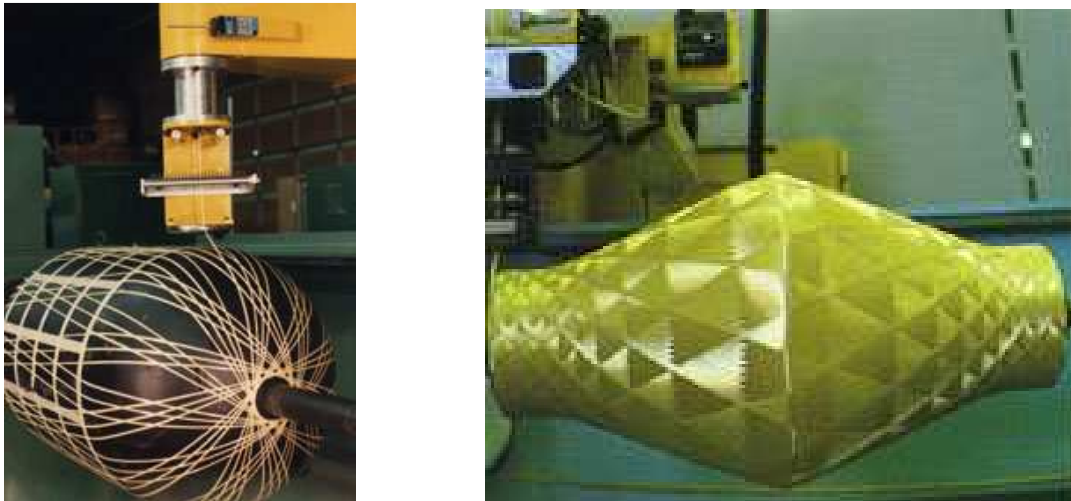
Obr. 36 - Princip navíjení.

Výhody:

- produktivní proces výroby kompozitů,
- možnost výroby velmi tuhých konstrukcí.

Nevýhody:

- omezené možnosti technologie z hlediska změny tvaru,
- nerovnoměrný návin po celé délce trnu,
- náklady na výrobu trnu mohou být poměrně vysoké,
- vnější plochy výrobků nejsou otiskem formy, proto jsou vizuálně neatraktivní.



Obr. 37 - Příklady výrobků vytvořených odvíjením. [20]

2.3 Vyztužující vlákna

Materiály ve formě vláken se jako konstrukční prvky používají velmi zřídka. Zajímavými se stávají teprve v kompaktní formě, jako je tomu v kompozitních materiálech. Kompozitní – vlákny vyztužené – plasty se skládají jednak z vláken s vysokou měrnou pevností, příp. tuhostí, jednak z rozmanitě přizpůsobivého úložného materiálu – matrice. [12]

2.3.1 Skleněná vlákna – GF (Glass Fiber)

Textilní skleněná vlákna jsou vlákna s pravidelným kruhovým průřezem, tažená z roztavené skloviny a používaná pro textilní účely. [12]

Rozlišujeme několik druhů vláken. Mezi ty nejvíce známé patří: [12, 19, 20]

- a) E-vlákna – jedná se o skleněná vlákna z bezalkalické skloviny. Jsou vynikajícím elektrickým izolantem. Díky této vlastnosti mají právě svůj název. Je to nejčastěji používaný druh skloviny pro výrobu vláken, který obsadil téměř 90% trhu.
- b) R-vlákna – toto značení je zaužívané v Evropě z anglického Resistance. V USA jsou známé pod označením S – vlákna (Strength) a v Japonsku jako T – vlákna. Sklovina, z níž se tato vlákna vyrábí, má oproti E – sklovině vyšší obsah SiO_2 , MgO a Al_2O_3 , díky čemuž tato vlákna dosahují o 40% až 70% vyšší pevnosti.
- c) C-vlákna – tato vlákna se vyznačují vysokou odolností proti kyselinám a chemicky agresivním látkám

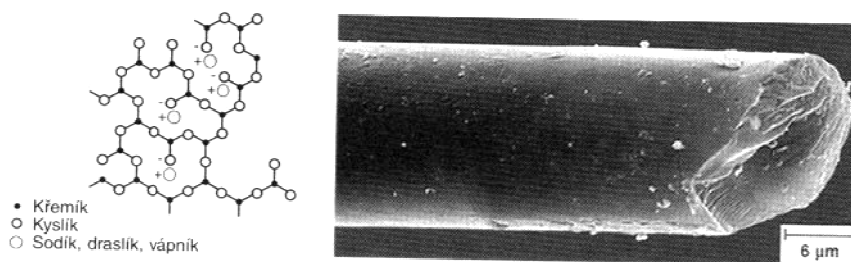
- d) ECR-vlákna – jedná se o vlákna vyráběná z vysoce chemicky odolné bezborité skloviny (ECR-skloviny). Ta má oproti E-sklovině vyšší dielektrickou konstantu a proto tato vlákna nejsou používána např. pro desky tištěných spojů.
- e) AR-vlákna – ta mají oproti E-vláknům poněkud odlišné složení. Mají vysokou odolnost proti alkáliím a používají se pro vyztužení betonu.

Tab. 2 - Složení skloviny a důležité vlastnosti neupravených vláken. [12]

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

*) Pokles až 50 % při zpracování na polotovary.

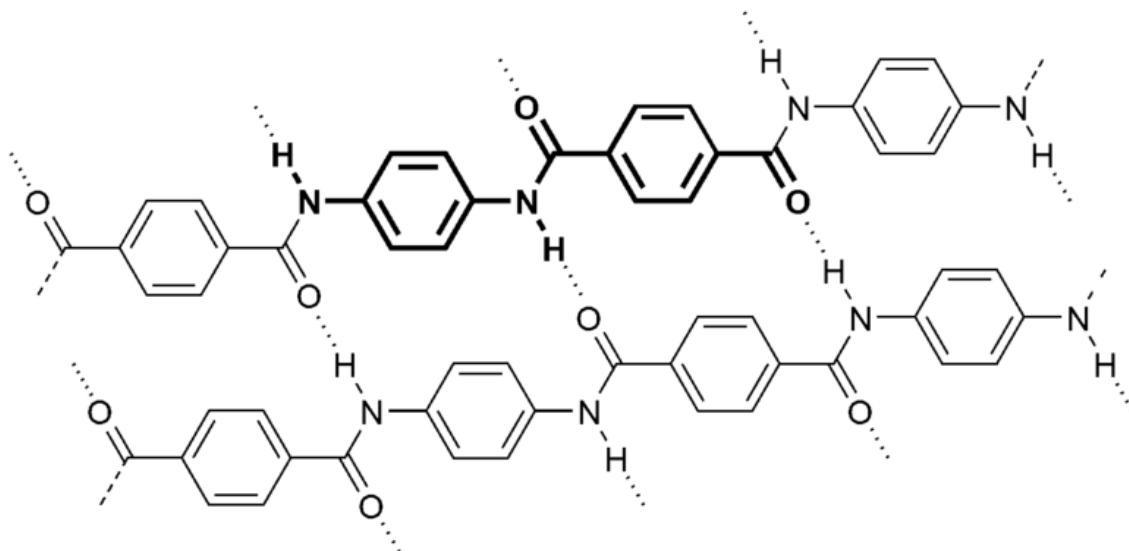
Poměrně vysoké hodnoty pevnosti a E-modulu jsou důsledkem silné kovalentní vazby mezi křemíkem a kyslíkem v trojrozměrné síti skloviny. Zesíťovaná struktura a síla jednotlivých vazeb je závislá také na druhu použitelných oxidů kovů. Na rozdíl od uhlíkových a aramidových vláken jsou izotropní. [12]



Obr. 38 - Struktura skleněného vlákna. [12]

2.3.2 Aramidová vlákna – AF (Aramid Fiber)

Jde o vlákna na bázi lineárních organických polymerů, jejichž kovalentní vazby jsou orientovány podle osy vlákna: předností těchto vláken je vysoká pevnost a tuhost.



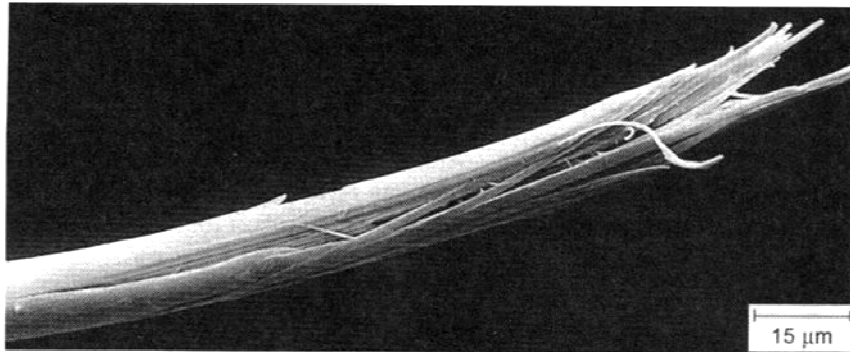
Obr. 39 - Struktura ar-(omatického poly)amidu (PPTA). [12]

Molekuly jsou navzájem spojeny vazbami vodíkových můstků. Aromatická jádra v řetězcích jsou nositeli vysoké tuhosti. Vlákna na bázi aromatických polyamidů dosahují např. při průměru vlákna 12 μm hodnot pevnosti v tahu $3600 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ a E-modulu $125\,000 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$. [12]

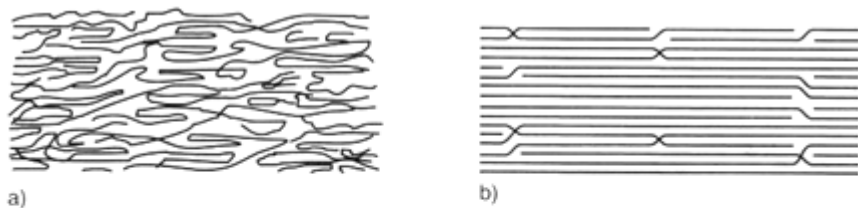
Pravidelné uspořádání fenolenových jader a amidových skupin s vazbami vodíkových můstků propůjčuje řetězcům vysokou tuhost a způsobuje současně vysokou hustotu struktury uspořádání. [12]

Mechanické vlastnosti aramidových vláken

Aramidová vlákna mají díky své vysoké orientaci molekul (Obr. 41 b.) záporný součinitel teplotní roztažnosti ve směru vláken (podobně jako vlákna uhlíková). [12]



Obr. 40 - Řez aramidovým vláknem se silným roztřepením v místě lomu [12]



a) normální organická vlákna s řetězci se záhyby a kolísáním jejich orientace (krystalické a amorfní oblasti)
 b) aramidové vlákno s dlouhými přímými úseky bez záhybů, orientovanými podél osy vlákna (struktura vysoce krystalická)

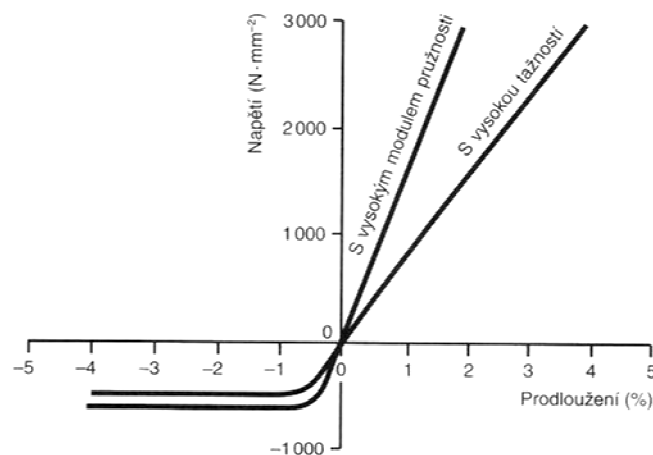
Obr. 41 - Orientace řetězců. [12]

Aramidová vlákna se vyrábějí v různých druzích, které se liší navzájem hodnotami modulu pružnosti v tahu a tažností (Tab. 1). Typy s nízkým modulem pružnosti a vyšším protažením jsou schopny pojmout podstatně vyšší deformační práci než vlákna s vyšším E-modulem a nižší tažností (Obr. 42).

Jednotlivé vlákno má kruhový průřez a je na povrchu lehce zdrsňeno. Průměr vlákna je kolem 12 μ m a jeho měrná hmotnost 1,45 g·cm³ je v porovnání s ostatními vyztužujícími vlákny nízká, čímž tato vlákna získávají další vynikající vlastnost.

Tab. 3 - Mechanické vlastnosti vláken [ehren]

Aramid	Hustota ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	Průměr (μm)	E-modul v tahu ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)	Mez pevnosti v tahu ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)	Tažnost (%)
vysokotažný	1,45	12	80 000	3 600	4,0
s vysokou tuhostí	1,45	12	131 000	3 800	2,8
ultratužký	1,45	12	186 000	3 400	2,0



Obr. 42 - Diagram napětí-deformace různých aramidových vláken (měřeno v kompozitu)

[12]

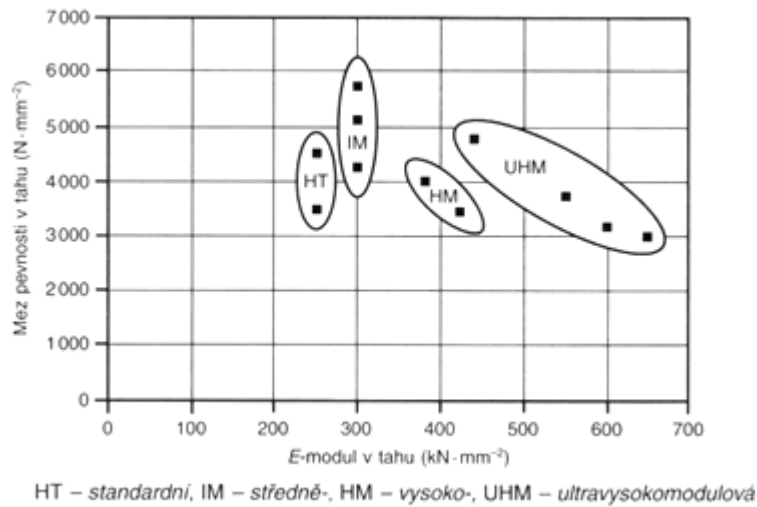
2.3.3 Uhlíková vlákna – CF (Carbon Fiber)

Jedná se o technická vlákna s extrémně vysokou pevností a tuhostí, ale s nízkou tažností.

Jako výchozí suroviny pro výrobu uhlíkových vláken se používá těchto tří materiálů: [12, 19]

- Celulóza – vyrobená vlákna mají méně dokonalou strukturu, používají se hlavně jako izolační materiál pro vysoké teploty;
- Polyakrylonitril (PAN) – vlákna z něj vyrobená jsou považována za standardní vlákna;
- Smola – vzhledem k nízké ceně základní suroviny je cena výsledných vláken ještě poměrně příznivá, ačkoli příprava vláken z tohoto materiálu je velmi nákladná. Tato vlákna mají velmi vysokou hodnotu E-modulu a výborné tepelné a elektrické vlastnosti. Tato vlákna mají na trhu pouze malý podíl. Jedná se o vlákna s vysokým

modulem pružnosti (HM) a vysokou pevností (HT), která se používají pro speciální účely.



Obr. 43 - Rozdělení uhlíkových vláken (bezprostředně po výrobě). [12]

Uhlíková vlákna mají průměr mezi 5 a 10 μm . E-modul a pevnost se mohou měnit v širokém rozsahu. Jsou závislé na stupni orientace uhlíkových vrstev a na výskytu vadných míst, která vznikají během výroby. Teoreticky možné hodnoty mechanických vlastností, vycházející z hodnot energie kovalentních vazeb grafitového monokrystalu ve směru vrstev, dosahují až $1\,000\,000\text{ N}\cdot\text{mm}^2$ pro E-modul a $100\,000\text{ N}\cdot\text{mm}^2$ pro pevnost. [12]

2.3.4 Srovnání aramidových, uhlíkových a sklem vyztužených kompozitů

Tab. 4 - Všeobecné srovnání některých vlastností kompozitů. [12]

Vlastnosti	Kompozity		
	vyztužené sklem	aramidové	uhlíkové
Hustota ρ	+ -	++	+
Mez pevnosti v tahu	+	+	+
E-modul	-	+	++
Mez pevnosti v tlaku	+	-	+
Rázová houževnatost	+	+	-
Tlumení	-	+	-
Chování při statickém a dynamickém namáhání	+	+	++
Dielektrické vlastnosti	++	++	-
Adheze, přilnavost	++	-	+
Nasákavost	+	-	+
Cena	++	+ -	-

Tab. 5 - Přehled vlastností vláken. [12]

Vláknó	ρ (g·cm ⁻³)	σ_{pt} (N·mm ⁻²)	$E_{ }$ (kN·mm ⁻²)	E_{\perp} (kN·mm ⁻²)	δ (%)	$\alpha_{ }$ (10 ⁻⁶ ·K ⁻¹)	α_{\perp} (10 ⁻⁶ ·K ⁻¹)	λ W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	ϵ_r (-)	ρ_{el} (Ω ·cm)	Nasákavost*) (%)
Sklo											
E-sklo	2,60	2 400	73	73	3,0	5	5	1	6,1 až 6,7	10 ¹⁴ až 10 ¹⁵	≤0,1
R-sklo	2,53	3 500	86	86	4,1	4	4	1	6,0 až 6,1		≤0,1
Uhlíkové vlákno											
HM1	1,96	1 750	500	5,7	0,35	-1,5	15	-	vodivé **)	10 ⁻³ až 10 ⁻⁴ **)	≤0,1
HM2	1,80	3 000	300	-	1,0	-1,2	12	15			≤0,1
HT	1,78	3 600	240	15	1,5	-1	10	17			≤0,1
HST	1,75	5 000	240	-	2,1	-1	10	17			≤0,1
IM	1,77	4 700	295	-	1,6	-1,2	12	-			≤0,1
Aramid											
HM	1,45	3 000	130	5,4	2,1	-4	52	0,04 až 0,05	2,5 až 4,1	10 ⁵	≈3,5
LM	1,44	2 800	65	-	4,3	-2	40	-	--	10 ⁵	≈7,0

*) Nasákavost při 20°C a 65% relativní vlhkosti.

**) Pro všechna uhlíková vlákna.

E – modul pružnosti v tahu
α – součinitel teplotní roztažnosti
δ – tažnost
ε_r – dielektrická konstanta
ρ – hustota

ρ_{el} – měrný elektrický odpor
σ_{pt} – pevnost v tahu
λ – tepelná vodivost
 (|| ve směru vláken, ⊥ kolmo na vlákna)
 HM – vysokomodulová

HT – s vysokou pevností
 HST – vysoce pevné, s nižší tuhostí, vyšší tažností
 IM – středněmodulová
 LM – nízkomodulová

Tab. 6 - Ceny vláken podle surovin a různých typů. [12]

Materiál vlákna	Cena (€/1 kg)
Sklo	2 až 3
Aramid	20 až 30
Uhlík standardní typ (HT, IM) vysokomodulový typ (HM) speciální typ (HT, UHM)	20 až 80 100 až 500 100 až 1 000
Bor	350

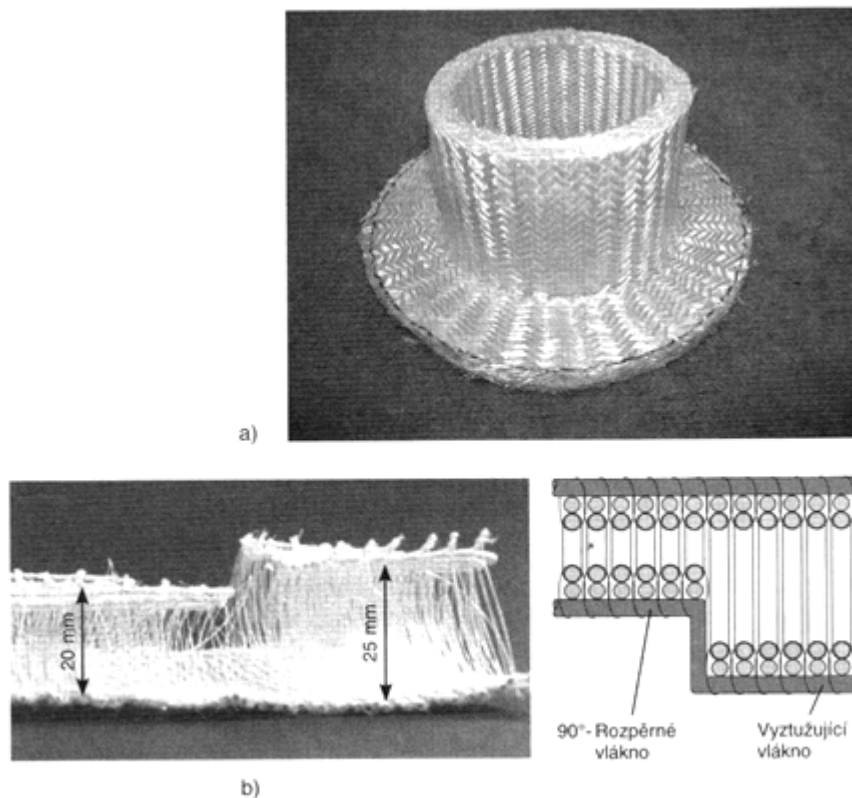
2.3.5 Upravené produkty z vláken

Jednotlivá vlákna jsou samostatně použitelná jen zřídka, proto se z vláken vytvářejí upravené produkty: [12, 20]

- Příze – vyrábí se spřádáním z vláken a zpracovává se dále na tkaniny, pásy a pletené výrobky.
- Nitě (skaná příze) – vyrábějí se jedno- nebo více stupňově, skládají se z jedné nebo z více přízí, které jsou společně spředeny. Zpracovávají se dále podobně jako příze.
- Roving (pramenec) – skládá se z 20 až 60 konců sdružených z rovnoběžně uložených nestočených vláken nebo tažených přímo z taveniny (6 až 12 000 elementárních vláken). Zpracovává se buď sekáním nebo tkaním, navíjením nebo tažením nekonečného pramence.
- Spředený roving – vyrábí se z vláken stočených kolem podélné osy
- Rohože ze sekaných pramenců - netkané plošné výrobky o hmotnosti 300 až 900 g·m⁻². Vyrábějí se z 25 nebo 50 mm dlouhých sekaných vláken nepravidelně plošně uložených. Vlákna jsou uložena do vrstev, postříkana pojivem a po vysušení v pásové sušárně spojena tak, že je možné vzniklou rohož, podobnou plsti, navíjet do rolí, které jsou připravené pro okamžité použití.
- Rohože z kontinuálních vláken – skládají se z nekonečných skleněných vláken, které jsou uloženy nepravidelně bez jakékoliv orientace ve smyčkách v několika vrstvách a jsou vzájemně spojené pojivem. Tvarují se lépe než rohože ze sekaných pramenců.
- Povrchové (závojové) rohože – netkané plošné výrobky o hmotnosti 20 až 50 g·m⁻² ze skleněných nebo termoplastických vláken, které se vkládají do povrchové vrstvy laminátu s vysokým obsahem živce, aby se zamezilo vzniku trhlin. Zabraňují prořázení struktury hrubší výztuže na povrch a zesilují tenké vrstvy.
- Krátké vlákna – mletá a na jednotlivé elementární vlákna rozptýlená vlákna o různé délce (0,1 až 5 mm), používaná pro vyztužení termoplastů.
- Tkaniny – plošné výrobky z vláken nebo pramenců uložených pravoúhle v útku a osnově, které působí výztužně ve dvou směrech. Zvýšením počtu vláken v osnově vznikají rozdílné typy křížení vláken, které se nazývají vazby. Hmotnost vláken je možné měnit v obou směrech až v poměru 1:20, čím vznikají kvazijednosměrné tkaniny. Tkaniny jsou v porovnání s jednosměrně orientovanou výztuhou snadněji

zpracovatelné. Tkaním zvlněné uložení vláken má za následek ztrátu mechanických vlastností.

- Jednosměrné pásy – textilní pásy z jedné nebo více rovnoběžně uložených vrstev přímých, nezvlněných netkaných vláken, které jsou spojeny příčně tenkou vrstvou lepicí rohože nebo útkovými vlákny uloženými ve větším odstupu. Na rozdíl od tkanin se mohou pásy navzájem ukládat pod libovolným úhlem.
- Úplety – textilní plošné výrobky, které se vyrábějí z jednoho nebo více druhů vláken pletením, umožňujícím volbu nejrůznějších geometrických tvarů.
- Trojrozměrné tkaniny – při vysokých požadavcích na přesnost uložení výztuže v trojrozměrně složitém prvku existují pouze dvě možnosti: řasitelné úplety nebo vytvarované, málo řasitelné pleteniny a úplety, které jsou pro zachování tvaru ještě sešity. Úplety nebo trojrozměrné tkaniny jsou textilní plošné výrobky, které jsou vyrobeny z jednoho nebo více vláknových systémů technologií pletení (Obr. 44)

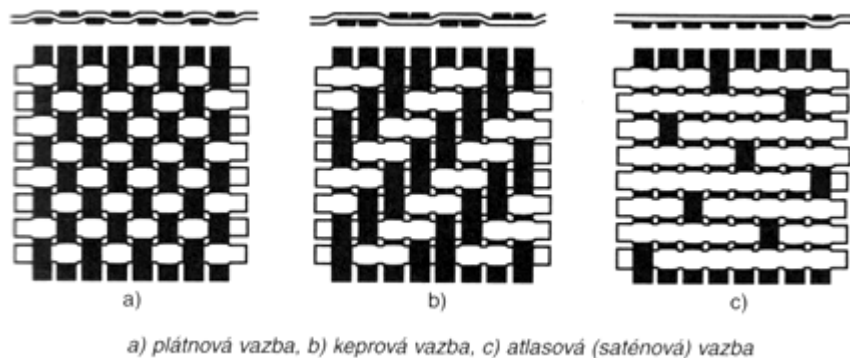


a) trojrozměrná výztuž příruby, b) trojrozměrná tkanina

Obr. 44 - Pletené výztuže. [12]

Druhy vazeb tkanin:

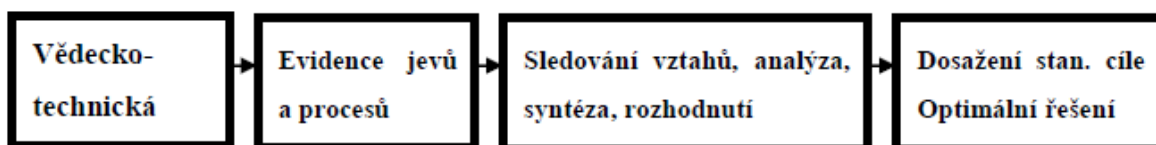
- Plátňová vazba – jednoduchá základní vazba, jednoduché zpracování tkaniny vzhledem k dobré rozměrové stálosti a malému otřepu při řezání.
- Keprová vazba – vyšší pevnost a tuhost laminátu způsobená menším zvlněním vláken. Tkaniny jsou ohebnější, a jsou proto vhodnější pro tvarované prvky než tkaniny s plátňovou vazbou.
- Atlasová (saténová) vazba – má menší vychýlení vláken než keprová vazba, velmi dobrou řasitelnost a z toho vyplývající vhodnost pro prostorově složité prvky. Atlasové tkaniny umožňují dosáhnout velmi hladký povrch.



Obr. 45 - Druhy vazeb vyztužujících tkanin. [12]

3 POPIS OPTIMALIZAČNÍCH METOD V TECHNOLOGII OBRÁBĚNÍ

Při řízení a rozhodování v oblasti vědecko-technologické činnosti je nutné sledovat určité procesy a jevy, analyzovat je s cílem výběru nejlepší varianty a při zachování vymezených podmínek. Jedná se tedy o dosažení optimálního průběhu jednotlivých procesů a dějů a určit jejich posloupnost tak, aby bylo dosaženo stanoveného cíle. [22]



Obr. 46 - Obecné schéma řešení úlohy. [22]

Tuto činnost je možné provádět:

- a) na základě solidního logického rozboru;
- b) rozhodnutí učiněná zkusmo, náhodně, intuitivně nebo na základě praktikizmu;
- c) aplikací matematických metod.

Jednou z možností jak dosáhnout přesných informací o kvalitě a úrovni řešení, je použití optimalizačních metod na řešení daného problému. Obvykle existuje několik možností jak vyřešit danou úlohu a cílem je najít takové řešení, které nejvýhodněji využívá všechny možnosti tak, aby byl výsledek, z hlediska požadovaných kritérií, optimální. [22]

V případě optimalizace této úlohy nelze využít běžně používaných metod optimalizace, které se využívají především pro obrábění konvenčními metodami. Jedná se zde o optimalizaci výsledného tvaru řezu. Tedy, aby výsledný řez byl rovný, stejnoměrný a nerozblíhavý v žádném směru. Těchto podmínek lze dosáhnout změnou řezných podmínek laseru či vodního paprsku, nebo změnou skladby používaných materiálů, a to především jádra sendvičových desek.

3.1 Konvenční optimalizace řezných podmínek

Při volbě řezných podmínek vycházíme zejména z nutnosti dodržení následujících zásad:

- řezné podmínky musí zajistit splnění kvalitativních a kvantitativních požadavků na obráběný dílec;
- velikost průřezu třísky musí být v souladu s tuhostí soustavy;
- složky řezného odporu nesmějí překročit maximálně přípustné síly v jednotlivých směrech;
- výkon řezání musí být menší než užitečný výkon elektromotoru stroje;
- nesmí být překročena řezivost nástroje;
- musí být dodržena minimálně přípustná výrobnost stroje za časovou jednotku;
- řezné parametry musí být v mezích přípustných intervalů;
- při obrábění na čisto nesmí být překročena limitní hodnota posuvu, daná požadovanou drsností povrchu. [22]

Pro stanovení řezných podmínek je zejména důležité dosažení požadované trvanlivosti nástroje s ohledem na zvolené kritérium optimálnosti. [22]

3.2 Lineární programování

Podmínkou aplikace lineárního programování je, že používané funkce, tj. rovnice a nerovnice, kterými lze řešený problém popsat, jsou lineární, případně lze tyto funkce vhodnou úpravou na lineární převést.[22]

Lineární programování je jednou z nejjednodušších matematických disciplín, kterou lze realizovat v ekonomickém rozhodování. [22]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 EXPERIMENTÁLNÍ OBRÁBĚNÍ KOMPOZITŮ A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Pro experimentální obrábění bylo vyrobeno několik desek o různých skladbách materiálů. Na těchto deskách se pak prováděly experimentální řezy na laseru a vodním paprsku s různými reznými podmínkami.

4.1 Popis a výroba desek

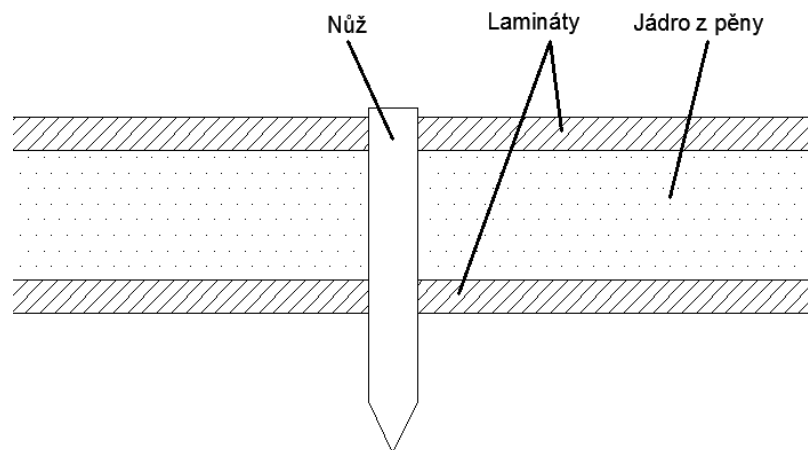
Desky pro experimentální obrábění byly vyrobeny pomocí ručního laminování s dolisováním pod vakuovou plachtou. Tato metoda se pro výrobu sendvičových desek využívá právě k optimalizaci skladby. Pro budoucí výrobu by byla vhodnější výroba metodou RTM. To by ale vyžadovalo sestavení obou dílů formy, což není u ručního laminování potřeba.

Řezy byly provedeny celkem na pěti různých typech desek. Ale pouze 3 desky mají jádro z pěnového materiálu. Díky tomu jsou o poznání lehčí a mají význam pro použití na střížné nástroje. Proto je dále uveden popis výroby pouze tohoto typu desek.

Jednotlivé desky mají vždy jinou barvu povrchu, proto jsou pro větší přehlednost označovány těmito barvami.

4.1.1 Aplikace vyrobených desek

Desky jsou používány pro výrobu střížných nástrojů pro papírenský průmysl. Do desek je vyřezána drážka o přesných rozměrech, do které je vsazen nůž. Vyřezaná drážka musí mít přesné rozměry o úzké toleranci. Na Obr. 47 je schéma zasazeného nože do sendvičové desky.



Obr. 47 - Schéma nože vsazeného do desky.

4.1.2 Skladba jednotlivých desek

Skladba je zapsána od vrchní vrstvy směrem ke spodní.

Bílá:

- gelcoat RAL 9010;
- 2x skelná tkanina 680 g.m⁻²;
- pěna Merex 100 kg.m⁻³ (10mm);
- 1x skelná tkanina 680 g.m⁻²;
- pěna Merex 100 kg.m⁻³ (6mm);
- 2x skelná tkanina 680 g.m⁻².



Obr. 48 - Struktura bílé desky.

Černá, červená:

Jedinou odlišností mezi černou a červenou deskou je barva gelcoatu, z toho důvodu jsou měření prováděna pouze na černé desce.

- gelcoat ortho RAL 9010 (0,5 mm);
- 5x skelná tkanina AEROGLOSS 220 g.m⁻² (1,1 mm);
- PVC pěna 100 kg.m⁻³ (15mm);
- 6x skelná tkanina AEROGLOSS 220 g.m⁻² (1,4 mm).



Obr. 49 – Struktura černé desky.

Šedá:

- polyrey (1,2 mm);
- PET pěna 200 kg.m⁻³ (20 mm);
- polyrey (1,2 mm).



Obr. 50 - Struktura šedé desky.

Dále byly řezy provedeny na dalších dvou deskách. Obě desky však jsou příliš těžké, aby je bylo možné s výhodou použít pro střížné nástroje, a skladba jejich materiálů není přesně známa. Pro měření byly tyto materiály použity kvůli vyhodnocení závislosti šířky štěrbin na hustotě řezaných materiálů. Následující tabulka zobrazuje, jak jsou jednotlivé desky dále označovány.

Tab. 7 – Označování desek.

zelená	bílá	šedá	černá	modrá
deska č.1	deska č.2	deska č.3	deska č.4	deska č.5

4.1.3 Postup výroby

Napřed je nutné si připravit formu. Tedy důkladně očistit povrch od veškerých nečistot a prachu a poté vyleštit přípravkem, který pomáhá odseparovat hotový výrobek od formy.



Obr. 51 - Forma potřená separačním přípravkem.

Poté je potřeba si připravit materiál, a to tak, že se nastříhá potřebný počet kusů tkaniny o potřebné šířce a délce, nařeže se pěna a kraje se obrousí tak, aby jednotlivé desky pěny na sobě tvořily tvar nedokončené pyramidy (viz Obr. 52). Taky je potřeba připravit si odtrhovou tkaninu a odsávací rohož. Odsávací rohože slouží k odsátí přebytečné pryskyřice, zatímco odtrhová tkanina zabraňuje spojení odsávací rohože a výrobku. Nakonec si nachystáme dostatečně velký kus vakuovací folie a speciální pásy, pomocí nichž se vše utěsní, aby mohlo vzniknout vakuum.



Obr. 52 - Desky PVC pěny připravené na výrobu sendvičových desek.

Když jsou všechny materiály nachystány, smíchá se pryskyřice s urychlovačem a tvrdidlem. Na množství těchto látek závisí výsledný gel-time – tedy čas, za který epoxid vytvrdne. Poté je třeba začít postupně klást vrstvu za vrstvou a pomocí válečku prosycovat epoxidem. Nakonec překryjeme výrobek odtrhovou tkaninou a odsávací rohoží, utěsníme vakuovací folií a odsajeme vzduch (Obr. 53).



Obr. 53 - Lisování desky vakuem.

Po úplném vytvrdnutí se sundá vakuovací folie a odtrhne se odtrhová tkanina.

4.2 Měření sil působících při frézování

Pro porovnání konvenčních a nekonvenčních technologií bylo provedeno také měření sil při frézování dvou vzorků. Při frézování byly pomocí dynamometru měřeny síly ve složkách X a Y, ze kterých byla pak vypočítána celková síla F_c . Měření sil probíhalo pro obvodové frézování a frézování drážky. Tedy záběr frézy byl postupně zvyšován, a to na 20%D, 30%D, 40%D, 50%D a 100%D pro frézování drážky. Všechna měření byla provedena na 2 různých vzorcích a s celkem 3 různými frézami. Z toho 2 frézy byly použity pro obvodové frézování a 2 frézy pro frézování drážky (viz. Tab. 8).

Tab. 8 - Očíslování měření sil od frézování.

Měření č.	Frézování	Deska	Fréza	Povlak
1	obvodové	4	400T.080	AlTiN
2	obvodové	2	400T.080	AlTiN
3	obvodové	4	700.080	žádný
4	obvodové	2	700.080	žádný
5	drážky	2	400T.080	AlTiN
6	drážky	4	400T.081	AlTiN
7	drážky	2	5010.080	diamant
8	drážky	4	5010.081	diamant

Všechna měření byla provedena na CNC frézce dostupné v laboratořích ÚVI s otáčkami $n = 8000 \text{ ot.min}^{-1}$ a posuvovou rychlostí $v_f = 1500 \text{ mm.min}^{-1}$.

4.2.1 Vzorčky pro měření

Měření bylo provedeno celkem na dvou vzorcích. Jednalo se o vzorčky desky 4 (červené) a desky 2 (bílé). Skladba těchto desek je popsána v kapitole 4.1.2.

4.2.2 Obvodové frézování

Obvodové frézování bylo rozděleno do 4 jednotlivých měření, a to pro dvě různé frézy a dva různé vzorky materiálu. Tedy měření číslo 1 až 4 v Tab. 8.

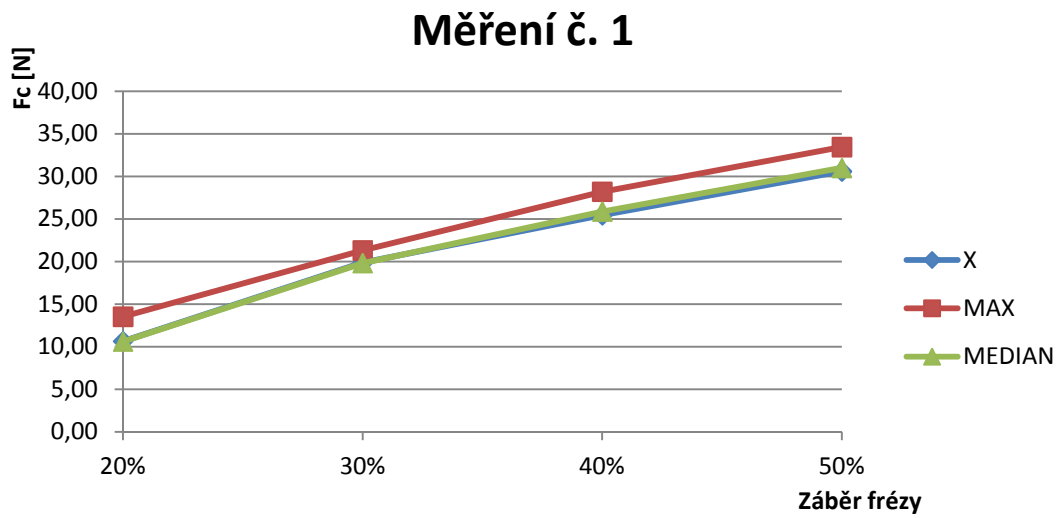
Vzhledem k velkému množství hodnot a tedy příliš velké rozsáhlosti tabulek s naměřenými hodnotami jsou v tištěné části DP uvedeny pouze statisticky vyhodnocené údaje. Tabulky s naměřenými hodnotami jsou k nahlédnutí na CD přiloženému k práci.

Z naměřených hodnot byla z obou složek určena celková působící síla F_c . Hodnoty těchto sil byly použity pro výpočet aritmetického průměru, směrodatné odchylky, variačního rozpětí, dále byly určeny hodnoty maxima, minima a mediánu. Pro zobrazení grafu postačují hodnoty aritm. průměru, maxima a mediánu.

Měření 1:

Tab. 9 – Obvodové frézování - měření č. 1.

Měření č. 1				
	20%D [N]	30%D [N]	40%D [N]	50%D [N]
\bar{x}	10,62	19,86	25,43	30,58
MAX	13,51	21,30	28,19	33,44
MEDIAN	10,59	19,81	25,86	30,98

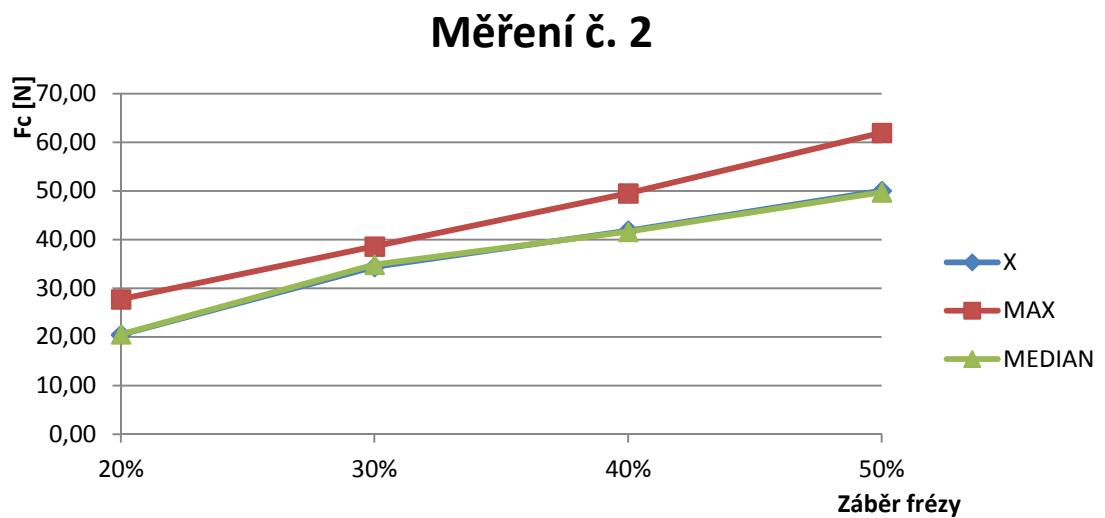


Graf 1 - Obvodové frézování - měření č. 1.

Měření 2:

Tab. 10 - Obvodové frézování - měření č. 2.

Měření č. 2				
	Fc [N]			
	20%D	30%D	40%D	50%D
\bar{x}	20,44	34,39	41,85	50,01
MAX	27,71	38,57	49,48	61,93
MEDIAN	20,53	34,86	41,59	49,73

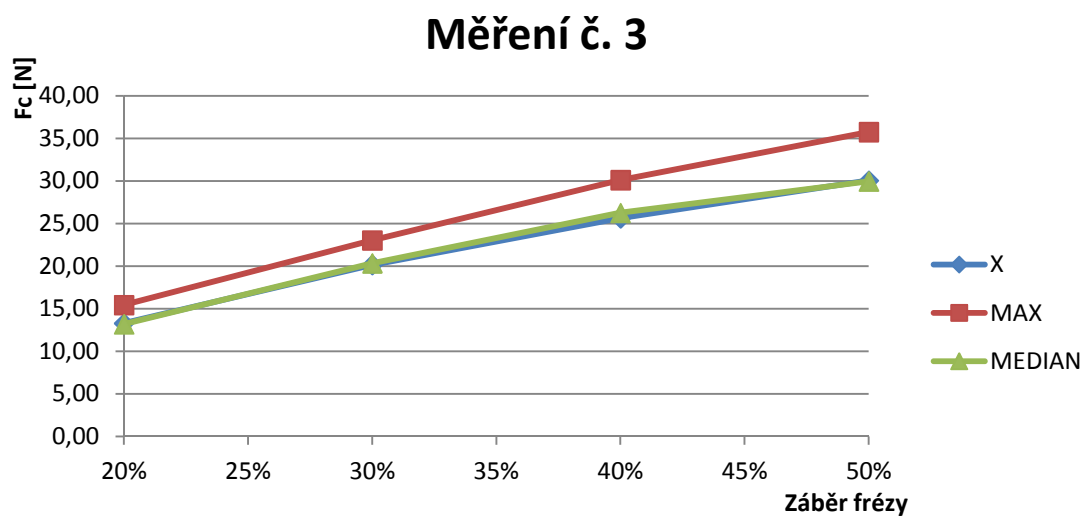


Graf 2 - Obvodové frézování - měření č. 2.

Měření 3:

Tab. 11 - Obvodové frézování - měření č. 3.

Měření č. 3				
	F _c [N]			
	20%D	30%D	40%D	50%D
\bar{X}	13,28	20,14	25,62	30,04
MAX	15,43	23,02	30,10	35,76
MEDIAN	13,18	20,32	26,25	29,95

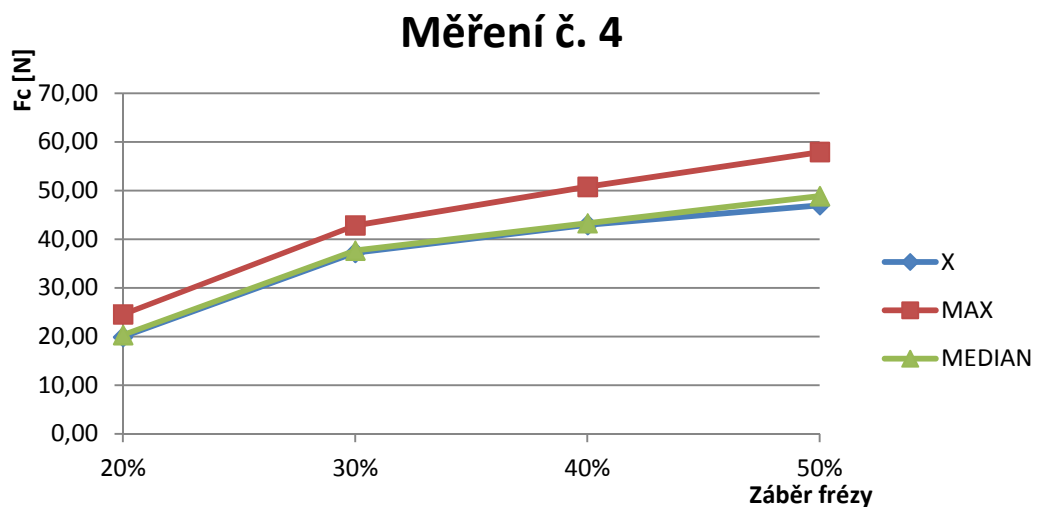


Graf 3 - Obvodové frézování - měření č. 3.

Měření 4:

Tab. 12 - Obvodové frézování - měření č. 4.

Měření č. 4				
	F _c [N]			
	20%D	30%D	40%D	50%D
\bar{X}	19,87	37,21	42,93	46,98
MAX	24,54	42,83	50,75	57,90
MEDIAN	20,29	37,66	43,27	48,86



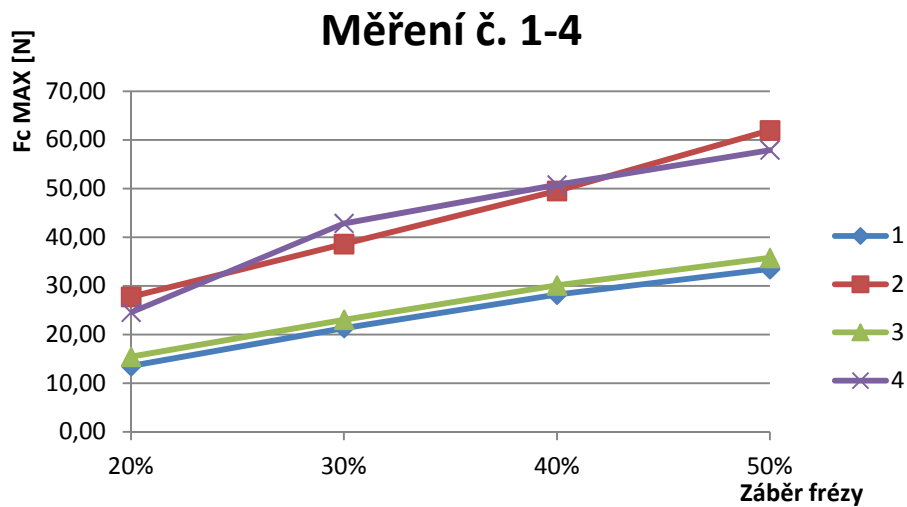
Graf 4 - Obvodové frézování - měření č. 4.

Zhodnocení výsledků:

V grafech lze vidět, že síly, působící při obrábění těchto vzorků, rostou téměř lineárně ve všech 4 měření. Při porovnání velikosti sil z jednotlivých měření je zřejmé, že bílý vzorek (tedy vzorek s třemi vrstvami kompozitního materiálu ze skelného vlákna) působí na frézu mnohem vyšším odporem. Při porovnávání odporu stejných vzorků obráběných různým typem frézy jsou výsledky měření velmi podobné a nelze podle výsledků určit, která fréza je pro frézování daných vzorků vhodnější. Pouze u červeného vzorku vychází fréza Nuova Cumet 700.080 asi o 2N lépe.

Tab. 13 - Porovnání Fc MAX v měření 1-4.

Měření č. 1-4				
	Fc MAX [N]			
	20%D	30%D	40%D	50%D
1	13,51	21,30	28,19	33,44
2	27,71	38,57	49,48	61,93
3	15,43	23,02	30,10	35,76
4	24,54	42,83	50,75	57,90



Graf 5 - Porovnání Fc MAX v měření 1-4.

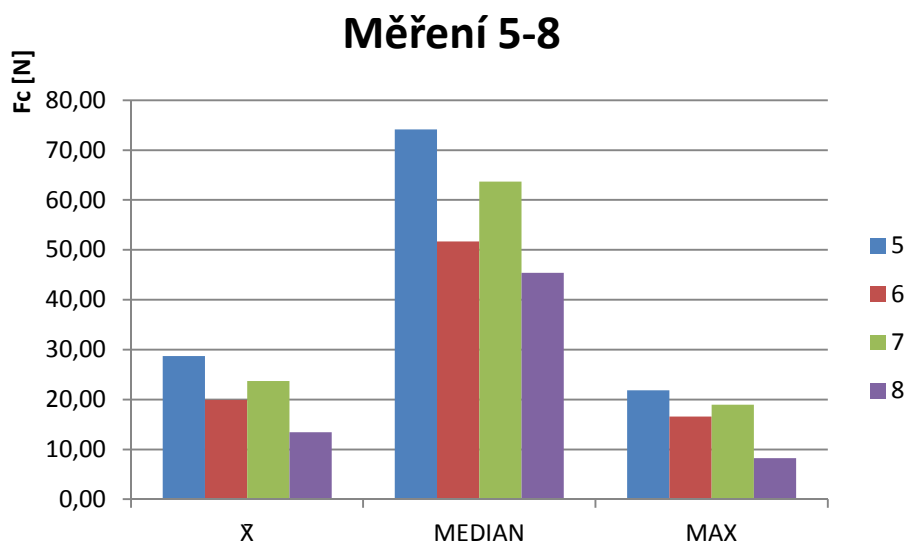
4.2.3 Frézování drážky (100% D)

Frézování drážky bylo rozděleno do 4 jednotlivých měření, a to pro dvě různé frézy a dva různé vzorky materiálu. Tedy měření číslo 5 až 8 v Tab. 14.

Tabulky s naměřenými hodnotami jsou uvedeny v tabulkách na CD přiloženém k diplomové práci. Naměřené hodnoty byly statisticky zpracovány stejně jako u obvodového frézování. Následující tabulka a graf zobrazuje porovnání celkových sil jednotlivých měření (tedy v měření č. 5-8).

Tab. 14 - Frézování drážky – měření č. 5-8.

Měření 5-8, hodnoty Fc [N]				
měření č.	5	6	7	8
\bar{X}	28,70	19,94	23,69	13,45
MEDIAN	21,88	16,56	18,96	8,23
MAX	74,11	51,68	63,68	45,38



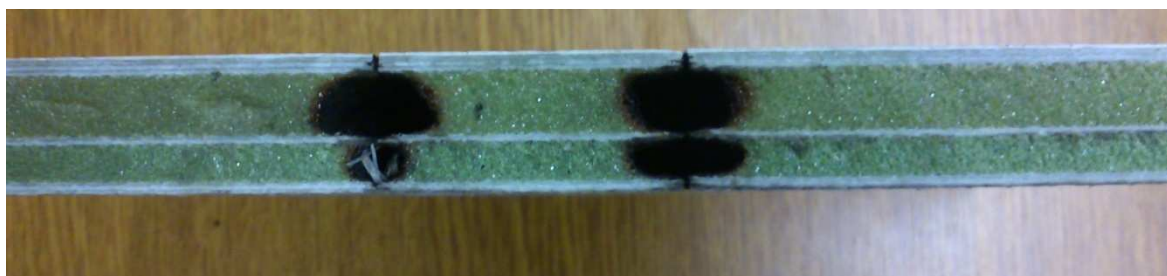
Graf 6 - Frézování drážky - měření 5-8.

Zhodnocení výsledků

V Graf 6 Graf 6 - Frézování drážky - měření 5-8. lze vidět, že největší síly působí při frézování drážek v měření č. 5. Jedná se o bílý vzorek, tedy vzorek se třemi vrstvami skelné tkaniny, a frézu s označením 400T.080. Při použití frézy 5010.080 s diamantovým povlakem (měření č. 7) maximální síla při frézování poklesla více než 10 N. Při porovnání výsledků z měření č. 6 a č. 8 jsou závěry podobné. Hodnota poklesu je zde o více než 6 N.

4.3 Řezy na laseru

Praktické využití obrábění laserem pro tyto sendvičové materiály je velmi omezené, protože žár, který se šíří od laserového paprsku, vypaluje a vytavuje pěnu, která slouží jako jádro. Desky, které nemají jádro z lehčených hmot, by sice pro řez laserem vyhovovaly mnohem lépe, ale tyto desky by pak ztrácely svou výhodu nízké hmotnosti a nevyhovovaly by tak účelu, pro který byly vytvořeny.



Obr. 54 - Vypalování pěny od řezu laserem.

4.4 Řezy na vodním paprsku

Po zhlédnutí řezů provedených laserem byly vzorky použity na řezy vodním paprskem. Celkem byly provedeny řezy na 5 různých deskách, z nichž největší význam mají desky s pěnovým jádrem.

Pro vyhodnocení závislosti drsnosti na rychlosti řezu bylo provedeno měření drsnosti na duralovém vzorku.

Specifikace stroje

Všechny řezy byly provedeny na stroji Flow MACH 3 M3-3020b (Obr. 55). Ten umožňuje řez vodním i abrazivním vodním paprskem. Rozměr pracovního prostoru je 3x2 m. Přesnost přístroje je přibližně 0,06 mm·m⁻¹. Přesnost opakovaného najetí 0,05 mm. Rychlost řezání do 7,6 m·min⁻¹. Rychloposuv do 12,7 m·min⁻¹.



Obr. 55 – Systém pro řezání vodním a abrazivním vodním paprskem MACH 3

4.4.1 Naměřené hodnoty drsnosti na vzorku z duralu

Na vzorku z duralu byly provedeny řezy při různých rychlostech. V následujících tabulkách jsou naměřené hodnoty drsnosti a v Graf 7 je zobrazena závislost Ra na vzdálenosti od vrchní hrany řezu a na rychlosti posuvu. Graf 9 znázorňuje závislost Rmr (tedy materiálového podílu) na vzdálenosti od vrchní hrany řezu a rychlosti posuvu.

Tato data byla naměřena na kontaktním drsnoměru Mitutoyo SJ-301 s měřicím rozsahem 300 μm. U celkem 4 měření nastaly potíže s přesáhnutím měřicího rozsahu a nebylo možné tak získat u těchto měření výsledky. Z tohoto důvodu jsou výsledky u rychlosti posuvu 80 % a 100 % neúplné. Aby bylo možné získat nějakou představu o drsnosti vzorku na spodní hraně řezu u těchto rychlostí, bylo provedeno měření pod optickým mikroskopem, čímž byla prakticky získána hodnota drsnosti Rt (viz Obr. 56Obr. 57).



Obr. 56 - Nasnímaný povrch při měření pod mikroskopem – řez rychlostí 80%.

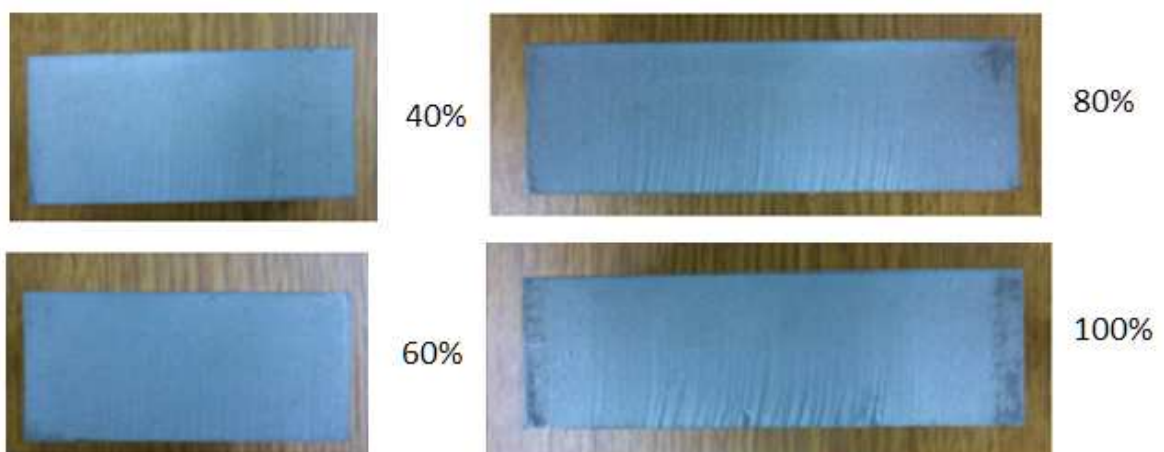


Obr. 57 - Nasnímaný povrch při měření pod mikroskopem – řez rychlostí 100%.

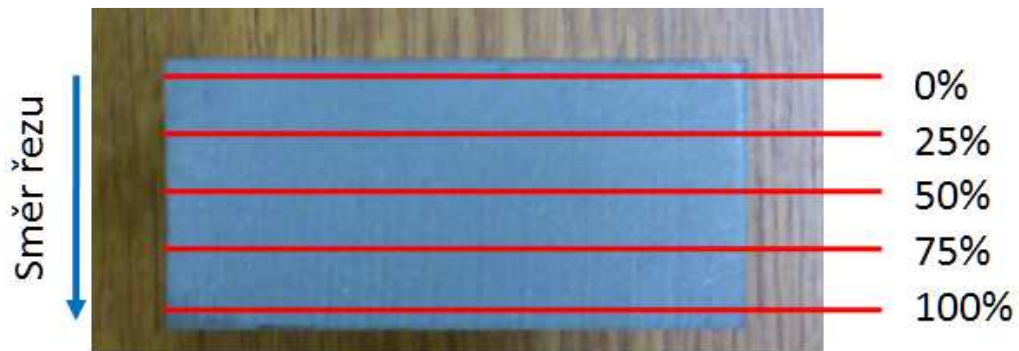
Po odečtení maximální a minimální hodnoty byla získána hodnota drsnosti $R_t = 0,37$ mm pro stranu vzorku obrobenou posuvovou rychlostí 80% a $R_t = 0,86$ mm pro stranu vzorku obrobenou posuvovou rychlostí 100%.

Tabulky s naměřenými daty jsou obsaženy v příloze I. Zde jsou uvedeny pouze tabulky, v kterých jsou aritmetické průměry hodnot z jednotlivých měření.

Proběhla měření pro celkem 4 strany duralového materiálu o tloušťce 25 mm (Obr. 58). Každá strana tohoto vzorku byla uřezána vodním paprskem různou posuvovou rychlostí. Řez s nejjemnějším povrchem byl proveden posuvovou rychlostí 40%, ostatní strany jsou říznuty rychlostí 60%, 80% a 100%. Na každé straně bylo provedeno měření drsnosti v 5 úrovních od počátku řezu, dále pak v 25%, 50%, 75% hloubky od počátku řezu a na konci řezu (viz Obr. 59).



Obr. 58 - Jednotlivé strany vzorku s popisem rychlostí, jimiž byly řezány.



Obr. 59 - Popis vrstev, ve kterých bylo měření provedeno.

Při měření na duralovém vzorku bylo také možné si všimnout, že drsnost povrchu byla vždy nižší na začátku a na konci dráhy řezu. To je nejspíš důsledkem postupného rozjezdu a dojezdu trysky.

Z tabulek jednotlivých měření byly vytvořeny tabulky závislosti posuvové rychlosti na hloubce od počátku řezu. Tyto tabulky byly vytvořeny pro drsnost Ra, Rz a materiálový podíl Rmr (TABULKY XX-YY).

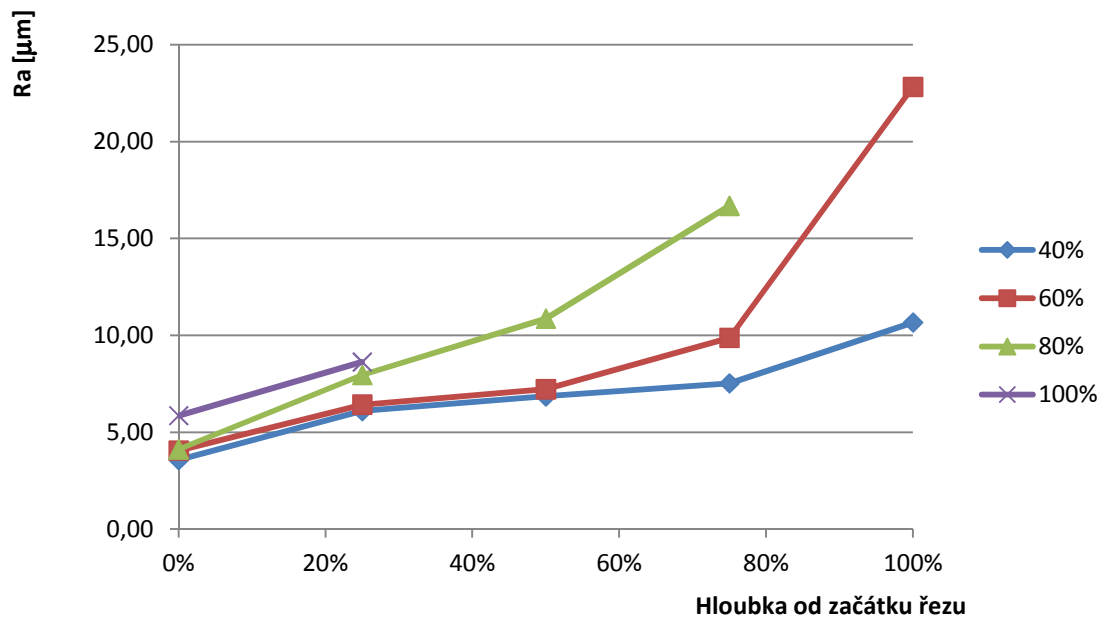
Tab. 15 - Závislost hodnot Ra, Rz a Rmr na posuvové rychlosti a hloubce řezu.

DRSNOST Ra [μm]				
	posuvová rychlost			
	40%	60%	80%	100%
0%	3,57	4,06	4,12	5,86
25%	6,10	6,42	7,95	8,63
50%	6,86	7,22	10,87	
75%	7,52	9,88	16,69	
100%	10,66	22,83		

DRSNOST Rz				
	posuvová rychlost			
	40%	60%	80%	100%
0%	20,59	24,26	24,98	269,10
25%	30,19	30,93	34,13	357,80
50%	30,50	31,16	40,09	
75%	30,36	35,66	60,66	
100%	59,85	143,82		

MATERIÁLOVÝ PODÍL Rmr				
	posuvová rychlost			
	40%	60%	80%	100%
0%	73,10	73,10	68,90	63,40
25%	70,30	68,30	63,30	54,40
50%	55,40	69,20	53,20	
75%	62,80	51,80	50,20	
100%	64,20	42,80		

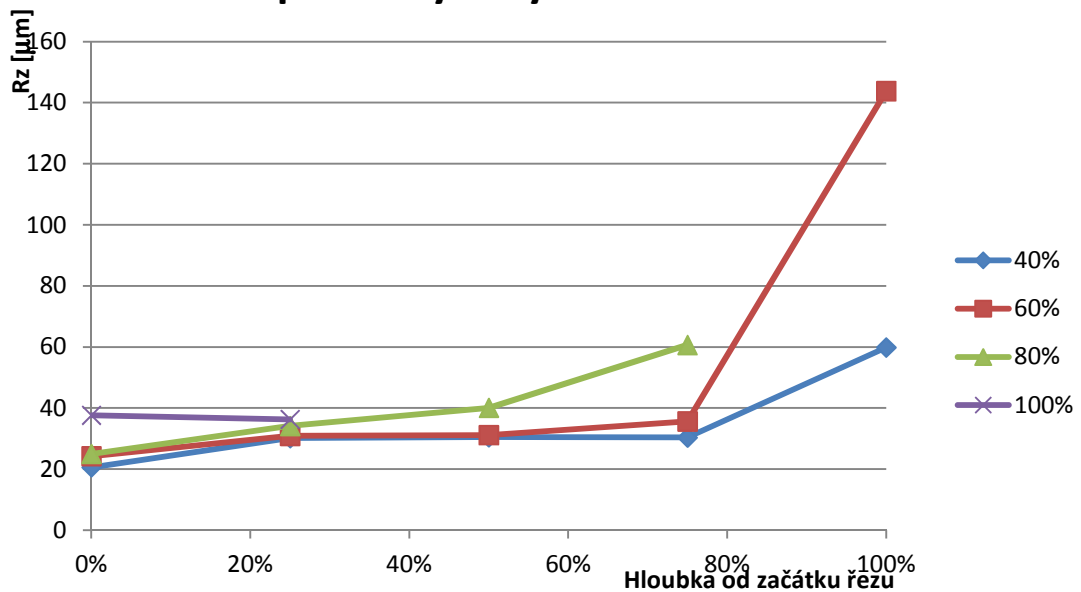
Ra při různých rychlostech řezu



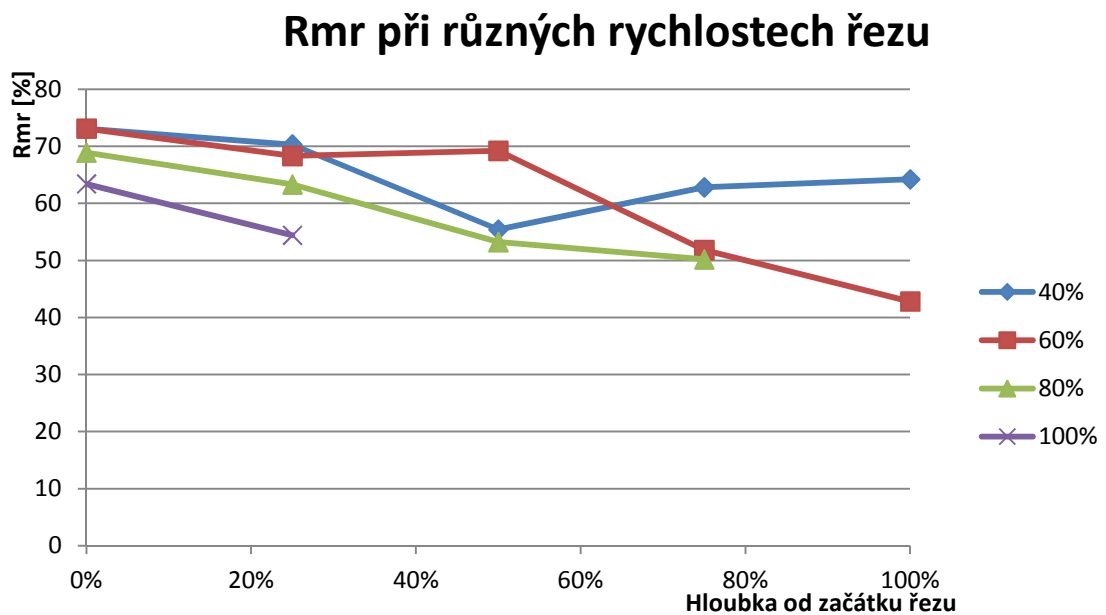
Graf 7 – Závislosti rychlosti řezu a hloubky od vrchní vrstvy vzorku na Ra.

Z Graf 7 jde vidět, že s rostoucí rychlostí řezu roste také hodnota drsnosti Ra. Z naměřených údajů se dá také říci, že čím hlouběji jsme od počátku řezu, tím rychleji hodnoty drsnosti stoupají. Stejná závislost platí také pro hodnoty Rz (viz. Graf 8).

Rz při různých rychlostech řezu



Graf 8 – Závislosti rychlosti řezu a hloubky od vrchní vrstvy vzorku na Rz.



Graf 9 – Závislosti rychlosti řezu a hloubky od vrchní vrstvy vzorku na Rmr.

Ze závislosti hloubky řezu na materiálový podíl lze vyčíst, že čím hlouběji v řezu měříme, tím nižší je materiálový podíl. Tuto závislost nepotvrzuje v grafu pouze čára pro posuvovou rychlost 40%, nicméně tato strana vzorku měla nejlepší jakost a závislosti se na ní neprojevují jako na ostatních stranách.

4.4.2 Šířka štěrbin po řezu

Na pěti vzorcích sendvičových desek byly vytvořeny řezy vodním paprskem. Na každém vzorku bylo vytvořeno vždy 10 řezů na vodním paprsku. U pěti se postupně zvyšovala rychlost posuvu při konstantním tlaku 200 MPa, zatímco u druhé pěti byl naopak proměnný tlak působícího média při stálé posuvové rychlosti 60 %.

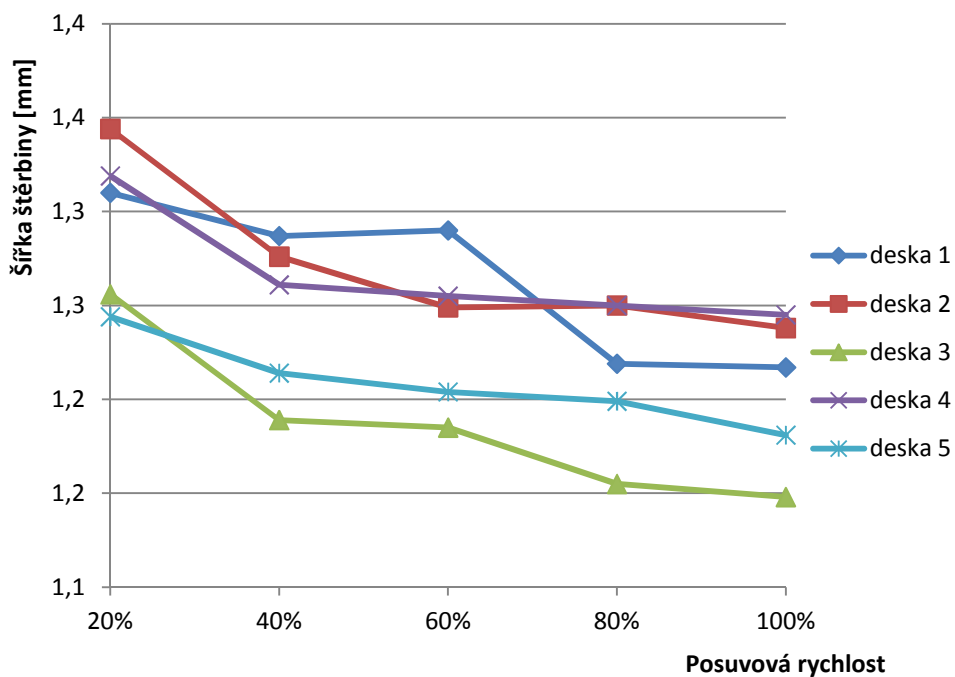
Tabulky s naměřenými hodnotami jsou uvedeny v příloze PII. Níže jsou tabulky s hodnotami aritmetických průměrů naměřených hodnot a variačními rozpětími. Pomocí těchto tabulek byly vytvořeny grafy zobrazující závislosti mezi rychlostí posuvu a tlakem na šířku řezné štěrbině a variační rozpětí naměřených hodnot. Hodnoty variačního rozpětí charakterizují, jak moc je řez nerovnoměrný.

Výsledný řez nejvíce ovlivňují 3 faktory. Jedná se o rychlost řezu, tlak vodního paprsku a hustota řezaného materiálu.

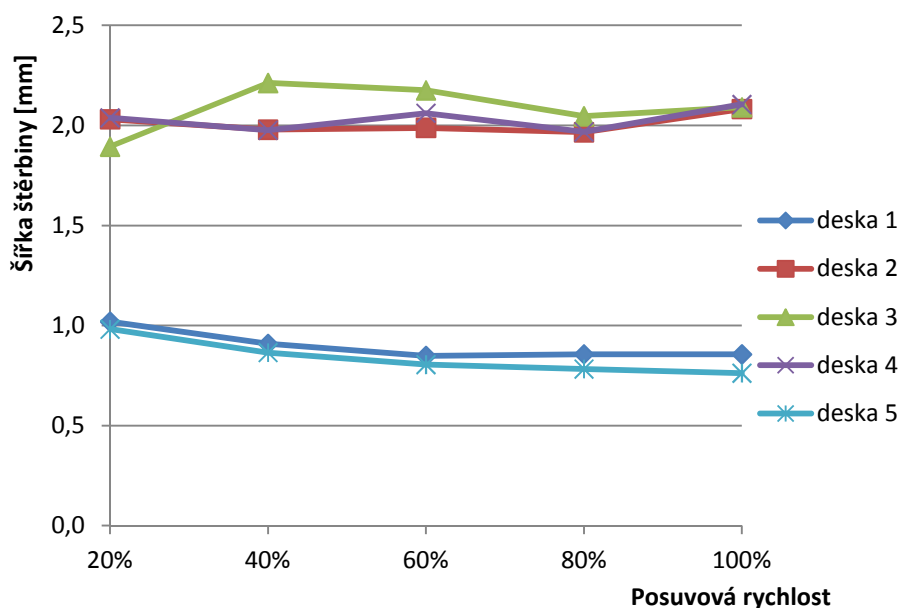
4.4.2.1 Závíslost kvality štěrbin na rychlosti řezu

Tab. 16 – Hodnoty šířky štěrbin podle rychlosti řezu

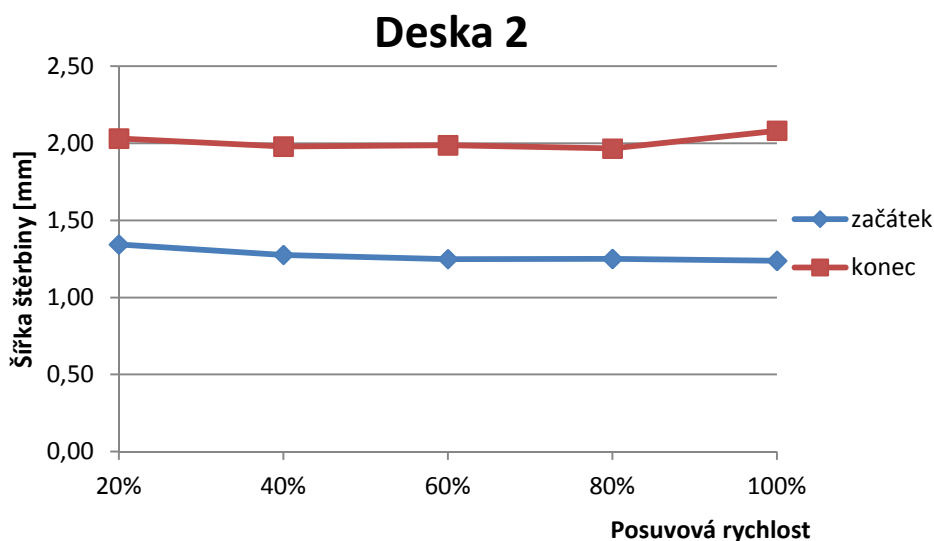
Aritmetický průměr naměřených hodnot [mm]						
Deska	Začátek/konec řezu	20%	40%	60%	80%	100%
1 (zelená)	začátek	1,31	1,29	1,29	1,22	1,22
	konec	1,02	0,91	0,85	0,86	0,86
2 (bílá)	začátek	1,34	1,28	1,25	1,25	1,24
	konec	2,03	1,98	1,99	1,97	2,08
3 (šedá)	začátek	1,26	1,19	1,19	1,16	1,15
	konec	1,89	2,21	2,18	2,05	2,09
4 (černá)	začátek	1,32	1,26	1,26	1,25	1,25
	konec	2,04	1,98	2,06	1,97	2,11
5 (modrá)	začátek	0,98	0,87	0,81	0,78	0,76
	konec	1,24	1,21	1,20	1,20	1,18



Graf 10 – Závíslost šířky štěrbin na posuvové rychlosti (vrchní strana řezu).



Graf 11 – Závislost šířky štěrbin na posuvové rychlosti (spodní strana řezu).



Graf 12 – Závislost šířky štěrbin na posuvové rychlosti (deska 2).

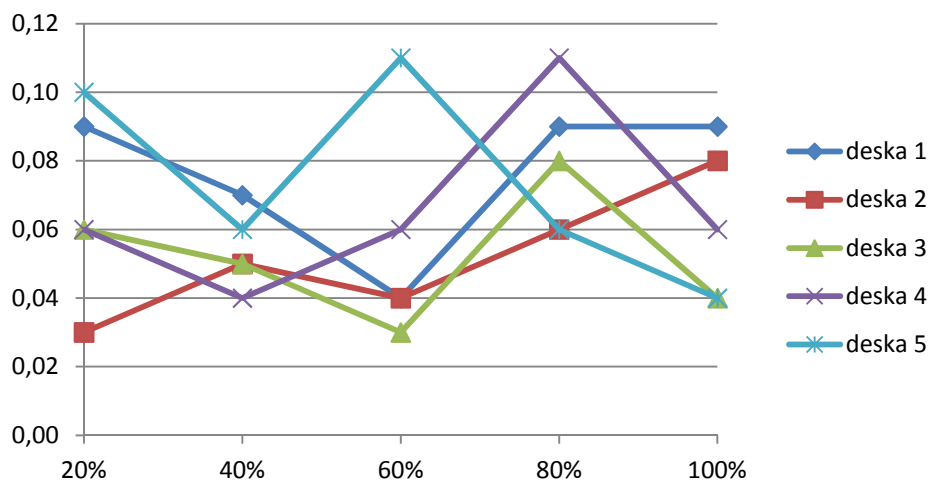
Ze závislostí šířky štěrbin na posuvové rychlosti je možné vypočítat, že na vrchní straně řezu se stoupající rychlostí řezu se štěrbina mírně zužuje, zatímco spodní strana vzorků tuto závislost sdílí pouze u desek s vysokou hustotou (desky 1 a desky 5).

Graf 10 a Graf 11 zobrazují závislosti všech pěti desek najednou. Zatímco v Graf 10 jsou závislosti zobrazeny pro vrchní stranu vzorku (tedy stranu, odkud řez začíná), Graf 11 zobrazuje stranu spodní. Pro větší přehlednost byly vytvořeny grafy, které zobrazují šířku štěrbin na obou stranách současně pro každou desku samostatně. Ukázkou těchto grafů je

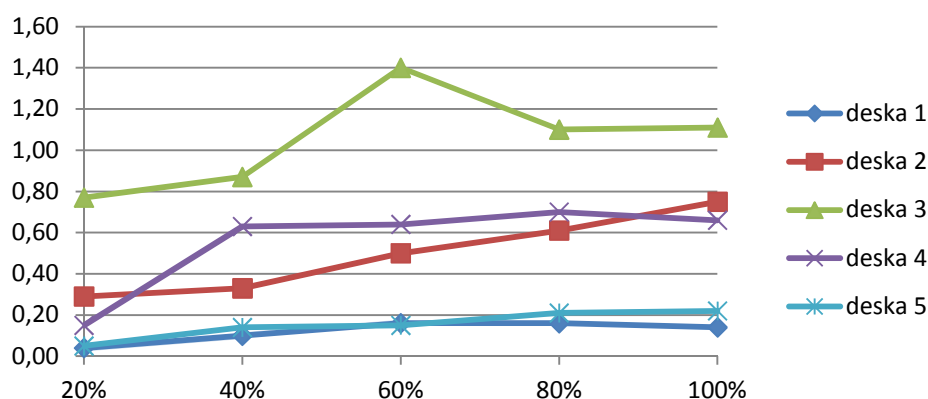
možné vidět v Graf 12. Zbylé grafy jsou zobrazeny v příloze. Totéž platí pro grafy, které zobrazují závislost na tlaku vodního paprsku při řezu a grafy zobrazující závislosti rychlosti a tlaku řezu na variační rozpětí.

Tab. 17 – Hodnoty variačního rozpětí podle rychlosti řezu.

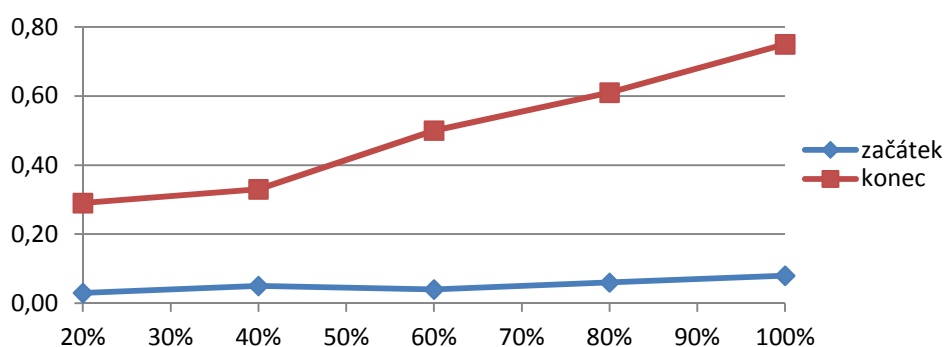
Variační rozpětí naměřených hodnot (proměnná rychlost) [mm]						
	Začátek/konec řezu	20%	40%	60%	80%	100%
deska 1	začátek	0,09	0,07	0,04	0,09	0,09
	konec	0,04	0,10	0,16	0,16	0,14
deska 2	začátek	0,03	0,05	0,04	0,06	0,08
	konec	0,29	0,33	0,50	0,61	0,75
deska 3	začátek	0,06	0,05	0,03	0,08	0,04
	konec	0,77	0,87	1,40	1,10	1,11
deska 4	začátek	0,06	0,04	0,06	0,11	0,06
	konec	0,15	0,63	0,64	0,70	0,66
deska 5	začátek	0,10	0,06	0,11	0,06	0,04
	konec	0,05	0,14	0,15	0,21	0,22



Graf 13 – Závislost variačního rozpětí na rychlosti řezu (vrchní strana řezu).



Graf 14 – Závislost variačního rozpětí na rychlosti řezu (spodní strana řezu).



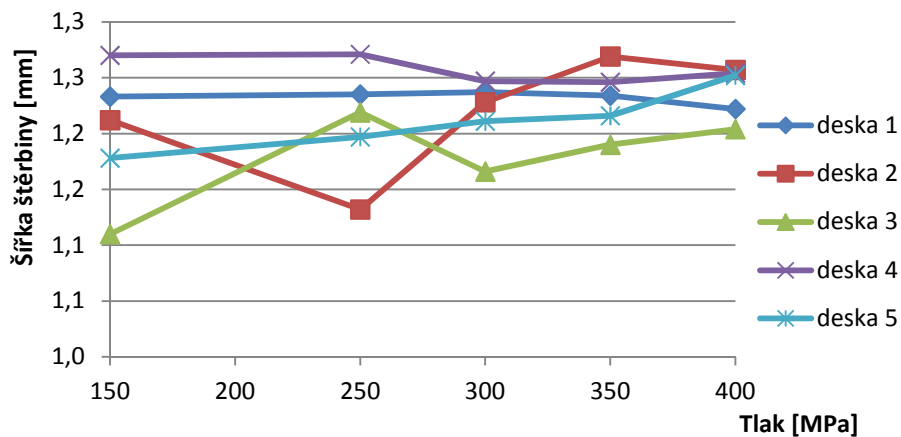
Graf 15 – Závislost variačního rozpětí štěrbině na posuvové rychlosti (deska 2).

Na Graf 14 je možné vidět, že hodnota variačního rozpětí na spodní straně řezu stoupá s rostoucí rychlostí řezu. Čím vyšší rychlostí je tedy řez proveden, tím „zubatější“ a tedy méně kvalitní výsledný řez vznikne.

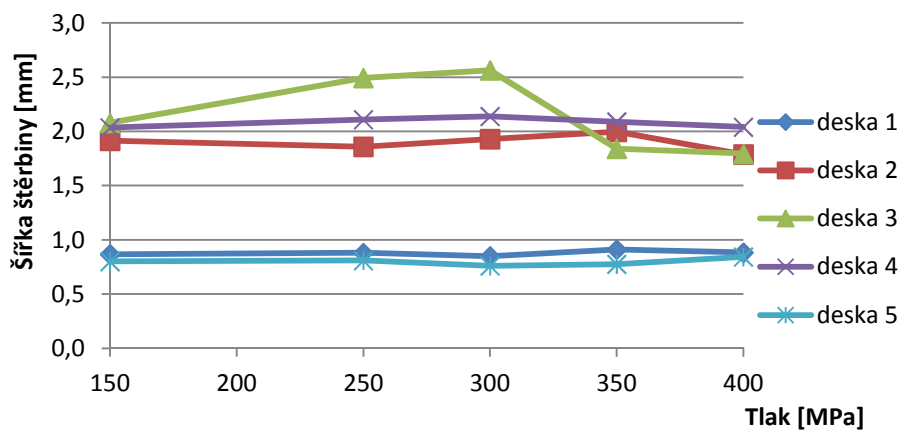
4.4.2.2 Závislost kvality štěrbině na tlaku vodního paprsku

Tab. 18 – Hodnoty šířky štěrbin podle tlaku vodního paprsku.

Aritmetický průměr naměřených hodnot [mm]						
Deska	Začátek/konec řezu	150 MPa	250 MPa	300 MPa	350 MPa	400 MPa
1 (zelená)	začátek	1,23	1,24	1,24	1,23	1,22
	konec	0,87	0,88	0,85	0,91	0,88
2 (bílá)	začátek	1,21	1,13	1,23	1,27	1,26
	konec	1,92	1,86	1,93	2,00	1,79
3 (šedá)	začátek	1,11	1,22	1,17	1,19	1,20
	konec	2,08	2,49	2,56	1,84	1,80
4 (černá)	začátek	1,27	1,27	1,25	1,25	1,25
	konec	2,04	2,11	2,14	2,09	2,04
5 (modrá)	začátek	0,80	0,81	0,76	0,78	0,84
	konec	1,18	1,20	1,21	1,22	1,25



Graf 16 – Závislost šířky štěrbin na tlaku (vrchní strana řezu).

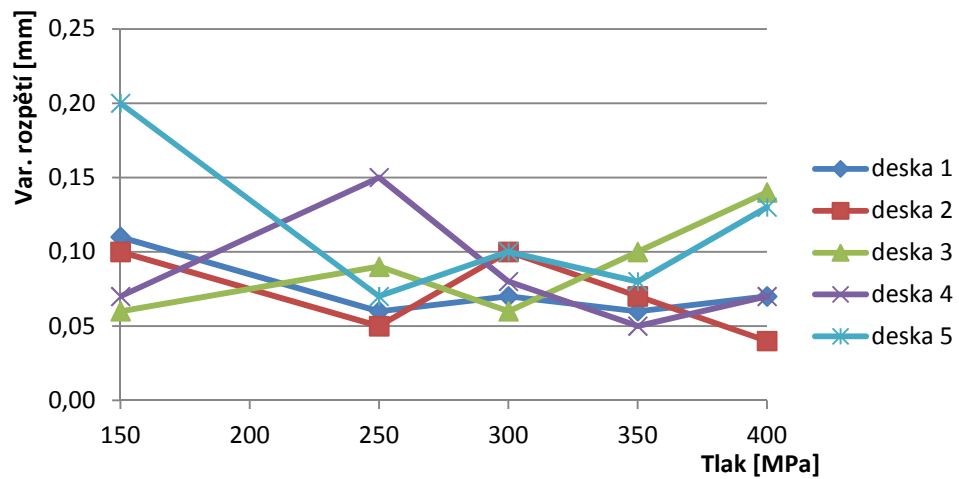


Graf 17 – Závislost šířky štěrbin na tlaku (spodní strana řezu).

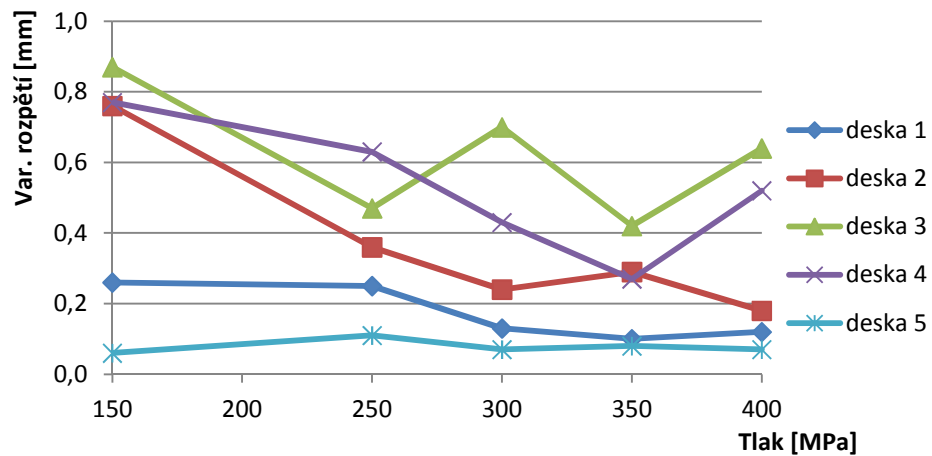
Z naměřených hodnot nelze vypočítat jednoznačnou závislost tlaku na výsledné šířce štěrbin, ať už na začátku či na konci řezu.

Tab. 19 – Hodnoty variačního rozpětí podle tlaku.

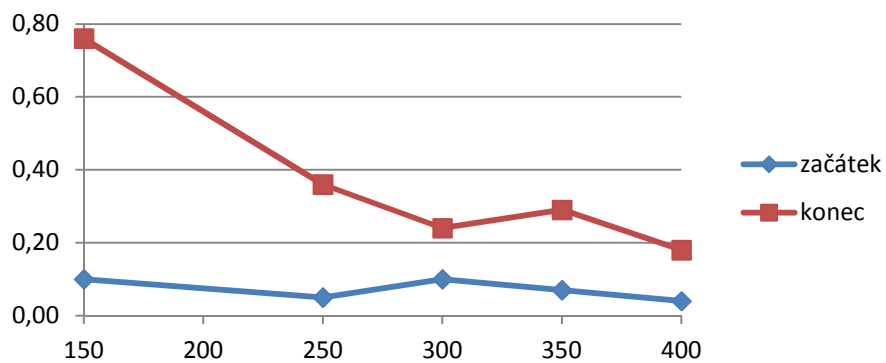
Variační rozpětí naměřených hodnot (proměnná rychlost) [mm]						
	Začátek/konec řezu	150 MPa	250 MPa	300 MPa	350 MPa	400 MPa
deska 1	začátek	0,11	0,06	0,07	0,06	0,07
	konec	0,26	0,25	0,13	0,10	0,12
deska 2	začátek	0,10	0,05	0,10	0,07	0,04
	konec	0,76	0,36	0,24	0,29	0,18
deska 3	začátek	0,06	0,09	0,06	0,10	0,14
	konec	0,87	0,47	0,70	0,42	0,64
deska 4	začátek	0,07	0,15	0,08	0,05	0,07
	konec	0,77	0,63	0,43	0,27	0,52
deska 5	začátek	0,06	0,11	0,07	0,08	0,07
	konec	0,20	0,07	0,10	0,08	0,13



Graf 18 – Závislost variačního rozpětí na tlaku (vrchní strana řezu).



Graf 19 – Závislost variačního rozpětí na tlaku (spodní strana řezu).



Graf 20 – Závislost variačního rozpětí štěrbině na tlaku (deska 2).

Na Graf 19 a Graf 20 je možné vidět, že hodnota variačního rozpětí na spodní straně řezu klesá s rostoucím tlakem. Čím vyšším tlakem je tedy řez proveden, tím rovnější výsledný řez vznikne.

4.4.2.3 Závinnost kvality štěrbin na hustotě materiálu

Z naměřených údajů šířky štěrbin a jejich variačních rozpětí je možné vidět jasnou závislost šířky štěrbin na spodní straně řezu na hustotě řezaného materiálu. A to především při porovnání desky 1 a desky 5 s ostatními. Tyto dvě desky mají oproti ostatním značně vyšší hodnotu hustoty a u těchto dvou desek jako jediných se řez postupně nerozšiřuje, ale naopak zužuje. Abychom tedy mohli docílit stejnoměrné šířky řezu po celé tloušťce materiálu, potřebovali bychom vyrobit sendvičovou desku, která by měla hustotu takovou, aby se řez nerozšiřoval ani nezužoval. Optimální hustota materiálu tedy leží někdy mezi hustotou desky 1 a desky 3.

4.4.3 Příčný tvar řezu

Po naměření šířky štěrbin byly vzorky nařezány příčně, aby bylo možné vyhodnotit jejich příčný tvar.

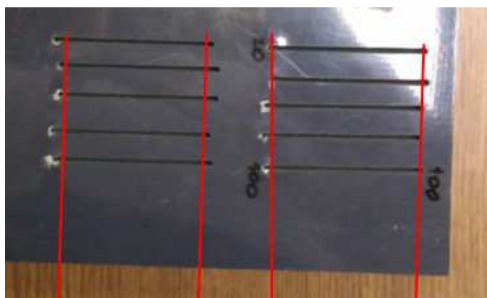
Měření bylo provedeno na kontaktním výškoměru Mitutoyo H0530 (Obr. 60) s rozsahem 30,48 mm, rozlišitelností 0,001 mm a přesností 0,0015 mm při 20 °C. Na vzorky výškoměr působil přítlačnou silou 2,0 N. Dotyk na přístroji byl zvolen plochý, aby nedocházelo k většímu tlaku na pěnu. Tím by došlo ke zkreslování výsledků měření, což se stalo u dotyku s kuličkou. Teplota v laboratoři byla 24,6 °C. Podmínky pro měření tedy nebyly zcela optimální, nicméně pro naše účely dostačující.



Obr. 60 – Výškoměr Mitutoyo H0530.

Pro měření příčného tvaru řezu byly vybrány vzorky ze 3 desek. A to z desky č.2 (bílá), č.3 (šedá) a č.4 (černá), které jsou díky pěnovému jádru znatelně lehčí nežli deska modrá a zelená a pro účel jejich použití tedy vyhovující.

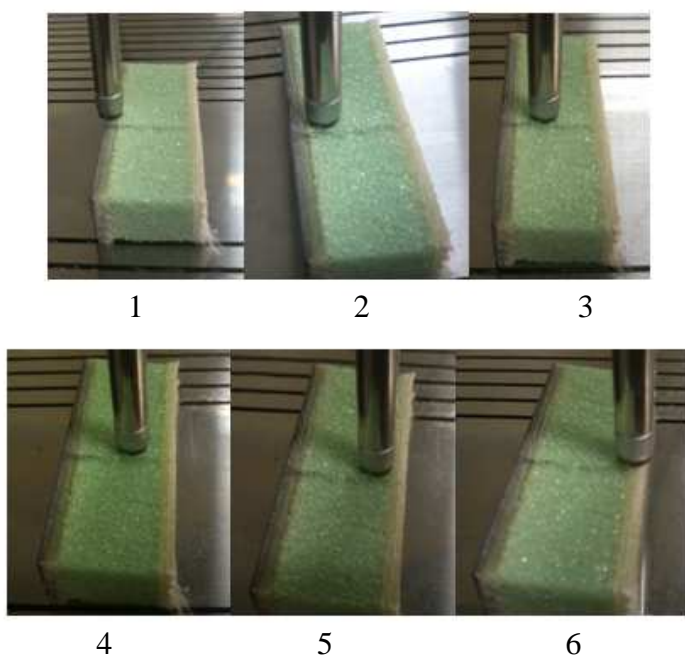
Vzorky byly z desek vyřezány na kotoučové pile tak, že po nařezání vzniklo z každé desky celkem 8 hranolů. Každý má pak na svých dvou stranách řezu vodním paprskem provedené různými posuvovými rychlostmi a různým tlakem (viz Obr. 61).



Obr. 61 – Černá deska s naznačenými řezu kotoučovou pilou.

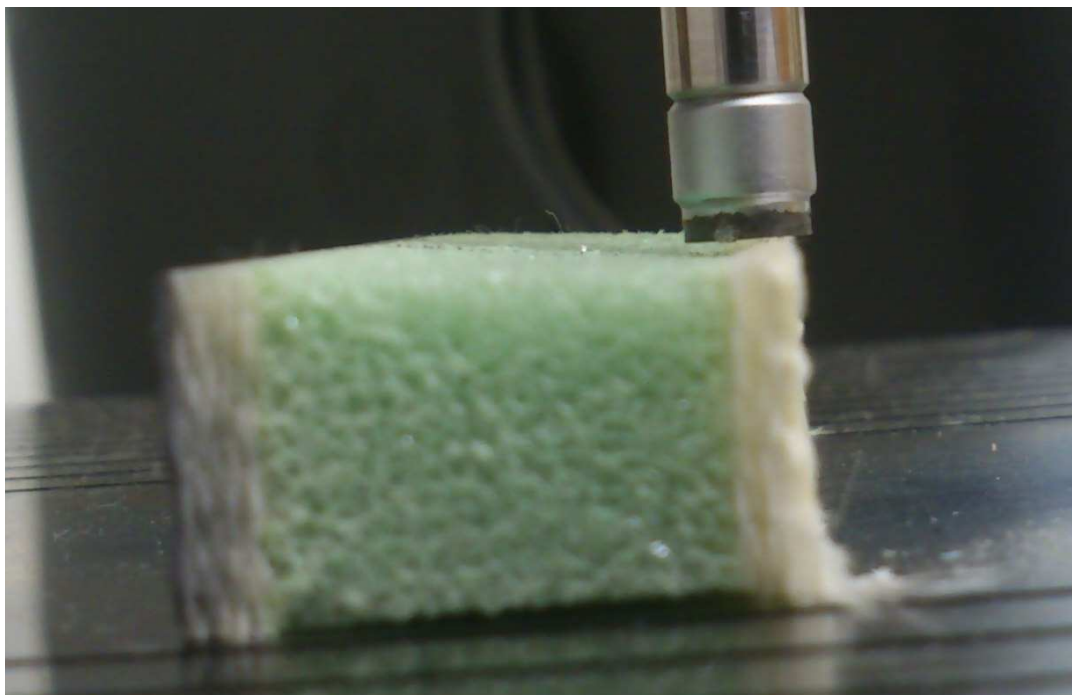
Měření na desce č. 4 (černé)

Před samotným měřením byly na vzorky nanесeny čáry tak, aby byla splněna podmínka opakovatelnosti měření. Poté podél této čáry proběhlo samotné měření, a to celkem na 6 místech podél řezu. Závěrečným opětovným měřením prvního místa byla ověřena přesnost. Jednotlivá měřená místa a jejich číslování lze vidět na Obr. 62. V následující tabulce je pak číslo posledního měření opět výchozím bodem – tedy pozice 7 je rovna pozici 1.



Obr. 62 – Pozice měření příčného tvaru na desce č.4.

Na následujícím obrázku je možné vidět měření plochým dotekem na pozici číslo 6. Je zde vidět tvar vytvořený vodním paprskem a odskok mezi pěnou a skelným vláknem na konci řezu.



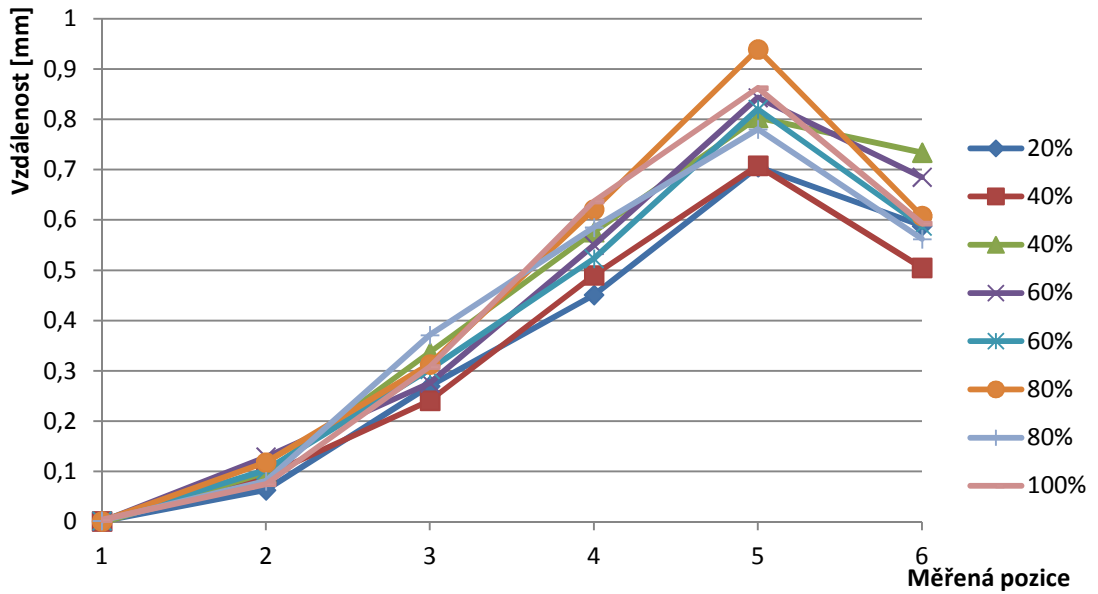
Obr. 63 – Měření příčného tvaru na desce 4 (pozice 6).

Naměřené hodnoty

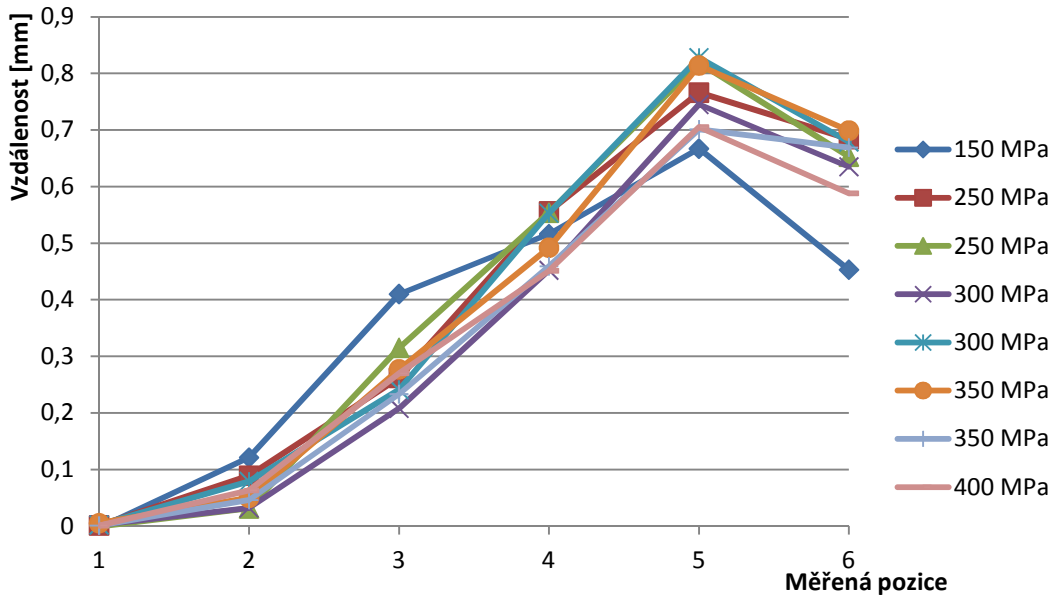
Tab. 20 – Naměřené hodnoty příčného tvaru na desce 4.

Vzorky černé desky [mm]								
	20%	40%	40%	60%	60%	80%	80%	100%
1	0,001	0,001	-0,002	0,001	0,002	0,001	0,002	0,004
2	0,063	0,091	0,098	0,129	0,103	0,118	0,081	0,075
3	0,27	0,241	0,337	0,276	0,303	0,313	0,371	0,308
4	0,451	0,49	0,576	0,55	0,523	0,621	0,585	0,637
5	0,705	0,708	0,803	0,843	0,82	0,939	0,78	0,862
6	0,588	0,505	0,734	0,685	0,588	0,608	0,562	0,593
7	-0,003	0,009	0,001	0,001	0,001	-0,001	-0,001	-0,007
	150 MPa	250 MPa	250 MPa	300 MPa	300 MPa	350 MPa	350 MPa	400 MPa
1	-0,003	0,001	-0,001	0,002	0,002	0,005	0,001	0,001
2	0,121	0,089	0,031	0,032	0,079	0,05	0,046	0,063
3	0,41	0,262	0,315	0,208	0,241	0,277	0,233	0,27
4	0,516	0,556	0,554	0,452	0,553	0,492	0,459	0,451
5	0,667	0,766	0,819	0,745	0,828	0,814	0,701	0,705
6	0,453	0,684	0,653	0,635	0,679	0,699	0,669	0,588
7	-0,002	-0,002	-0,002	-0,002	0,001	0	-0,001	0,003

Grafy



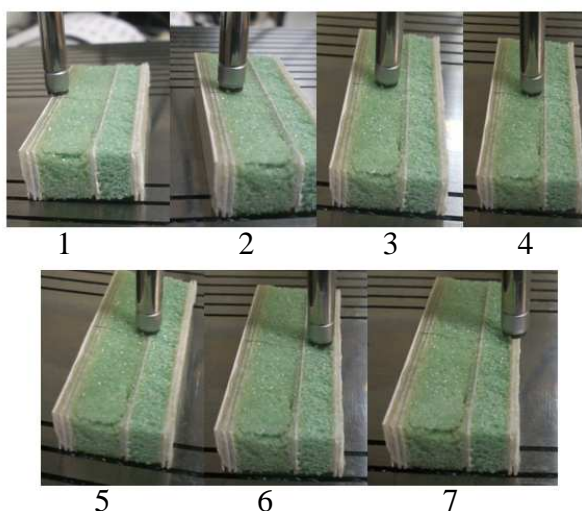
Graf 21 – Průběh příčného tvaru v závislosti na rychlosti řezu (deska 4).



Graf 22 – Průběh příčného tvaru v závislosti na tlaku (deska 4).

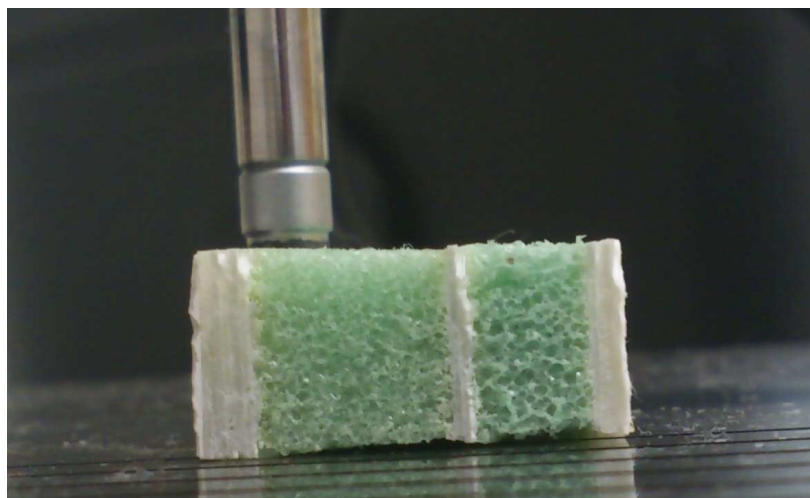
Měření na desce 2 (bílé)

Před samotným měřením byly na vzorky nanесeny čáry tak, aby byla splněna podmínka opakovatelnosti měření. Poté podél této čáry proběhlo samotné měření, a to celkem na 7 místech řezu, a přesnost měření byla nakonec ověřena změřením opět výchozího místa (celkem tedy 8 pozic). Jednotlivá měřená místa a jejich číslování lze vidět na Obr. 64. V následujících tabulkách je pak číslo posledního měření opět výchozím bodem – tedy pozice 8 je rovna pozici 1.



Obr. 64 – Pozice měření příčného tvaru na desce č. 2.

Na Obr. 65 je možné vidět příčný tvar vytvořený vodním paprskem na vzorku vyřezaném z bílé desky. Je zde vidět odskok mezi pěnou a střední vrstvou skelného vlákna a pak mezi pěnou a poslední vrstvou skelné tkaniny.



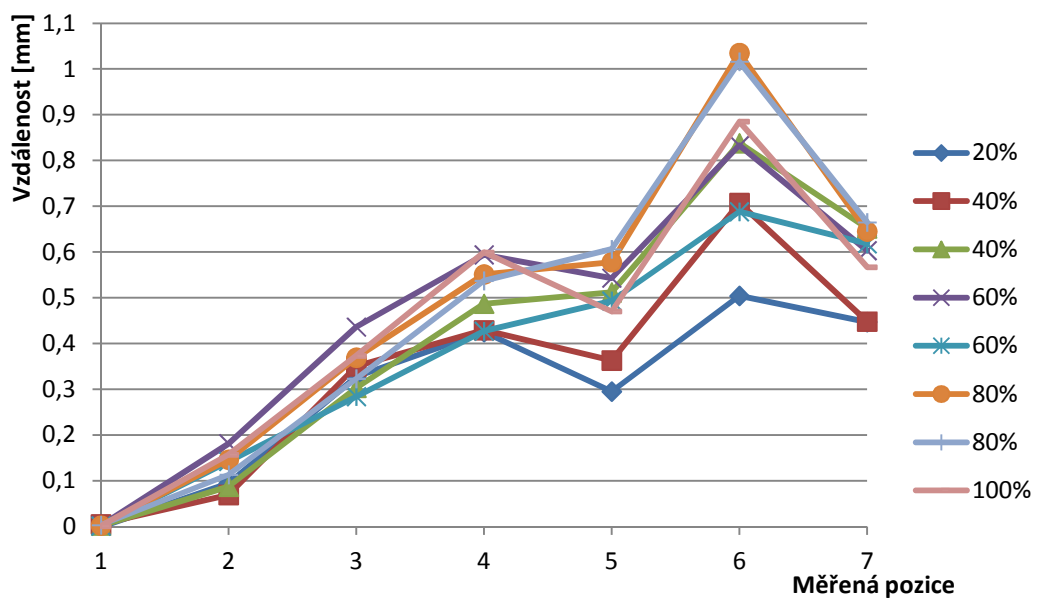
Obr. 65 – Měření příčného tvaru na desce 2 (pozice 2).

Naměřené hodnoty

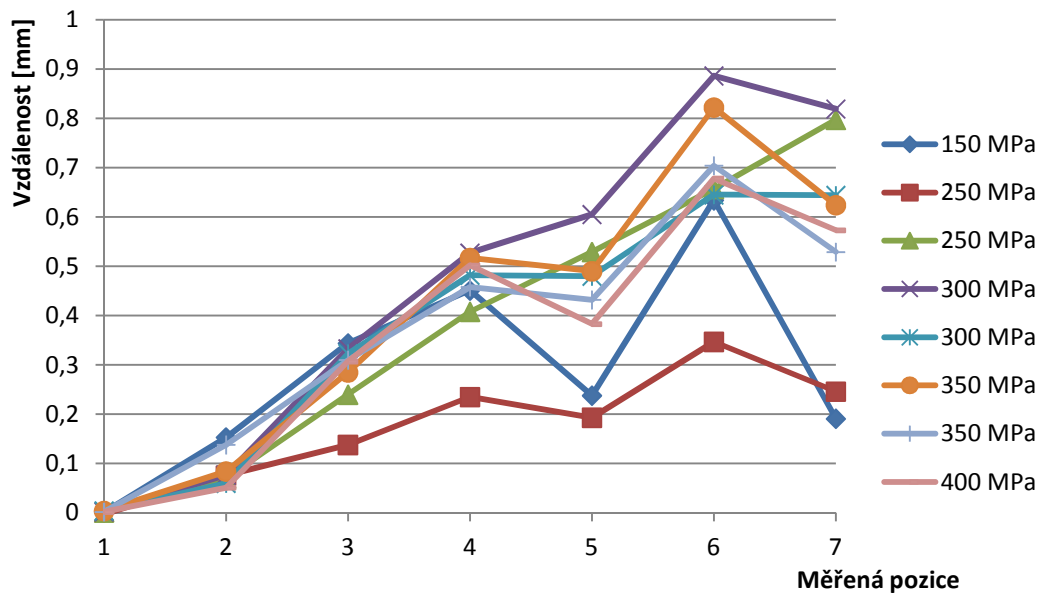
Tab. 21 – Naměřené hodnoty příčného tvaru na desce 2.

Vzorky bílé desky								
	20%	40%	40%	60%	60%	80%	80%	100%
1	-0,002	0,005	0,002	0,002	0,001	0,002	0,003	0,001
2	0,094	0,069	0,087	0,181	0,142	0,146	0,113	0,157
3	0,327	0,35	0,303	0,436	0,284	0,369	0,323	0,373
4	0,425	0,429	0,487	0,594	0,427	0,551	0,537	0,599
5	0,295	0,363	0,512	0,543	0,493	0,578	0,606	0,47
6	0,504	0,707	0,838	0,833	0,688	1,035	1,016	0,885
7	0,447	0,448	0,652	0,603	0,618	0,645	0,665	0,567
8	0,008	-0,003	0,007	0,003	-0,01	0,004	-0,001	0,002
	150 MPa	250 MPa	250 MPa	300 MPa	300 MPa	350 MPa	350 MPa	400 MPa
1	0,001	-0,003	0,001	0,002	0,004	0,004	0,002	0,002
2	0,153	0,076	0,07	0,077	0,06	0,084	0,138	0,051
3	0,344	0,138	0,24	0,333	0,323	0,285	0,31	0,307
4	0,451	0,235	0,408	0,527	0,482	0,517	0,458	0,502
5	0,238	0,193	0,529	0,605	0,48	0,49	0,432	0,383
6	0,634	0,347	0,657	0,886	0,645	0,822	0,704	0,678
7	0,191	0,246	0,797	0,819	0,644	0,624	0,529	0,573
8	0,002	-0,005	0,003	0,005	-0,008	0,004	0,005	0,006

Grafy



Graf 23 – Průběh příčného tvaru v závislosti na rychlosti řezu (deska 2).

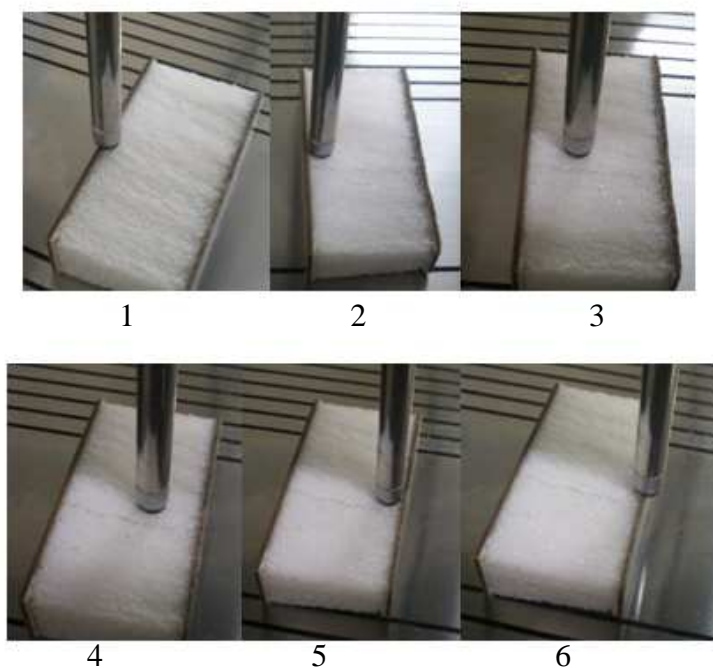


Graf 24 – Průběh příčného tvaru v závislosti na tlaku (deska 2).

Měření na desce 3 (šedé)

Před samotným měřením byly na vzorky naneseny čáry tak, aby byla splněna podmínka opakovatelnosti měření. Poté podél této čáry proběhlo samotné měření, a to celkem na 6 místech řezu, a přesnost měření byla nakonec ověřena opětovným změřením výchozího místa (celkem tedy 7 pozic). Jednotlivá měřená místa a jejich číslování lze vidět na Obr. 66, v následujících tabulkách je pak číslo posledního měření opět výchozím bodem – tedy pozice 7 je rovna pozici 1.

Při řezání na kotoučové pile se na vzorku s řezy o tlaku 150 a 250 MPa oddělila první vrstva polyreye od pěny. Z tohoto důvodu bylo měření na tomto vzorku nepřesné a na jeho výsledky se nelze spoléhat.



Obr. 66 – Pozice měření příčného tvaru na desce č. 3.

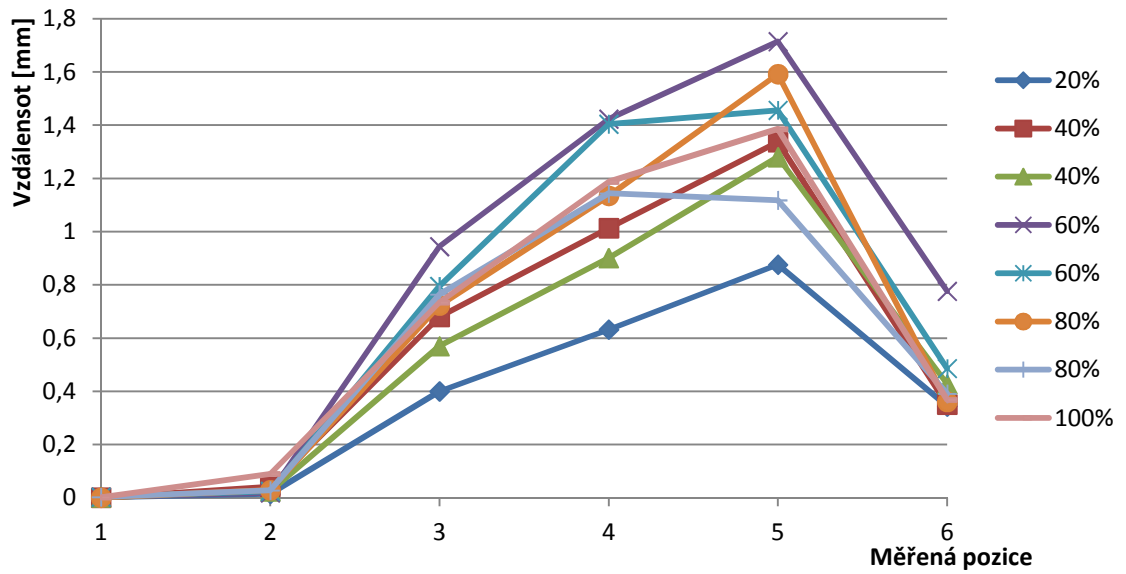
Na vzorcích z šedé desky vodní paprsek vytvořil stopy po jeho řezu (rýhy, které je možné vidět na duralovém vzorku). To je pravděpodobně způsobeno tím, že je na této desce použita tvrdší pěna. Tento faktor nejspíše nejvíce ovlivnil také příčný tvar řezu.

Naměřené hodnoty

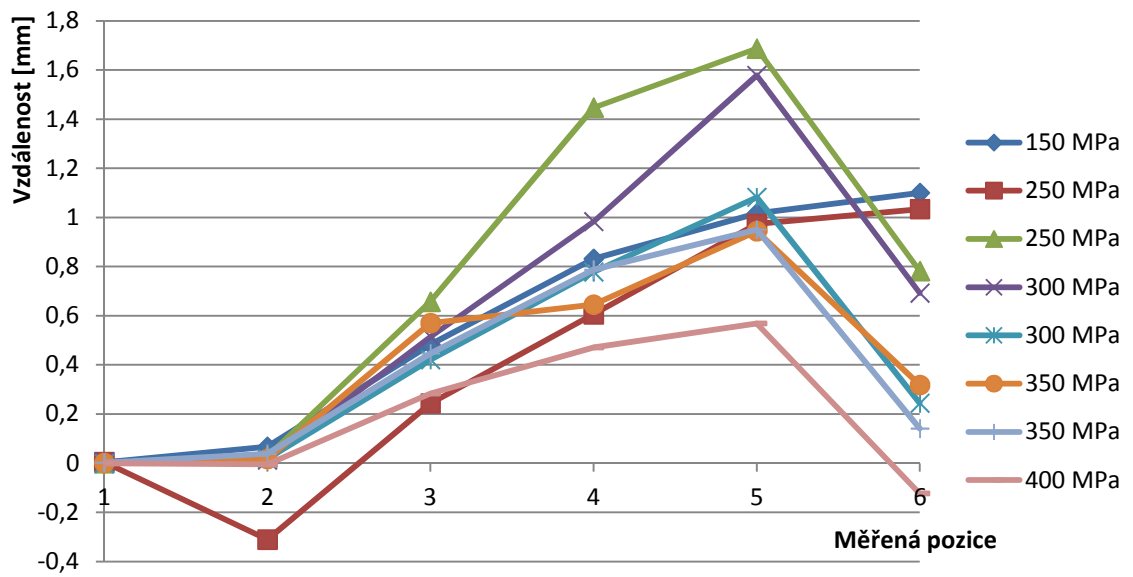
Tab. 22 – Naměřené hodnoty příčného tvaru na desce 3.

Vzorky šedé desky								
	20%	40%	40%	60%	60%	80%	80%	100%
1	0,002	0,001	0,002	0,003	0,003	0,001	0,003	0,002
2	0,015	0,042	0,025	0,019	0,025	0,029	0,028	0,09
3	0,4	0,68	0,57	0,944	0,795	0,723	0,764	0,734
4	0,632	1,013	0,901	1,423	1,404	1,135	1,144	1,187
5	0,876	1,336	1,28	1,714	1,456	1,592	1,118	1,386
6	0,344	0,351	0,427	0,776	0,486	0,361	0,391	0,368
7	0,003	0,001	-0,001	0,005	-0,003	0,005	0,004	-0,001
	150 MPa	250 MPa	250 MPa	300 MPa	300 MPa	350 MPa	350 MPa	400 MPa
1	0,003	0,004	0	0,006	-0,002	0,001	0,002	0
2	0,067	-0,311	0,027	0,013	0,019	0,017	0,038	-0,005
3	0,483	0,243	0,657	0,514	0,421	0,57	0,446	0,283
4	0,831	0,606	1,447	0,983	0,778	0,645	0,787	0,471
5	1,017	0,974	1,687	1,578	1,082	0,944	0,95	0,569
6	1,1	1,034	0,782	0,692	0,244	0,318	0,141	-0,123
7	-0,021	0,046	0,008	0	-0,007	0,003	0,01	0,005

Grafy



Graf 25 – Průběh příčného tvaru v závislosti na rychlosti řezu (deska 3).



Graf 26 – Průběh příčného tvaru v závislosti na tlaku (deska 3).

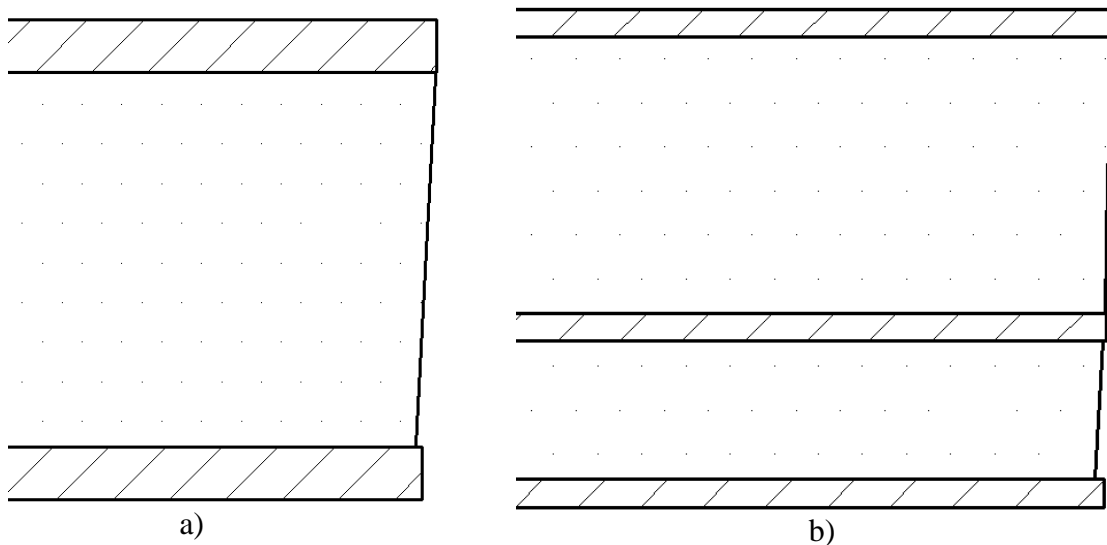
Vyhodnocení

Z grafů vytvořených pomocí naměřených hodnot lze vyčíst, že na přechodu laminát/pěna vzniká vždy „odskok“, který je způsoben různou tuhostí materiálů. Čím hlouběji v řezu se nacházíme, tím vyšší tyto „odskoky“ mohou být.

Závislosti mezi příčným tvarem a rychlostí či tlakem vodního paprsku nejsou nijak patrné a výsledný příčný tvar se zdá být na těchto faktorech nezávislý.

Na výsledcích je zajímavá také skutečnost, že příčný tvar se liší též u řezů o stejném tlaku či stejné rychlosti. To si vysvětluju možností, že tryska vodního paprsku mohla být při řezání vzorků nepatrně natočena a řez pak není symetrický.

Výsledným tvarem příčného řezu je rozšiřující se řez, který na rozhraní dvou materiálů vytvoří odskoky (viz. Obr. 67).



Obr. 67 – Schématicky znázorněný příčný tvar pro desku a) se dvěma vrstvami skelných vláken, b) se třemi vrstvami skelných vláken.

ZÁVĚR

Cílem této práce je zjistit faktory, které ovlivňují kvalitu řezu na sendvičových deskách vyrobených z kompozitních materiálů. Tyto desky by měly být použity pro vytvoření střížných nástrojů pro papírenský průmysl. Je tedy nutné zajistit řezy s přesným rozměrem šířky, tak aby se nerozvíhaly v žádném směru. Řezy jsou provedeny pomocí laseru a vodního paprsku.

Při řezání sendvičových desek s pěnovými jádry na laseru nastaly potíže s vysokou teplotou, která vypalovala pěnu v jádru desek přibližně do vzdálenosti 20 mm. To by zcela znemožnilo využití desek za jejich účelem. Další experimenty tedy probíhaly pomocí vodního paprsku.

Na vodním paprsku bylo vytvořeno celkem 10 řezů na každé z celkového počtu 5 desek. Z toho 3 desky byly s pěnovým jádrem, zatímco zbývající dvě byly z materiálů s mnohem vyšší hustotou. Na každé desce byly vytvořeny řezy rychlostí stroje 20%, 40%, 60%, 80% a 100% s konstantním tlakem 200 MPa. Další pětice řezů byla vytvořena s konstantní rychlostí 60% a měnil se tlak vodního paprsku (150; 250; 300; 350; 400 MPa).

Na takto připravených vzorcích byly měřeny šířky štěrbin na vrchní a spodní straně řezu v závislosti na tlaku vody, rychlosti paprsku a hustotě měřených desek. Nejvýznamnějším faktorem se ukázala hustota vzorků, která ze všech faktorů nejvíce ovlivňuje rozvíhavost či sbíhavost paprsku při řezu materiálem. Zatímco u desek s pěnovými jádry se řez rozvíhal přibližně o 0,8 mm mezi vrchní a spodní stranou vzorku, u desek s vysokou hustotou tomu bylo naopak a šířka zářezu na spodní straně byla menší nežli na straně vrchní. Rychlost řezu pak ovlivňovala šířku zářezu na vrchní straně desek. Tato závislost se projevila užším zářezem při vyšší posuvové rychlosti. Zvyšující posuvová rychlost se ale podepsala negativně na variačním rozpětí měřených hodnot na spodní straně vzorků. Výsledný řez byl tedy jakoby „okousaný“, což bylo způsobeno vyštípováním skelných vláken z kompozitní desky. Pro zvyšující se tlak je závislost na variačním rozpětí opačná, tedy čím vyšším tlakem byl vzorek řezán, tím nižších hodnot variačního rozpětí bylo dosahováno.

Pro zjištění závislosti rychlosti řezu vodním paprskem na drsnost obráběného povrchu bylo provedeno měření dotykovým drsnoměrem na duralovém vzorku tloušťky 25 mm, který byl obráběn rychlostmi 40%, 60%, 80% a 100%. Tato závislost je zde taková, že čím vyšší rychlostí je vodním paprskem obráběno, tím rychleji se v průběhu řezu zhoršuje jakost

povrchu. O rychlosti 100% byly na povrchu jasně zřetelné rýhy, které místy tvořily „scho-
dy“ o výšce až 0,8 mm.

Nakonec bylo provedeno měření příčného tvaru na vyřezaných vzorcích. Největším přínosem tohoto měření bylo zjištění, jaký příčný tvar vodní paprsek na vzorcích vytváří. Tedy to, že při nárazu na tužší materiál má voda snahu se materiálu vyhnout a vytvoří tak odskok. Závislost na rychlosti či tlaku vodního paprsku zde nebyla odhalena žádná a zdá se tedy, že příčný tvar je závislý především na hustotě obráběného materiálu.

Pro vytvoření drážky vhodné pro zasazení střížného nástroje do desky by tedy bylo potřeba zoptimalizovat nejen faktory, jakými jsou rychlost posuvu vodního paprsku a jeho tlak, ale také zoptimalizovat skladbu desky tak, aby byl dosažen co nejoptimálnější příčný tvar.

Dalším řešením by mohla být technologie Laser MicroJet, která kombinuje právě technologie laseru a vodního paprsku. Místo řezu je zde pomocí vody okamžitě chlazeno, takže by nemělo docházet k vypalování pěny, jako tomu je u obyčejného laseru. Tato technologie je však zatím špatně dostupná a nebylo možné tak vytvořit experimentální řezy pomocí tohoto stroje.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MAŇKOVÁ, I. *Progresívne technológie*. Košice: Viena, 2000. ISBN 80-7099-430-4..
- [2] SÝKOROVÁ, L. *Přednášky předmětu Nekonvenční technologie*. FT UTB Zlín, 2011.
- [3] *Nekonvenční metody obrábění 1. až 10. díl* [online]. 2012 [cit. 2012-01-25]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonevncni-metody-obrabeni.html>
- [4] MILIKIČ, D. *Nekonvenční postupci obrábění*. Universitet v Novom Sadu, 2002. ISBN 80-7099-430-4.
- [5] PODOLA, M. *Analýza nekonvenčních technologií*. Zlín, 2008. Bakalářská práce. UTB Zlín.
- [6] KUDĚLKA, J. *Analýza nekonvenčních technologií se zaměřením na elektrotepelné principy*. Zlín, 2008. Bakalářská práce. UTB Zlín.
- [7] JANDÍK, L. *Analýza nekonvenčních technologií se zaměřením na mechanický, chemický a elektrochemický úběr materiálu*. Zlín, 2008. Bakalářská práce. UTB Zlín.
- [8] PECHÁČEK, M. *Hodnocení kvality povrchu při řezání u technologie AWJ a WJM*. Brno, 2010. Diplomová práce. VUT Brno.
- [9] MORÁVEK, R. *Nekonvenční metody obrábění*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 1999. ISBN 80-7082-518-9.
- [10] JANČÁŘ, J. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. 1. vydání Brno: FCH VUT v Brně, 2004, 194 s. ISBN 80-214-2443-5.
- [11] AGARWAL, Bhagwan D. a Lawrence J. BROUTMAN. *Vláknové kompozity*. vydání první. Praha: SNTL, 1987.
- [12] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [13] Systém Renishaw QC10 pro CNC stroje řezající vodním paprskem. *Technický týdeník* [online]. [cit. 2012-01-25]. Dostupné z: <http://www.techtydenik.cz/detail.php?action=show&id=4590&mark=>

- [14] Řezání vodním paprskem. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008(7) [cit. 2012-01-25]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/rezani-vodnim-paprskem.html>
- [15] SVOBODA, Matěj. Jak se řeže vodou a laserem. *ABC* [online]. 2010(15) [cit. 2012-01-25]. Dostupné z: <http://abc.blesk.cz/clanek/technika/10325/jak-se-reze-vodou-a-laserem.html>
- [16] ZELINSKY, Peter. How to Machine Composites, Part 1 - Understanding Composites. *Modern Machine Shop* [online]. 2008 [cit. 2012-01-25]. Dostupné z: <http://www.mmsonline.com/articles/how-to-machine-composites-part-1---understanding-composites>
- [17] Technologie: Co je to vysokotlaký paprsek?. *CHPS s.r.o.* [online]. [cit. 2012-01-25]. Dostupné z: <http://www.chps.cz/vodni-paprsek/technologie.html>
- [18] PTÁČEK, L. *Nauka o materiálu I*. Brno: CERM, 2001. ISBN 80-7204-193-2.
- [19] KOŘÍNEK, Z. *Kompozity* [online]. 2005 [cit. 2012-01-25]. Dostupné z: <http://www.volny.cz/zkorinek/>
- [20] RUSNÁKOVÁ, S. *Přednášky předmětu Vlastnosti kompozitních materiálů*. FT UTB Zlín, 2011.
- [21] SYNOVA. *Synova: The synergy of Fire and Water* [online]. 30.9.2011 [cit. 2012-01-08]. Dostupné z: <http://www.synova.ch/english/synova.html>
- [22] KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 330 s. ISBN 978-80-7204-722-2.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

USM	Ultra Sonic Machining
AJM	Abrasive Jet Machining
WJM	Water Jet Machining
AWJM	Abrasive Water Jet Machining
EDM	Electrical Discharge Machining
LBM	Laser Beam Machining
LM	Laser Machining
LmJ	Laser MicroJet
GF	Glass Fiber
AF	Aramid Fiber
CF	Carbon Fiber
PP	Popolypropylen
PVC	Polyvinylchlorid
PMMA	Polymethylmethakrylát
PE	Polyetylen
PS	Polystyren
PUR	Polyuretan
PAN	Polyakrylonitril

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 - Princip metody pro obrábění ultrazvukem (1 – kapalina, 2 – nástroj, 3 – brousící zrna, 4 – přívod brousících zrn a kapaliny, 5 – obrobek). [4]	16
Obr. 2 - Zařízení pro obrábění ultrazvukem (1 – generátor ultrazvukových kmitů, 2 – systém pro vytvoření mechanických kmitů, 3 – přívod brousících zrn a kapaliny, 4 – obrobek, 5 – nástroj) [4]	16
Obr. 3 – Druhy ultrazvukového obrábění. [1]	17
Obr. 4 - Princip opracování abrazivním paprskem a detail procesu AJM. [1]	17
Obr. 5 - schéma WJM a AWJM [8].....	18
Obr. 6 - Schematické znázornění procesu řezání vodním proudem a dráhy proudu. [1]	19
Obr. 7 - Hlavní komponenty zařízení pro obrábění vodním paprskem. [1].....	20
Obr. 8 - Příklad konstrukce dýzy pro čistý vodní paprsek [1].....	21
Obr. 9 - Konstrukční řešení dýzy pro abrazivní vodní paprsek [5]	21
Obr. 10 - Princip opracování abrazivním paprskem a detail procesu AJM. [3]	24
Obr. 11 – Madel atomu (absorpce, emitace). [2]	25
Obr. 12 - Absorpce, spontánní a stimulovaná emise. [2].....	26
Obr. 13 – Porovnání fokusování bílého a laserového světla. [2].....	27
Obr. 14 - Druhy režimu laserového paprsku. [2, 5].....	31
Obr. 15 - Základní typy konstrukčního řešení. [2, 5]	31
Obr. 16 - Procento rozdělení jednotlivých technologií. [3]	32
Obr. 17 - Kritéria pro hodnocení povrchu po řezání laserem. [1]	34
Obr. 18 - Model tvoření rýh v zóně tavného řezání laserem. [1].....	35
Obr. 19 - Schéma laserové řezací hlavy. [1].....	36
Obr. 20 - Princip Laser-Microjet. [21].....	38
Obr. 21 - Odraz laseru v paprsku vody. [21]	38
Obr. 22 - Závislost tlaku vody na pracovní vzdálenosti Laser-Microjet. [21].....	38
Obr. 23 - Plazmové hořáky s plynovou stabilizací. a) s transferovým obloukem, b) s plynovou stabilizací s netransferovým obloukem, c) s vodní stabilizací [3]	39
Obr. 24 - Princip metody obrábění elektronovým paprskem. [3].....	40
Obr. 25 - Schéma zařízení pro obrábění paprskem elektronů. [3].....	41
Obr. 26 - Účinek dopadu iontů na povrch cíle. [1]	42
Obr. 27 - Princip chemického obrábění. [1]	43

Obr. 28 - Základní princip elektrochemického obrábění. [1]	43
Obr. 29 - Rozdělení kompozitů dle geometrie a orientace výztuže. [19]	45
Obr. 30 - Princip ručního laminování [20]	46
Obr. 31 - Princip RTM technologie. [20]	47
Obr. 32 - Princip vakuové infuze. [20]	48
Obr. 33 - Princip vakuového lisování prepregů [20]	49
Obr. 34 - Princip pultruze se vstřikováním pryskyřice. [19]	50
Obr. 35 - Profily vyrobené pultruzí. [20].....	50
Obr. 36 - Princip navíjení.	51
Obr. 37 - Příklady výrobků vytvořených odvíjením. [20]	52
Obr. 38 - Struktura skleněného vlákna. [12].....	54
Obr. 39 - Struktura ar-(omatického poly)amidu (PPTA). [12]	54
Obr. 40 - Řez aramidovým vláknem se silným roztřepením v místě lomu [12].....	55
Obr. 41 - Orientace řetězců. [12]	55
Obr. 42 - Diagram napětí-deformace různých aramidových vláken (měřeno v kompozitu) [12].....	56
Obr. 43 - Rozdělení uhlíkových vláken (bezprostředně po výrobě). [12]	57
Obr. 44 - Pletené výztuže. [12]	60
Obr. 45 - Druhy vazeb vyztužujících tkanin. [12]	61
Obr. 46 - Obecné schéma řešení úlohy. [22]	62
Obr. 47 - Schéma nože vsazeného do desky.....	65
Obr. 48 - Struktura bílé desky.....	66
Obr. 49 – Struktura černé desky.	66
Obr. 50 - Struktura šedé desky.....	67
Obr. 51 - Forma potřená separačním přípravkem.....	68
Obr. 52 - Desky PVC pěny připravené na výrobu sendvičových desek.....	69
Obr. 53 - Lisování desky vakuem.....	70
Obr. 54 - Vypalování pěny od řezu laserem.	76
Obr. 55 – Systém pro řezání vodním a abrazivním vodním paprskem MACH 3.....	77
Obr. 56 - Nasnímaný povrch při měření pod mikroskopem – řez rychlostí 80%.....	78
Obr. 57 - Nasnímaný povrch při měření pod mikroskopem – řez rychlostí 100%.....	78
Obr. 58 - Jednotlivé strany vzorku s popisem rychlostí, jimiž byly řezány.	78
Obr. 59 - Popis vrstev, ve kterých bylo měření provedeno.	79

Obr. 60 – Výškoměr Mitutoyo H0530.....	88
Obr. 61 – Černá deska s naznačenými řezy kotoučovou pilou.....	89
Obr. 62 – Pozice měření příčného tvaru na desce č.4.....	89
Obr. 63 – Měření příčného tvaru na desce 4 (pozice 6).....	90
Obr. 64 – Pozice měření příčného tvaru na desce č. 2.....	92
Obr. 65 – Měření příčného tvaru na desce 2 (pozice 2).....	92
Obr. 66 – Pozice měření příčného tvaru na desce č. 3.....	95
Obr. 67 – Schématicky znázorněný příčný tvar pro desku a) se dvěma vrstvami skelných vláken, b) se třemi vrstvami skelných vláken.	97

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 - Hustoty výknů různých energetických zdrojů [1].....	28
Tab. 2 - Složení skloviny a důležité vlastnosti neupravených vláken. [12].....	53
Tab. 3 - Mechanické vlastnosti vláken [ehren].....	56
Tab. 4 - Všeobecné srovnání některých vlastností kompozitů. [12].....	57
Tab. 6 - Ceny vláken podle surovin a různých typů. [12]	58
Tab. 5 - Přehled vlastností vláken. [12].....	58
Tab. 7 – Označování desek.	67
Tab. 8 - Očíslování měření sil od frézování.....	71
Tab. 9 – Obvodové frézování - měření č. 1.	71
Tab. 10 - Obvodové frézování - měření č. 2.....	72
Tab. 11 - Obvodové frézování - měření č. 3.....	73
Tab. 12 - Obvodové frézování - měření č. 4.....	73
Tab. 13 - Porovnání Fc MAX v měření 1-4.....	74
Tab. 14 - Frézování drážky – měření č. 5-8.....	75
Tab. 15 - Závislost hodnot Ra, Rz a Rmr na posuvové rychlosti a hloubce řezu.	79
Tab. 16 – Hodnoty šířky štěrbin podle rychlosti řezu.....	82
Tab. 17 – Hodnoty variačního rozpětí podle rychlosti řezu.	84
Tab. 18 – Hodnoty šířky štěrbin podle tlaku vodního paprsku.....	85
Tab. 19 – Hodnoty variačního rozpětí podle tlaku.	86
Tab. 20 – Naměřené hodnoty příčného tvaru na desce 4.....	90
Tab. 21 – Naměřené hodnoty příčného tvaru na desce 2.....	93
Tab. 22 – Naměřené hodnoty příčného tvaru na desce 3.....	95

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 - Obvodové frézování - měření č. 1.....	72
Graf 2 - Obvodové frézování - měření č. 2.....	72
Graf 3 - Obvodové frézování - měření č. 3.....	73
Graf 4 - Obvodové frézování - měření č. 4.....	74
Graf 5 - Porovnání F_c MAX v měření 1-4.....	75
Graf 6 - Frézování drážky - měření 5-8.	76
Graf 7 – Závislosti rychlosti řezu a hloubky od vrchní vrstvy vzorku na R_a	80
Graf 8 – Závislosti rychlosti řezu a hloubky od vrchní vrstvy vzorku na R_z	80
Graf 9 – Závislosti rychlosti řezu a hloubky od vrchní vrstvy vzorku na R_{mr}	81
Graf 10 – Závislost šířky štěrbin na posuvové rychlosti (vrchní strana řezu).	82
Graf 11 – Závislost šířky štěrbin na posuvové rychlosti (spodní strana řezu).	83
Graf 12 – Závislost šířky štěrbin na posuvové rychlosti (deska 2).	83
Graf 13 – Závislost variačního rozpětí na rychlosti řezu (vrchní strana řezu).	84
Graf 14 – Závislost variačního rozpětí na rychlosti řezu (spodní strana řezu).	85
Graf 15 – Závislost variačního rozpětí štěrbin na posuvové rychlosti (deska 2).	85
Graf 16 – Závislost šířky štěrbin na tlaku (vrchní strana řezu).	86
Graf 17 – Závislost šířky štěrbin na tlaku (spodní strana řezu).	86
Graf 18 – Závislost variačního rozpětí na tlaku (vrchní strana řezu).	87
Graf 19 – Závislost variačního rozpětí na tlaku (spodní strana řezu).	87
Graf 20 – Závislost variačního rozpětí štěrbin na tlaku (deska 2).	87
Graf 21 – Průběh příčného tvaru v závislosti na rychlosti řezu (deska 4).	91
Graf 22 – Průběh příčného tvaru v závislosti na tlaku (deska 4).	91
Graf 23 – Průběh příčného tvaru v závislosti na rychlosti řezu (deska 2).	93
Graf 24 – Průběh příčného tvaru v závislosti na tlaku (deska 2).	94
Graf 25 – Průběh příčného tvaru v závislosti na rychlosti řezu (deska 3).	96
Graf 26 – Průběh příčného tvaru v závislosti na tlaku (deska 3).	96

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha PI - Naměřené hodnoty drsnosti na duralu.

Příloha PII - Naměřené hodnoty šířky řezu.

Příloha PIII - Grafy zobrazující závislost šířky zářezu na rychlosti řezu pro jednotlivé desky.

Příloha PIV - Grafy zobrazující závislost šířky zářezu na Tlaku vodního paprsku pro jednotlivé desky.

Příloha PV - Grafy zobrazující závislost variačního rozpětí šířky šterbiny na rychlosti řezu vodního paprsku pro jednotlivé desky.

Příloha PVI - Grafy zobrazující závislost variačního rozpětí šířky šterbiny na tlaku vodního paprsku pro jednotlivé desky.

PŘÍLOHA P I: NAMĚŘENÉ HODNOTY DRSNOSTI NA DURALU

40% rychlost					
		Ra [μm]	Rz [μm]	RSm [μm]	Rmr [%]
začátek průřezu	1	4,29	25,19	143	69
	2	3,57	20,72	135	57
	3	3,13	18,47	126	75
	4	4,27	26,93	170	96
	5	3,43	21,03	139	75
	6	3,33	19,10	133	70
	7	3,65	17,87	126	70
	8	3,88	20,64	122	76
	9	2,97	16,70	126	74
	10	3,13	19,25	114	69
	X	3,57	20,59	133,40	73,10
	φ	0,46	3,21	15,41	9,73
	R	1,32	10,23	56,00	39,00
25% od začátku průřezu	1	6,51	31,83	260	53
	2	5,59	27,70	218	65
	3	5,88	28,78	199	80
	4	6,01	30,41	203	67
	5	5,70	30,46	190	72
	6	6,29	32,18	223	41
	7	6,72	32,30	261	95
	8	6,10	28,98	230	96
	9	5,67	27,88	188	77
	10	6,48	31,33	204	57
	X	6,10	30,19	217,60	70,30
	φ	0,39	1,75	26,34	17,59
	R	1,13	4,60	73,00	55,00
50% průřezu	1	6,73	31,15	230	47
	2	6,56	29,53	221	31
	3	6,73	31,22	241	71
	4	7,11	30,55	288	62
	5	7,41	31,24	227	69
	6	7,10	30,78	275	68
	7	6,99	30,78	268	31
	8	6,37	28,95	233	61
	9	6,47	30,79	221	47
	10	7,11	30,00	350	67
	X	6,86	30,50	255,40	55,40
	φ	0,34	0,77	40,94	15,38
	R	1,04	2,29	129,00	40,00

60% rychlost					
		Ra [μm]	Rz [μm]	RSm [μm]	Rmr [%]
začátek průřezu	1	4,14	23,08	166	72
	2	4,28	28,22	160	90
	3	4,24	24,76	174	83
	4	3,98	25,90	140	88
	5	4,20	24,01	132	77
	6	4,05	26,10	113	38
	7	3,60	20,69	148	74
	8	3,84	21,31	153	71
	9	3,60	21,68	134	74
	10	4,64	26,82	142	64
	X	4,06	24,26	146,20	73,10
	φ	0,32	2,54	17,99	14,69
	R	1,04	7,53	61,00	52,00
25% od začátku průřezu	1	6,21	29,74	242	82
	2	6,64	31,03	227	62
	3	5,97	29,60	187	59
	4	6,64	31,46	283	83
	5	6,98	32,27	234	66
	6	6,21	30,83	187	65
	7	6,43	30,47	225	50
	8	5,85	28,51	222	81
	9	6,85	33,97	224	87
	10	6,45	31,43	237	48
	X	6,42	30,93	226,80	68,30
	φ	0,37	1,52	27,38	14,16
	R	1,13	5,46	96,00	39,00
50% průřezu	1	6,63	30,22	209	53
	2	7,79	33,44	311	72
	3	6,98	30,62	258	60
	4	7,74	31,71	290	64
	5	7,22	32,01	270	75
	6	6,74	30,01	214	68
	7	6,48	28,93	241	67
	8	7,72	31,25	304	63
	9	7,62	32,48	239	84
	10	7,31	30,97	255	86
	X	7,22	31,16	259,10	69,20
	φ	0,49	1,31	35,08	10,34
	R	1,31	4,51	102,00	33,00

40% rychlost					
	Ra [μm]	Rz [μm]	RSm [μm]	Rmr [%]	
75% od začátku průřezu	1	6,64	29,55	218	61
	2	7,92	31,09	364	55
	3	7,39	31,24	275	53
	4	7,67	31,81	377	79
	5	7,80	31,13	300	58
	6	7,72	31,22	383	75
	7	6,93	27,67	236	75
	8	8,10	30,16	321	64
	9	7,57	29,91	289	49
	10	7,50	29,85	263	59
	X	7,52	30,36	302,60	62,80
	φ	0,44	1,21	57,95	10,27
	R	1,46	4,14	165,00	30,00
	konec průřezu	1	11,12	60,78	413
2		9,91	57,06	477	67
3		11,30	63,46	553	67
4		12,30	72,40	483	67
5		11,23	62,03	432	60
6		8,89	50,09	394	57
7		10,72	60,87	467	63
8		9,95	53,63	526	72
9		9,57	53,65	457	63
10		11,65	64,52	471	62
X		10,66	59,85	467,30	64,20
φ		1,05	6,49	48,09	4,24
R		3,41	22,31	159,00	15,00

60% rychlost					
	Ra [μm]	Rz [μm]	RSm [μm]	Rmr [%]	
75% od začátku průřezu	1	7,59	32,76	322	34
	2	9,95	37,90	609	62
	3	10,48	35,38	383	55
	4	10,73	37,05	666	56
	5	11,09	37,27	617	44
	6	8,98	35,65	397	44
	7	8,47	30,73	364	65
	8	9,93	34,39	428	54
	9	10,64	38,21	529	61
	10	10,89	37,23	403	43
	X	9,88	35,66	471,80	51,80
	φ	1,16	2,42	122,51	10,06
	R	3,50	7,48	344,00	31,00
	konec průřezu	1	10,71	63,48	660
2		23,27	162,40	1240	68
3		22,95	126,30	889	54
4		31,15	183,50	2078	58
5		30,85	174,70	1348	50
6		31,26	181,10	1315	25
7		24,18	168,20	1550	14
8		16,74	127,90	918	31
9		25,62	173,00	1483	30
10		11,53	77,58	653	49
X		22,83	143,82	1213,40	42,80
φ		7,65	43,60	444,15	16,90
R		20,55	120,02	1425,00	54,00

80% rychlost					
	Ra [μm]	Rz [μm]	RSm [μm]	Rmr [%]	
začátek průřezu	1	4,10	24,34	131	85
	2	4,58	26,84	203	58
	3	3,98	22,38	156	66
	4	3,72	24,58	184	62
	5	3,36	21,47	120	68
	6	4,47	26,28	156	67
	7	4,11	23,74	155	67
	8	4,12	23,88	157	91
	9	4,50	30,01	139	66
	10	4,22	26,26	116	59
	X	4,12	24,98	151,70	68,90
	φ	0,37	2,46	27,12	10,73
	R	1,22	8,54	87,00	33,00
25% od začátku průřezu	1	6,05	29,15	209	72
	2	8,45	35,73	305	49
	3	7,80	34,29	360	73
	4	7,87	34,57	270	58
	5	8,83	35,38	386	70
	6	8,21	35,16	270	76
	7	9,44	38,12	316	53
	8	10,34	40,29	342	53
	9	7,06	31,13	325	59
	10	5,49	27,48	201	70
	X	7,95	34,13	298,40	63,30
	φ	1,47	3,91	61,03	9,91
	R	4,85	12,81	185,00	27,00
50% průřezu	1	12,14	46,73	503	56
	2	12,49	42,15	577	34
	3	9,58	36,18	484	59
	4	9,66	38,03	341	73
	5	12,04	42,80	454	48
	6	10,85	40,36	637	46
	7	7,76	31,98	266	55
	8	14,88	52,45	686	47
	9	9,79	33,50	428	47
	10	9,48	36,69	422	67
	X	10,87	40,09	479,80	53,20
	φ	2,04	6,23	128,63	11,31
	R	7,12	20,47	420,00	39,00

100% rychlost					
	Ra [μm]	Rz [μm]	RSm [μm]	Rmr [%]	
začátek průřezu	1	4,90	23,65	249	38
	2	5,40	35,77	235	73
	3	5,65	36,73	262	45
	4	5,72	37,28	261	58
	5	5,43	35,06	249	70
	6	5,52	35,25	258	70
	7	5,55	39,72	234	92
	8	6,54	43,99	279	59
	9	7,55	47,18	402	57
	10	6,29	42,00	262	72
	X	5,86	37,66	269,10	63,40
	φ	0,75	6,39	48,59	15,44
	R	2,65	23,53	168,00	54,00
25% od začátku průřezu	1	7,66	33,84	279	37
	2	8,57	35,04	297	61
	3	8,96	36,93	427	54
	4	8,42	35,74	320	60
	5	9,06	36,56	344	39
	6	11,06	45,02	525	52
	7	9,27	38,44	466	44
	8	7,65	35,58	290	54
	9	7,49	31,74	250	86
	10	8,11	34,24	380	57
	X	8,63	36,31	357,80	54,40
	φ	1,06	3,57	89,87	13,88
	R	3,57	13,28	275,00	49,00
50% průřezu	1	mimo měřicí rozsah daného přístroje			
	2				
	3				
	4				
	5				
	6				
	7				
	8				
	9				
	10				

75% od začátku průřezu	1	13,78	52,87	650	66
	2	20,30	70,46	698	32
	3	16,54	62,72	637	40
	4	15,06	55,98	699	43
	5	14,74	53,35	615	58
	6	18,37	66,68	1018	54
	7	19,40	63,14	702	47
	8	14,36	49,85	633	52
	9	20,23	80,02	772	43
	10	14,12	51,52	693	67
	X	16,69	60,66	711,70	50,20
φ	2,64	9,74	116,99	11,35	
R	6,52	30,17	403,00	35,00	
konec průřezu	1	mimo měřicí rozsah daného přístroje			
	2				
	3				
	4				
	5				
	6				
	7				
	8				
	9				
	10				

75% od začátku průřezu	1	mimo měřicí rozsah daného přístroje
	2	
	3	
	4	
	5	
	6	
	7	
	8	
	9	
	10	
konec průřezu	1	mimo měřicí rozsah daného přístroje
	2	
	3	
	4	
	5	
	6	
	7	
	8	
	9	
	10	

PŘÍLOHA P II: NAMĚŘENÉ HODNOTY ŠÍŘKY ŘEZU

Deska č.1 (Zelená)											
		Šířka zářezu s proměnnou rychlostí řezu (při tlaku 200 MPa) [mm]					Šířka zářezu s proměnným tlakem (při rychlosti 60 %) [mm]				
		20%	40%	60%	80%	100 %	150 MPa	250 MPa	300 MPa	350 MPa	400 MPa
Začátek řezu	1	1,32	1,30	1,31	1,28	1,23	1,30	1,25	1,21	1,23	1,24
	2	1,31	1,24	1,29	1,19	1,27	1,26	1,25	1,21	1,23	1,22
	3	1,30	1,28	1,28	1,19	1,20	1,22	1,23	1,26	1,23	1,21
	4	1,34	1,29	1,31	1,20	1,20	1,23	1,25	1,28	1,23	1,23
	5	1,37	1,30	1,27	1,20	1,21	1,23	1,26	1,27	1,25	1,23
	6	1,32	1,27	1,28	1,24	1,18	1,21	1,22	1,21	1,27	1,24
	7	1,28	1,30	1,28	1,25	1,19	1,23	1,23	1,25	1,26	1,19
	8	1,28	1,29	1,28	1,19	1,22	1,24	1,20	1,25	1,22	1,20
	9	1,29	1,29	1,31	1,26	1,24	1,19	1,24	1,21	1,21	1,20
	10	1,29	1,31	1,29	1,19	1,23	1,22	1,22	1,22	1,21	1,26
	X	1,31	1,29	1,29	1,22	1,22	1,23	1,24	1,24	1,23	1,22
	φ	0,03	0,02	0,01	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02
	R	0,09	0,07	0,04	0,09	0,09	0,11	0,06	0,07	0,06	0,07
Konec řezu	1	1,02	0,85	0,79	0,87	0,87	0,90	1,02	0,88	0,93	0,92
	2	1,00	0,95	0,89	0,92	0,84	0,79	0,97	0,83	0,89	0,86
	3	1,04	0,90	0,88	0,80	0,87	0,83	0,77	0,83	0,95	0,87
	4	1,03	0,93	0,95	0,89	0,85	0,79	0,81	0,92	0,90	0,87
	5	1,00	0,89	0,79	0,77	0,89	0,85	0,88	0,81	0,95	0,93
	6	1,04	0,91	0,81	0,78	0,88	0,85	0,81	0,81	0,85	0,96
	7	1,00	0,91	0,84	0,91	0,91	0,93	0,90	0,94	0,88	0,87
	8	1,02	0,92	0,81	0,93	0,83	1,05	0,88	0,81	0,93	0,86
	9	1,03	0,88	0,91	0,79	0,85	0,85	0,89	0,83	0,91	0,86
	10	1,01	0,95	0,81	0,91	0,77	0,84	0,89	0,84	0,92	0,84
	X	1,02	0,91	0,85	0,86	0,86	0,87	0,88	0,85	0,91	0,88
	φ	0,02	0,03	0,06	0,06	0,04	0,08	0,07	0,05	0,03	0,04
	R	0,04	0,10	0,16	0,16	0,14	0,26	0,25	0,13	0,10	0,12

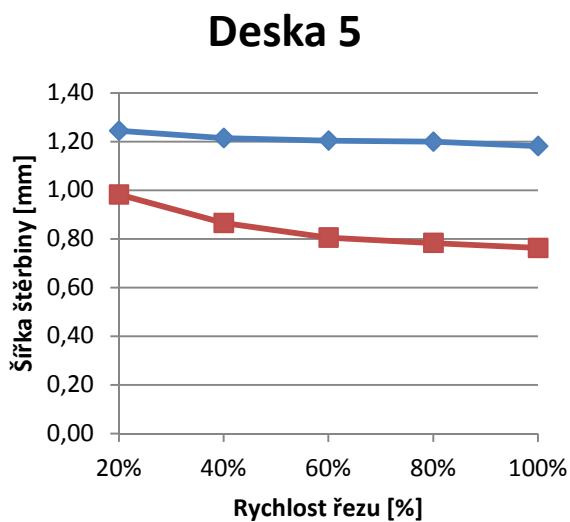
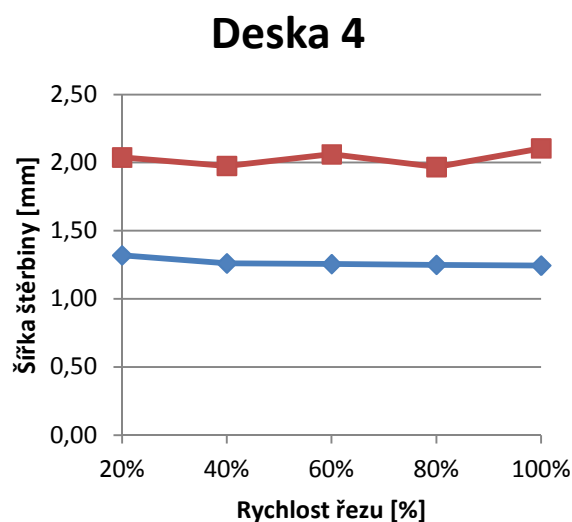
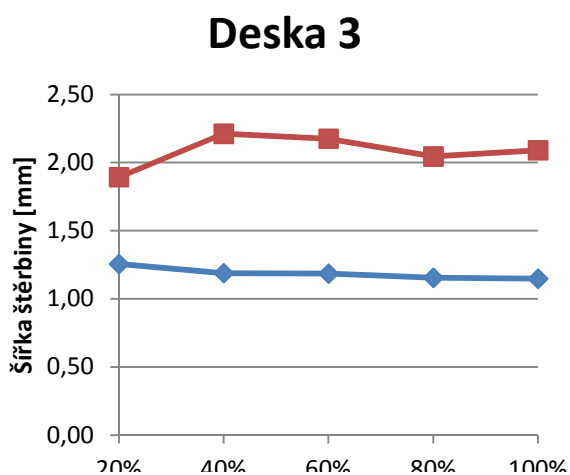
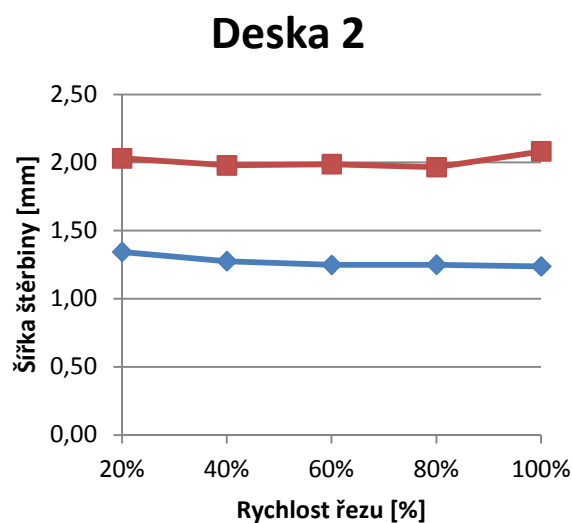
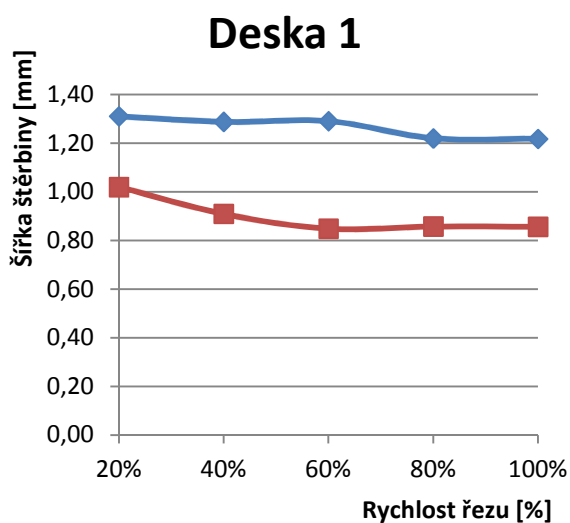
Deska č.2 (Bílá)											
		Šířka zářezu s proměnnou rychlostí řezu (při tlaku 200 MPa) [mm]					Šířka zářezu s proměnným tlakem (při rychlosti 60 %) [mm]				
		20%	40%	60%	80%	100%	150 MPa	250 MPa	300 MPa	350 MPa	400 MPa
Začátek řezu	1	1,33	1,31	1,25	1,25	1,25	1,27	1,15	1,29	1,26	1,28
	2	1,36	1,26	1,24	1,25	1,21	1,22	1,13	1,22	1,29	1,25
	3	1,36	1,29	1,23	1,26	1,23	1,17	1,14	1,26	1,25	1,26
	4	1,34	1,26	1,25	1,29	1,23	1,19	1,11	1,21	1,29	1,24
	5	1,33	1,29	1,25	1,25	1,25	1,22	1,12	1,23	1,28	1,27
	6	1,35	1,28	1,25	1,23	1,28	1,22	1,15	1,21	1,30	1,24
	7	1,34	1,26	1,25	1,23	1,25	1,19	1,16	1,19	1,25	1,27
	8	1,34	1,27	1,27	1,25	1,20	1,26	1,13	1,27	1,25	1,24
	9	1,35	1,26	1,25	1,24	1,22	1,20	1,12	1,20	1,23	1,27
	10	1,34	1,28	1,25	1,25	1,26	1,18	1,11	1,20	1,29	1,25
	X	1,34	1,28	1,25	1,25	1,24	1,21	1,13	1,23	1,27	1,26
	φ	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02	0,01
	R	0,03	0,05	0,04	0,06	0,08	0,10	0,05	0,10	0,07	0,04
Konec řezu	1	2,09	2,14	2,17	1,70	1,91	1,60	1,87	1,87	2,04	1,80
	2	2,05	2,02	2,19	2,25	2,21	2,08	1,86	1,80	1,90	1,68
	3	2,02	2,08	1,76	2,04	2,45	1,92	1,97	2,04	1,93	1,78
	4	1,98	2,14	2,08	1,99	2,23	1,53	2,02	1,90	2,00	1,85
	5	2,19	1,98	2,22	1,97	1,99	2,29	1,86	2,02	2,00	1,70
	6	2,08	1,85	1,72	2,19	2,18	2,11	1,73	1,84	2,10	1,79
	7	2,02	1,88	1,96	1,76	2,17	2,21	1,85	1,91	2,18	1,86
	8	1,90	1,81	1,87	2,27	2,02	1,91	1,66	1,97	1,89	1,82
	9	1,94	1,90	1,77	1,66	1,96	1,82	1,85	1,97	2,04	1,85
	10	2,04	1,99	2,14	1,83	1,70	1,68	1,92	1,98	1,90	1,76
	X	2,03	1,98	1,99	1,97	2,08	1,92	1,86	1,93	2,00	1,79
	φ	0,08	0,12	0,20	0,22	0,21	0,26	0,10	0,08	0,10	0,06
	R	0,29	0,33	0,50	0,61	0,75	0,76	0,36	0,24	0,29	0,18

Deska č.3 (Šedá)											
		Šířka zářezu s proměnnou rychlostí řezu (při tlaku 200 MPa) [mm]					Šířka zářezu s proměnným tlakem (při rychlosti 60 %) [mm]				
		20%	40%	60%	80%	100%	150 MPa	250 MPa	300 MPa	350 MPa	400 MPa
Začátek řezu	1	1,25	1,20	1,19	1,21	1,15	1,15	1,20	1,14	1,24	1,30
	2	1,26	1,20	1,20	1,17	1,13	1,10	1,23	1,15	1,19	1,18
	3	1,27	1,20	1,17	1,13	1,14	1,11	1,22	1,17	1,16	1,21
	4	1,24	1,19	1,20	1,15	1,17	1,11	1,24	1,16	1,14	1,23
	5	1,24	1,20	1,20	1,13	1,15	1,11	1,27	1,20	1,18	1,16
	6	1,24	1,18	1,20	1,13	1,15	1,09	1,25	1,16	1,17	1,18
	7	1,26	1,16	1,18	1,14	1,13	1,12	1,20	1,19	1,18	1,21
	8	1,25	1,16	1,17	1,17	1,14	1,11	1,18	1,15	1,20	1,17
	9	1,25	1,19	1,17	1,18	1,15	1,10	1,21	1,17	1,22	1,19
	10	1,30	1,21	1,17	1,14	1,17	1,10	1,19	1,17	1,22	1,21
	X	1,26	1,19	1,19	1,16	1,15	1,11	1,22	1,17	1,19	1,20
	φ	0,02	0,02	0,01	0,03	0,01	0,02	0,03	0,02	0,03	0,04
	R	0,06	0,05	0,03	0,08	0,04	0,06	0,09	0,06	0,10	0,14
	Konec řezu	1	1,74	2,59	2,10	2,40	2,12	2,39	2,67	2,99	1,84
2		1,74	1,95	2,29	2,09	2,23	2,13	2,38	2,77	1,76	1,83
3		1,93	2,69	1,50	1,79	1,80	2,07	2,65	2,50	1,76	1,64
4		2,06	1,82	1,78	2,48	2,33	2,15	2,37	2,59	2,03	1,93
5		2,29	2,13	2,69	1,93	2,54	1,52	2,70	2,53	2,07	1,58
6		1,83	2,04	2,36	1,42	1,58	1,83	2,35	2,29	1,76	1,49
7		1,52	1,99	1,40	2,15	1,94	2,20	2,50	2,44	1,65	1,91
8		1,75	2,57	2,80	2,52	2,49	2,13	2,23	2,39	1,75	1,75
9		2,04	2,50	2,69	1,44	2,45	2,20	2,64	2,77	1,89	1,74
10		2,04	1,84	2,15	2,24	1,43	2,18	2,45	2,37	1,91	1,95
X		1,89	2,21	2,18	2,05	2,09	2,08	2,49	2,56	1,84	1,80
φ		0,22	0,34	0,49	0,40	0,39	0,24	0,16	0,22	0,13	0,19
R		0,77	0,87	1,40	1,10	1,11	0,87	0,47	0,70	0,42	0,64

Deska č.4 (černá)											
		Šířka zářezu s proměnnou rychlostí řezu (při tlaku 200 MPa) [mm]					Šířka zářezu s proměnným tlakem (při rychlosti 60 %) [mm]				
		20%	40%	60%	80%	100%	150 MPa	250 MPa	300 MPa	350 MPa	400 MPa
Začátek řezu	1	1,30	1,27	1,24	1,28	1,28	1,25	1,30	1,28	1,26	1,28
	2	1,33	1,28	1,24	1,24	1,25	1,24	1,26	1,23	1,27	1,22
	3	1,33	1,25	1,24	1,25	1,25	1,26	1,24	1,28	1,23	1,24
	4	1,33	1,27	1,29	1,31	1,26	1,24	1,20	1,21	1,27	1,24
	5	1,33	1,24	1,28	1,26	1,24	1,31	1,29	1,25	1,24	1,28
	6	1,35	1,24	1,28	1,25	1,22	1,29	1,25	1,23	1,22	1,25
	7	1,29	1,26	1,25	1,20	1,22	1,25	1,27	1,25	1,23	1,23
	8	1,30	1,28	1,25	1,24	1,22	1,29	1,25	1,23	1,25	1,26
	9	1,31	1,27	1,25	1,24	1,24	1,30	1,30	1,22	1,25	1,29
	10	1,32	1,25	1,23	1,23	1,27	1,27	1,35	1,29	1,24	1,25
	X	1,32	1,26	1,26	1,25	1,25	1,27	1,27	1,25	1,25	1,25
	φ	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03	0,04	0,03	0,02	0,02
	R	0,06	0,04	0,06	0,11	0,06	0,07	0,15	0,08	0,05	0,07
	Konec řezu	1	2,05	1,71	1,85	1,70	1,76	1,53	2,11	1,95	1,92
2		1,98	2,01	2,23	1,98	2,16	2,26	1,69	2,38	2,19	1,86
3		2,00	1,83	2,11	1,88	2,41	2,17	1,71	2,34	2,19	2,14
4		2,08	2,24	1,68	2,37	1,93	2,26	2,27	2,10	2,06	2,28
5		2,01	2,34	1,87	2,05	2,20	1,64	2,28	2,18	2,10	2,08
6		2,13	1,95	2,25	1,67	2,14	2,27	2,04	2,22	2,09	1,93
7		2,13	1,97	2,22	1,94	1,75	1,83	2,24	1,98	2,19	1,76
8		2,01	2,01	2,32	1,87	2,20	1,99	2,32	1,98	2,04	2,21
9		2,01	1,94	2,17	2,19	2,23	2,10	2,16	2,06	1,99	2,19
10		1,98	1,76	1,91	2,03	2,27	2,30	2,28	2,20	2,12	2,09
X		2,04	1,98	2,06	1,97	2,11	2,04	2,11	2,14	2,09	2,04
φ		0,06	0,20	0,22	0,21	0,22	0,28	0,23	0,15	0,09	0,18
R		0,15	0,63	0,64	0,70	0,66	0,77	0,63	0,43	0,27	0,52

Deska č.5 (modrá)											
		Šířka zářezu s proměnnou rychlostí řezu (při tlaku 200 MPa) [mm]					Šířka zářezu s proměnným tlakem (při rychlosti 60 %) [mm]				
		20%	40%	60%	80%	100%	150 MPa	250 MPa	300 MPa	350 MPa	400 MPa
Začátek řezu	1	0,96	0,88	0,86	0,81	0,85	0,90	0,85	0,78	0,75	0,90
	2	0,99	0,83	0,77	0,75	0,74	0,80	0,82	0,75	0,76	0,79
	3	1,01	0,83	0,79	0,69	0,74	0,80	0,82	0,78	0,82	0,80
	4	0,99	0,90	0,80	0,84	0,63	0,78	0,80	0,74	0,77	0,81
	5	1,01	0,96	0,76	0,90	0,78	0,92	0,83	0,78	0,79	0,84
	6	0,98	0,89	0,75	0,87	0,74	0,76	0,82	0,73	0,79	0,81
	7	0,98	0,82	0,75	0,75	0,81	0,77	0,79	0,74	0,78	0,86
	8	0,98	0,82	0,90	0,79	0,85	0,72	0,79	0,75	0,74	0,92
	9	0,96	0,83	0,85	0,72	0,73	0,77	0,80	0,74	0,78	0,84
	10	0,96	0,89	0,82	0,71	0,75	0,79	0,78	0,83	0,79	0,87
	X	0,98	0,87	0,81	0,78	0,76	0,80	0,81	0,76	0,78	0,84
	φ	0,02	0,05	0,05	0,07	0,07	0,06	0,02	0,03	0,02	0,04
	R	0,05	0,14	0,15	0,21	0,22	0,20	0,07	0,10	0,08	0,13
Konec řezu	1	1,31	1,20	1,23	1,22	1,17	1,17	1,19	1,25	1,22	1,26
	2	1,24	1,23	1,26	1,22	1,17	1,16	1,15	1,19	1,24	1,26
	3	1,23	1,24	1,20	1,19	1,18	1,17	1,20	1,23	1,19	1,23
	4	1,22	1,21	1,19	1,17	1,18	1,19	1,20	1,18	1,18	1,27
	5	1,23	1,18	1,15	1,18	1,19	1,19	1,15	1,18	1,26	1,26
	6	1,26	1,23	1,16	1,23	1,21	1,21	1,25	1,23	1,23	1,29
	7	1,21	1,20	1,17	1,21	1,17	1,17	1,17	1,18	1,22	1,22
	8	1,24	1,21	1,25	1,19	1,18	1,19	1,26	1,20	1,20	1,22
	9	1,24	1,21	1,22	1,20	1,17	1,18	1,19	1,23	1,19	1,25
	10	1,26	1,23	1,21	1,18	1,19	1,15	1,21	1,24	1,23	1,26
	X	1,24	1,21	1,20	1,20	1,18	1,18	1,20	1,21	1,22	1,25
	φ	0,03	0,02	0,04	0,02	0,01	0,02	0,04	0,03	0,03	0,02
	R	0,10	0,06	0,11	0,06	0,04	0,06	0,11	0,07	0,08	0,07

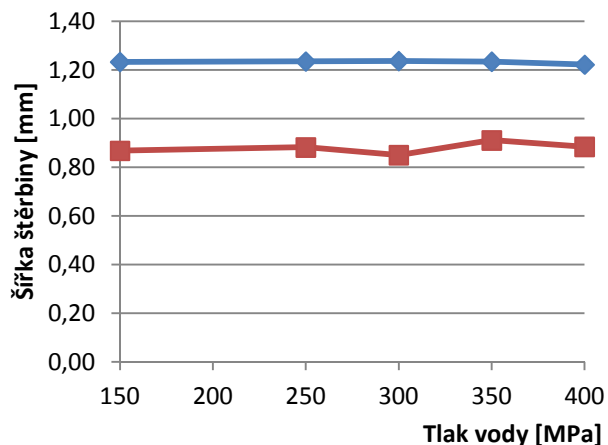
PŘÍLOHA P III: GRAFY ZOBRAZUJÍCÍ ZÁVISLOST ŠÍŘKY ZÁŘEZU NA RYCHLOSTI ŘEZU PRO JEDNOTLIVÉ DESKY



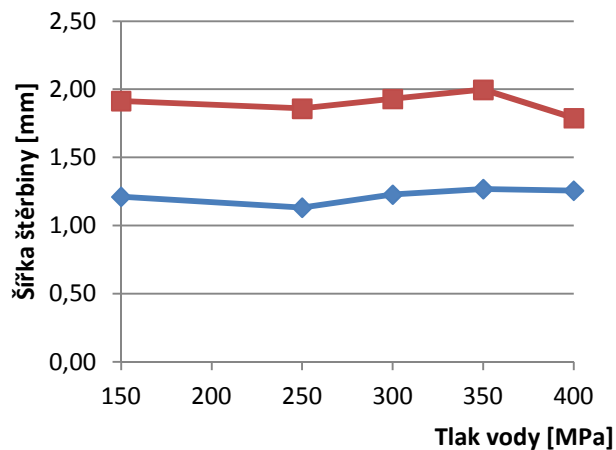
—◆— Začátek řezu
—■— Konec řezu

PŘÍLOHA P IV: GRAFY ZOBRAZUJÍCÍ ZÁVISLOST ŠÍŘKY ZÁŘEZU NA TLAKU VODNÍHO PAPRSKU PRO JEDNOTLIVÉ DESKY

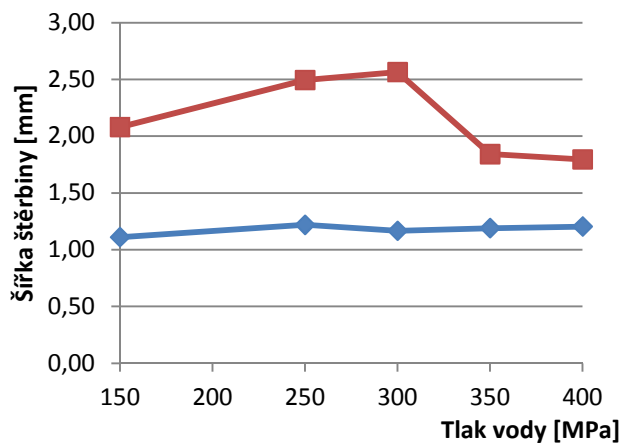
Deska 1



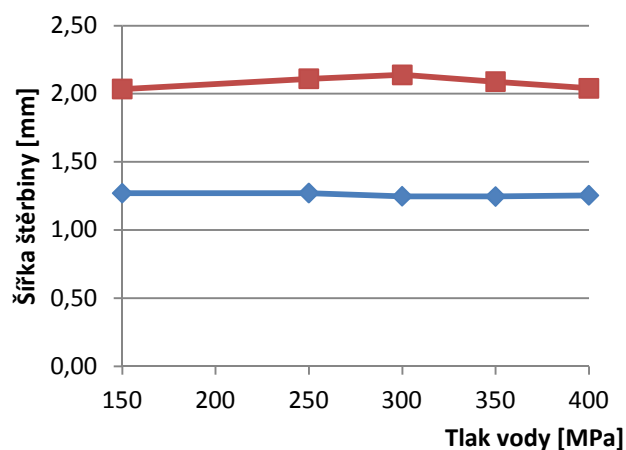
Deska 2



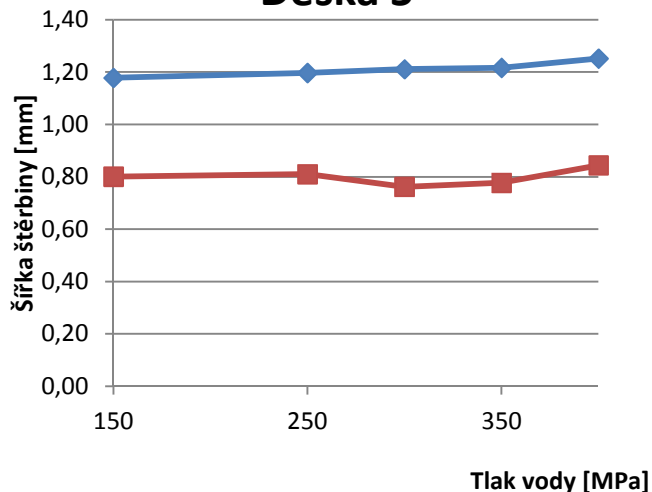
Deska 3



Deska 4

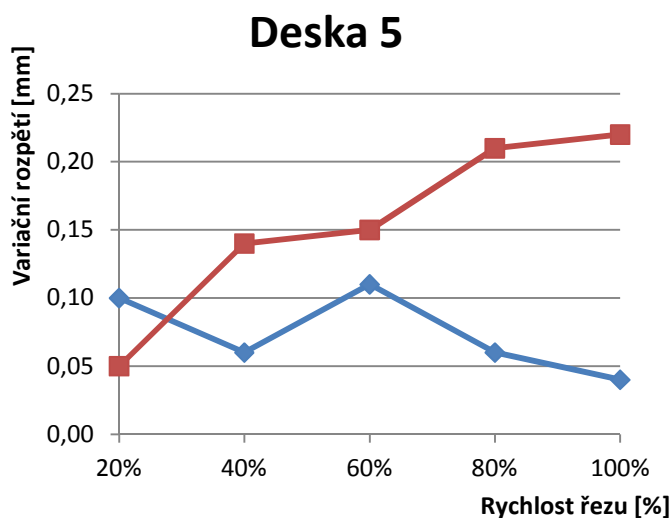
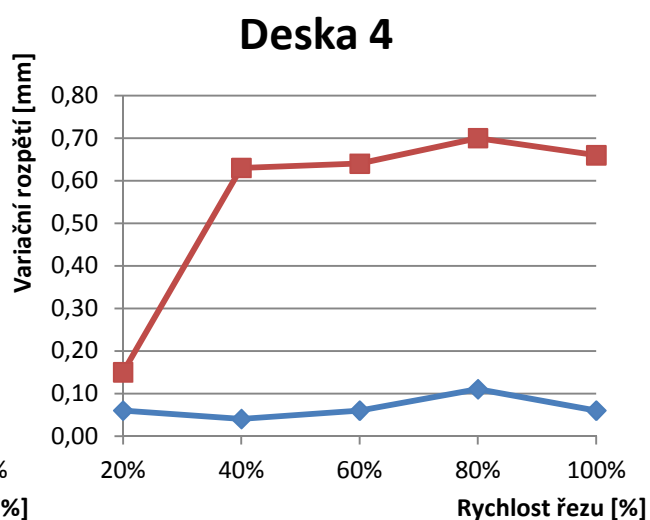
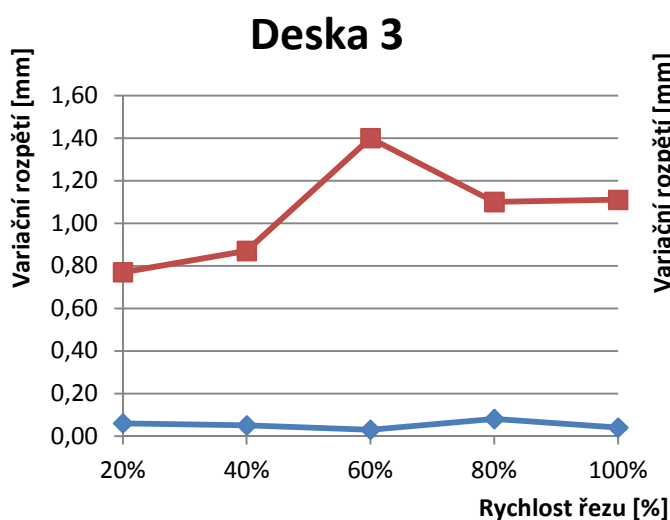
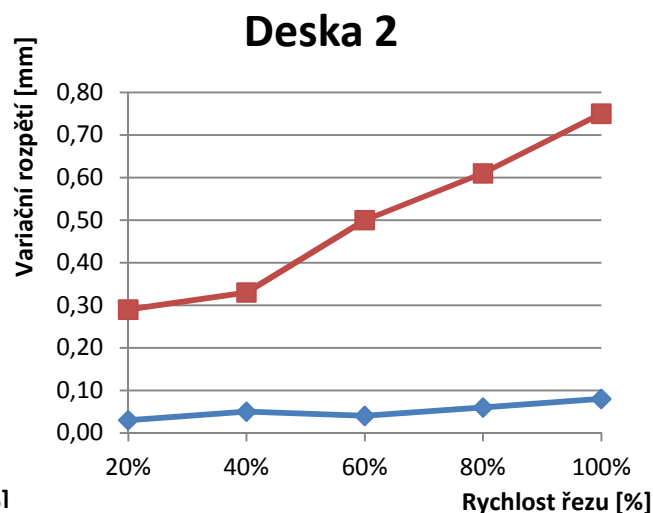
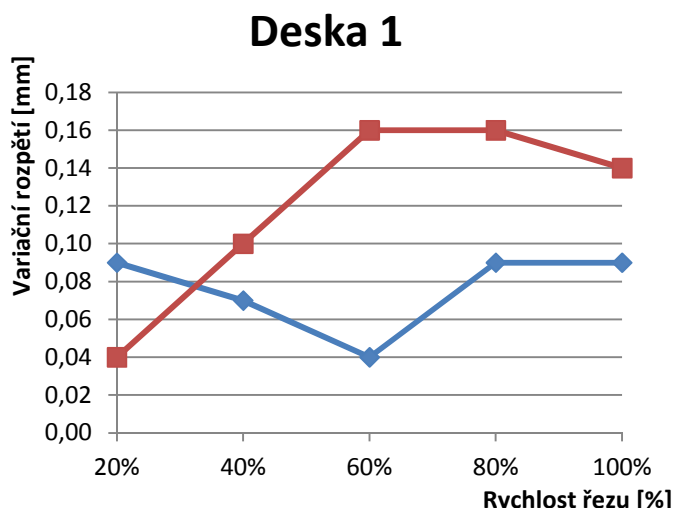


Deska 5



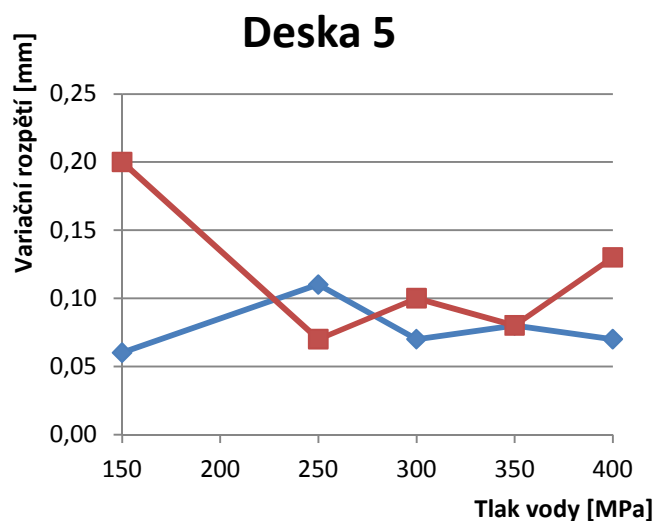
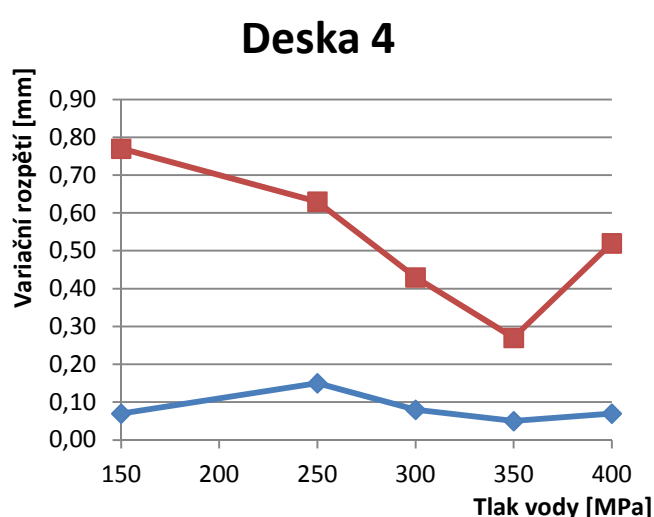
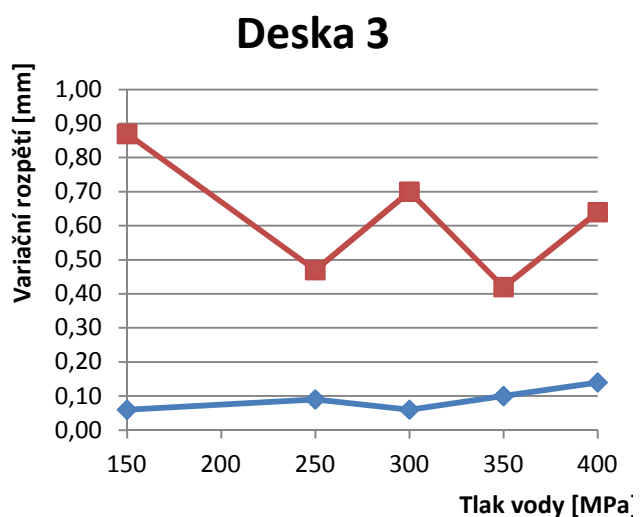
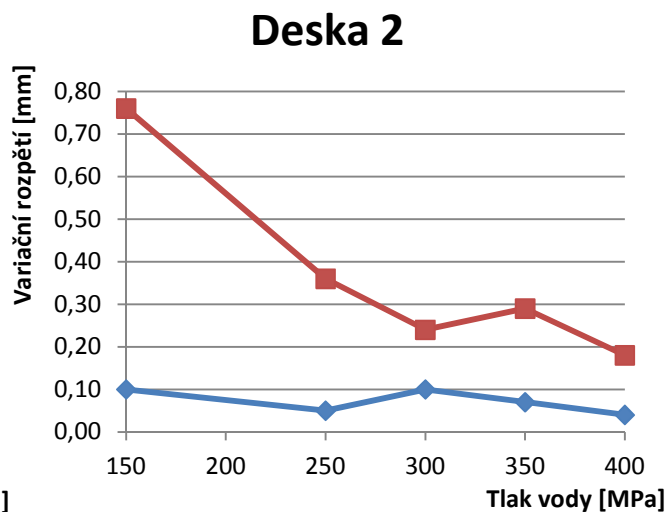
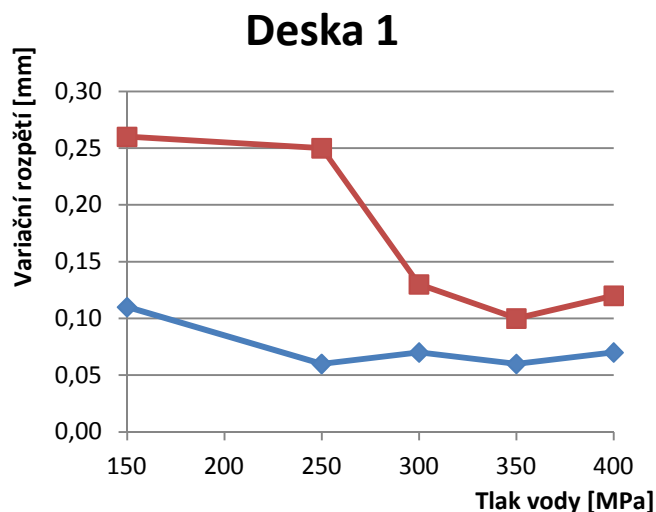
◆ — Začátek řezu
■ — Konec řezu

PŘÍLOHA P V: GRAFY ZOBRAZUJÍCÍ ZÁVISLOST VARIACNÍHO ROZPĚTÍ ŠÍŘKY ŠTĚRBINY NA RYCHLOSTI ŘEZU VODNÍHO PAPRSKU PRO JEDNOTLIVÉ DESKY



—◆— Začátek řezu
—■— Konec řezu

PŘÍLOHA P VI: GRAFY ZOBRAZUJÍCÍ ZÁVISLOST VARIÁČNÍHO ROZPĚTÍ ŠÍŘKY ŠTĚRBINY NA TLAKU VODNÍHO PAPRSKU PRO JEDNOTLIVÉ DESKY



◆ Začátek řezu
■ Konec řezu