

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
TECHNICKÁ FAKULTA

**Řezání kompozitních materiálů technologií abrazivního
vodního paprsku**

diplomová práce

Vedoucí práce: prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Diplomant: Bc. Jiří Zána

PRAHA 2019

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „*Řezání kompozitních materiálů technologií abrazivního vodního paprsku*“ vypracoval samostatně pod vedením prof. Ing. Miroslava Müllera, Ph.D. a použil jen pramenů citovaných v příložené bibliografii.

V Praze dne 25. 3. 2019

.....

Popis

Poděkování

Tímto děkuji prof. Ing. Miroslavovi Müllerovi, Ph.D. za věcné rady a odbornou pomoc při tvorbě diplomové práce a paní Ing. Monice Hromasové, Ph.D. za odbornou pomoc při vytváření snímků metodou SEM. Dále děkuji firmě ISOMA s.r.o. za poskytnutí potřebných podkladů pro zhotovení praktické části diplomové práce.

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Jiří Zána

Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

Řezání kompozitních materiálů technologií abrazivního vodního paprsku

Název anglicky

Cutting of composite materials by abrasive water jet technology

Cíle práce

Cílem diplomové práce je shromáždit a analyzovat aktuální poznatky o problematice technologie abrazivního vodního paprsku a následně těchto poznatků využít při plánování vlastního experimentu v oblasti řezání kompozitních materiálů pomocí technologie abrazivního vodního paprsku. Student shromáždí literární poznatky o předmětné problematice. Vlastní experimentální část bude věnována výzkumu zejména v prostorách laboratoří katedry, a to za použití CNC řezacího stroje a elektronové mikroskopie.

Metodika

Současný stav řešeného problému (literární rešerše).

Cíl práce a metody jejího zpracování.

Řešení podstaty dané problematiky.

Přínos a závěry práce.

Doporučený rozsah práce

cca 60 stran

Klíčová slova

desintegrace, SEM, výztuž, matrice, polymery

Doporučené zdroje informací

ÅSTRÖM, B. T.: Manufacturing of Polymer Composites. London: Chapman & Hall, 1997.

Časopis: Research in Agricultural Engineering, International Journal of Solids and Structures, Journal of Materials Processing Technology, Surface and Coating Technology, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, Strojírenská technologie, International Journal of Fatigue, Journal of materials processing technology, Polymer Degradation and Stability, Manufacturing technology, Wear.

LAŠ, V.: Mechanika kompozitních materiálů. 1.vydání. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2004.

LENERT, J.: Mechanika kompozitních materiálů. Vysoká škola báňská, Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2002.

MACHEK, V., SODOMKA, J.: Polymery a kompozity s polymerní matricí. 1.vydání. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2008.

MARTINEC, P.: Abrasives for AWJ cutting. Ostrava: Institute of geonics AS CR, 2002.

SITEK, L., ZELEŇÁK, M.: Vodní paprsek 2011 – výzkum, vývoj, aplikace: sborník přednášek konference o technologii vodního paprsku = Water Jet 2011 – Research, Development, Applications, Proceedings of the Conference on Water Jetting Technology, Ostrava: Ústav geoniky AV ČR, 2011.

Předběžný termín obhajoby

2018/19 LS – TF

Vedoucí práce

prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Elektronicky schváleno dne 23. 1. 2018

prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 30. 1. 2018

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan

V Praze dne 10. 01. 2019

ABSTRAKT

Předkládaná studie pojednává o zpracování polymerního kompozitního materiálu pomocí technologie využívající vodní paprsek (AWJ – abrazivní vodní paprsek, WJ – vodní paprsek). Vstupním materiálem je polymerní kompozitní materiál s označením Deltherm 68.890, jehož nosič je skleněné vlákno a pryskyřice je tvořená z epoxidu. Jedná se o tepelně izolační materiál, avšak materiál se vyznačuje značnou křehkostí, která je problematická v oblasti obrábění. Studie je zaměřena na porovnání vlivu rychlosti posuvu řezné hlavy na šířku řezu jak na vstupní straně řezu, tak na výstupní straně řezu při dvou hodnotách tlaku a pro dvě tloušťky desky. Výsledné řezy byly vyhodnocovány pomocí optické analýzy. Výsledky prokázaly významný rozdíl mezi technologiemi AWJ a WJ, a také mezi rychlostmi pohybu řezné hlavy. Řez byl za nevhodných podmínek nehomogenní a v jeho okolí došlo ke značné dezintegraci materiálu.

Klíčová slova: dezintegrace, SEM, výztuž, matrice, polymery, abrazivní vodní paprsek

SUMMARY

This study aims at processing of a polymer composite material by water jet technology (AWJ - abrasive water jet, WJ - water jet). The material evaluated is a polymer composite compound with brand name Deltherm 68.890 based on glass mat and high temperature resin. This material is a laminate for thermal insulation that is very brittle and difficult to machine. This study compares the influence of cutting head moving velocity on the width of cut on entrance and exit sides of the material at two different levels of water pressure and two different values of the plate thickness. The resulting cuts were evaluated by optical analysis. The final results proved there are significant differences in cut quality using AWJ and WJ technologies as well as when using different cutting head velocities. The cut was inhomogeneous and the material was seriously disintegrated when cut under unsuitable conditions.

Keywords: disintegration, SEM, reinforcement, matrix, polymers, abrasive water jet

Obsah

ÚVOD	9
1 HISTORIE TECHNOLOGIE VODNÍHO PAPRSKU	11
2 ROZBOR TECHNOLOGIE VODNÍHO PAPRSKU	13
2.1 Princip	13
2.2 Rozdělení vodního paprsku	15
2.3 Technologie WJ (Water Jet).....	17
2.4 Technologie AWJ (Abrasive Water Jet)	18
2.5 Výhody a nevýhody technologií AWJ	20
2.6 Využití technologie AWJ v praxi.....	21
3 KONSTRUKCE ZAŘÍZENÍ AWJ	23
3.1 Systém pro úpravu technologické kapaliny	24
3.1.1 Filtrace	24
3.1.2 Změkčování vody	24
3.1.3 Zpětná (reverzní) osmóza	25
3.1.4 Deionizace	25
3.2 Zdroj vysokotlaké kapaliny.....	26
3.2.1 Plunžrová čerpadla	26
3.2.2 Multiplikátory.....	27
3.2.3 Akumulátory tlaku.....	28
3.3 Řezací hlava	28
3.4 Souřadnicové stoly	30
3.5 Abraziva a jejich vlastnosti	30
4 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	33
4.1 Rozdělení kompozitních materiálů	34
4.1.1 Rozdělení dle matrice kompozitu.....	34

4.2	Vyztužující vlákna	34
4.2.1	Skelná vlákna	35
4.2.2	Aramidová vlákna	35
4.2.3	Uhlíková vlákna	36
4.3	Řezání kompozitního materiálu vodním paprskem.....	36
5	EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ MATERIÁLU.....	38
5.1	Materiál vzorků	38
5.2	Příprava vzorků dělením vodního paprsku (AWJ a WJ)	40
5.3	Metodika měření topografie povrchu.....	43
6	HODNOCENÍ PARAMETRU ŘEZNÝCH DRÁŽEK.....	45
6.1	Deska o tloušťce 4mm	46
6.2	Deska o Tloušťce 20 mm	60
7	VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU.....	74
7.1	Vyhodnocení desky o tloušťce 4mm.....	77
7.2	Vyhodnocení desky o tloušťce 20mm.....	78
7.3	Vyhodnocení SEM vzorků.....	79
	ZÁVĚR	82
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	85
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	89
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	90
	SEZNAM TABULEK	92

ÚVOD

Jedna z nejdůležitějších strategických úloh ve výrobní sféře pro strojírenský průmysl je neustálé zdokonalování výroby součástek, a to hlavně z důvodu vysokých nákladů a pracnosti potřebné na jejich výrobu. Konvenční metody obrábění, jako jsou například řezání, soustružení, frézování či vrtání, jsou v dnešní době prováděny pomocí mechanické energie vyvozené elektrickými pohony a za použití nástrojů z velmi tvrdých materiálů (kalené oceli, keramické materiály, slinuté karbidy atd.). Úběrem materiálu lze dosáhnout použitím například chemické, elektrochemické či tepelné reakce. Tyto metody jsou používány zejména v oblastech, kdy je obrábění určitého druhu materiálu tradičními metodami technicky složité, nevýhodné či neekonomické. Do těchto metod lze zařadit také dělení materiálů pomocí vysokotlakého vodního (WJ – Water Jet) nebo hydroabrazivního paprsku (AWJ – Abrasive Water Jet).

Tato technologie umožňuje zpravidla obrábět téměř jakýkoli průmyslový materiál (papíry, plasty, horniny, oceli, tvrdokovy, kompozitní materiály až po těžkoobrobitelné keramiky) a to intenzivně, ekonomicky a přitom ekologicky. Vysoká rychlost vodního paprsku zaručuje vysokou účinnost dělicího procesu. Navíc vodní paprsek má univerzální použití, předčí řadu jak konvenčních, tak nekonvenčních metod obrábění.

Kompozitní materiály se pokládají za nové moderní materiály, zdrojem inovací a nových možností v oblasti průmyslu. Velkou část kompozitních materiálů je zapotřebí obrobit dle konkrétních požadavků dalšího výrobního postupu. Kompozitní materiály mají poměrně vysokou kupní cenu, avšak v dnešní době jsou už nepostradatelnou součástí strojírenského průmyslu. Pro kompozitní materiály není zcela vhodné používat klasické obráběcí metody, jako u homogenních materiálů, ale je zapotřebí hledat další perspektivní metody obrábění. Proces obrábění AWJ je zavedený nekonvenční obráběcí proces pro řezání široké škály heterogenních materiálů včetně kompozitních materiálů. Technologie AWJ prokázala své pozitivní výsledky v mnoha výrobních odvětvích, avšak není nastřádáno dostatečné množství informací a postupů v oblasti obrábění kompozitních materiálů.

Výstupním materiálem pro provedení experimentu je polymerní kompozitní materiál s označením Deltherm 68.890. Jedná se o tepelně izolační materiál, jehož nosič je skleněné

vlákno a pryskyřice tvořená z epoxidu. Součástí experimentu je analyzovat poznatky o možnostech řezání vodním paprskem za různých technologických parametrů (tlak vodního paprsku, technologie řezání či rychlost posuvu řezací hlavy) při řezání polymerního kompozitního materiálu na kvalitu a přesnost daných řezů. Závěrem této práce je zhodnocení technologických parametrů pro řezání vodním paprskem a stanovení nejvhodnějších parametrů pro daný materiál.

1 HISTORIE TECHNOLOGIE VODNÍHO PAPERU

První použití vodního média pro oddělování materiálu bylo použito v padesátých letech devatenáctého století, kdy kalifornští zlatokopové začali používat proud vody k dobývání měkké zlaté rudy. Tento proud vody měl velkou rychlost toku a tlak v desítkách MPa. Další záznamy aplikace jsou z Ruska a Nového Zélandu v oblasti Seddonville, kde se podobný způsob využíval pro těžbu uhlí [1].

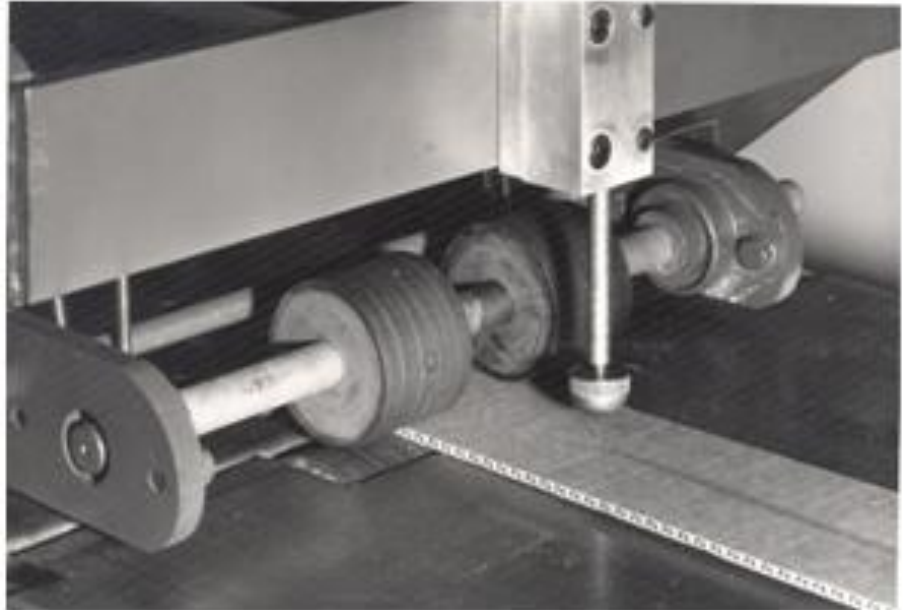
V třicátých letech dvacátého století se technologie vodního paprsku uplatňovala při řezání materiálů jako je papír, s použitím technologie tryskového proudění, kterou vytvořili Leslie Tirrell a Elmo Smith. Prvním člověkem, který začal studovat účinky vody, jako řezného nástroje byl v roce 1950 lesnický inženýr Dr. Norman Franz. Pouštěním těžkých závaží na sloupec vody a napojením této kapaliny do úzké trysky docílil impulzu vysokotlaké kapaliny. Dr. Franz zjistil, že těmito rázy je schopen štípat dřevo a další materiály. Jeho pozdější studie zahrnovala více přetržitých proudů vody, ale bylo velmi složité dosáhnout nepřetržitosti paprsku. Navíc, život řezného nástroje byl měřený v minutách – ne v týdnech nebo měsících jak je tomu dnes [2].

V roce 1970 vyvinula společnost Flow vysoce spolehlivý zdroj tlakové kapaliny (multiplikátor), který umožňoval další rozvoj této technologie (obr. 1.1). Řezání čistým vodním paprskem bylo nejprve používáno pro řezání měkkých, pevných a jemných materiálů, jako jsou kartony papíru, textil, jídlo, dětské jednorázové pleny nebo dřevěné puzzle. Nebylo však možné řezat velmi tvrdé materiály typu keramika, ocel, sklo nebo kámen [2].

V roce 1980 Dr. Mohamed Hashish při výzkumu přidal abrazivo do vody. Naplnil tedy nádobu z polystyrenu popelem z popelníku a umístil ji na řezanou desku ze dřeva. Po spuštění stroje řezal paprsek vody daleko rychleji než dříve, což ho přesvědčilo o správnosti jeho teorie. Hashish byl najat firmou Flow jako výzkumný pracovník. Experimentoval s různorodými abrazivními materiály jako je granát, písek dokonce i popel. S touto metodou mohl řezat téměř každý materiál, a proto se tato technologie začala rychle rozšiřovat do průmyslu. Firma Flow v osmdesátých letech dodala první stroj společnosti Libby Owens Ford Co., která jej užívala pro řezání automobilových oken. Společnosti jako Boeing

a Airbus používaly tuto technologii pro řezání materiálu Inconel (speciální žáruvzdorná slitina) nebo pro řezání uhlíkových vláken, které lze najít ve vojenských letadlech [2].

Dnes je technologie řezání vodním paprskem rozšířena po celém světě v širokém okruhu průmyslového využití. Od řezání speciálních materiálů při výrobě družic a raketoplánů ve společnosti NASA, přes řezání výplní dveří u automobilů nebo skel či kompozitů [2].



Obr. 1.1: První komerčně prodávané zařízení využívající vodní paprsek (WJ) z roku 1971. [7]

2 ROZBOR TECHNOLOGIE VODNÍHO PAPRSKU

Řezání vodním paprskem patří mezi nekonvenční metody obrábění, poskytuje však celou řadu výhod. Materiál v místě úběru není nijak zásadně tepelně ovlivněn a ani nedochází ke vzniku nežádoucích materiálových struktur, jako je např.: martenzit a austenit. Deformační napětí vzniklé po opracování materiálu není nijak zásadní. Výhodou studeného řezu je umožnění řezání materiálů s omezeným odvodem tepla, jako jsou například plasty, kompozitní materiály nebo také materiály citlivé na oxidaci (titan, nikl, kobalt a jejich slitiny). Výhodou je také minimální závislost úběru materiálu na mechanických vlastnostech materiálu, tj. na tvrdosti, pevnosti. Všeobecně se nekonvenční metoda řezání vodním paprskem nabízí tehdy, pokud ostatní metody zklamou vzhledem k typu řezaného materiálu či jeho tloušťce, nebo je-li nežádoucí deformace a teplotní ovlivnění řezu. Zařízení pro řezání vodním paprskem je v současné době řazeno mezi nejflexibilnější řezací obráběcí stroje a paletu možných využití doplňují stále nové oblasti[3].

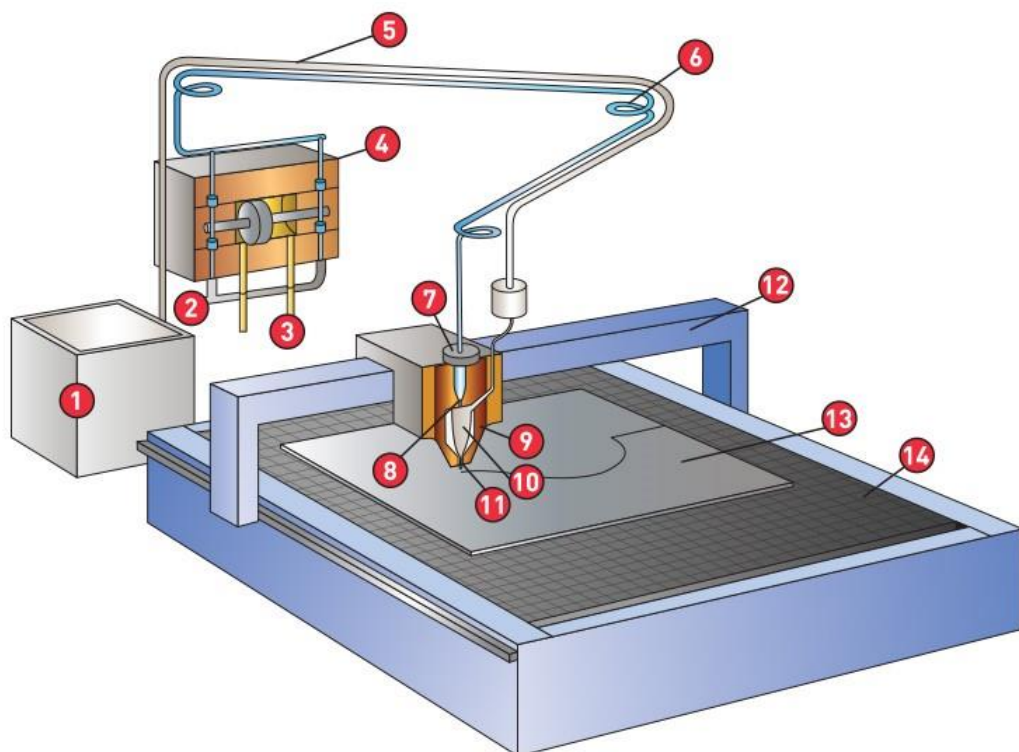
2.1 Princip

Princip vodního paprsku je definován jako úběr materiálu, který je založen na mechanicko-fyzikální podstatě a je charakterizován procesem odebrání částic materiálu následkem dopadu úzkého vodního proudu s vysokou rychlostí a velkou kinetickou energií na jednotku povrchu materiálu obrobku, přičemž abrazivum tento mechanický účinek ještě znásobuje [3].

U metody s použitím abraziva - AWJ (obr. 2.1), která využívá kinetickou energii abrazivních částic, vytváří podstatný rozdíl, materiál se tedy při řezání odebrá vysokorychlostní erozí, kterou způsobují abrazivní částice, které jsou součástí řezného média a jsou koncentrovány do tenkého paprsku dopadajícího na malou plochu. Rychlost tohoto paprsku dosahuje rychlosti až 1000 m/s). Jedná se tedy o hydroabrazivní erozi vyvolanou vysokorychlostním hydroabrazivním paprskem. Pracovní tlak u čistého vodního paprsku dosahuje hodnot až 700 MPa, u abrazivního paprsku až 400 MPa. Paprsek je u této technologie řezný nástroj. Tento nástroj se nemůže ztupit ani jinak nedegraduje. U trysky v řezací hlavě ovšem k opotřebení dochází v důsledku nárazu a průtoku abraziva [1; 6].

Odebírání částic řezaného materiálu je mikro-rozměrové. Takto je v každém okamžiku odebráno velké množství částic. Toto erozivní odebírání probíhá za nízké teploty (přibližně 70 °C), díky čemuž v okolí řezu nedochází k žádnému tepelnému ovlivnění a ani k žádné deformaci. Na základě tohoto faktu je možné řezat materiály, které by se jinou metodou dělit nemohly [1].

Kvalitu vzniklého řezu ovlivňují tyto parametry: tlak vody, rychlost proudění paprsku, rychlost pohybu paprsku, úhel paprsku, průměr trysky, vzdálenost trysky od materiálu, použitá aditiva a případně použitá abraziva včetně jejich dávkování. Řezání vodním paprskem má určitá omezení, která mají vliv na výsledný povrch řezu. Jeden z neduhů řezání vodním paprskem je zpoždění a kuželový tvar paprsku. Při rovných řezech nemá zpoždění vliv na povrch. Při řezání v rozích dochází k podřezání materiálu. Zpoždění vytváří chyby na obloucích a nerovinných řezech [6].



Obr. 2.1: Schéma vodního paprsku:

- 1 - zásobník abraziva, 2 - voda, 3 - olej, 4 - vysokotlaké čerpadlo, 5 – vysokotlaké trubky, 6 – spirálový kompenzátor, 7 – vysokotlaký ventil, 8 – vodní tryska, 9 - řezná tryska, 10 – míchací komora, 11 – výstupní tryska, 12 – příčník, 13 – obrobek, 14 – opěrný rošt. [8]

2.2 Rozdělení vodního paprsku

Obrábění vodním paprskem v dnešní době není už zcela neznámý proces. Díky několika-ti let studia a vývoje vodních paprsků bylo vytvořeno mnoho různých typů a verzí vodních paprsků. Nejvíce se však osvědčily zejména metody: Water Jet (WJ), což je řezání čistým vodním paprskem a metoda Abrasive Water Jet (AWJ), která je stejná jako metoda WJ, ale řezné médium je obohaceno o abrazivo a metoda Abrasive Suspension Jet (ASJ), tj. řezání vodním paprskem s abrazivní suspenzí. Díky svým kladným vlastnostem je technologie vysokorychlostních vodních paprsků dnes čím dál více používaná a v praxi čím dál více nahrazuje konvenční technologie v mnoha odvětvích průmyslu [10, 6].

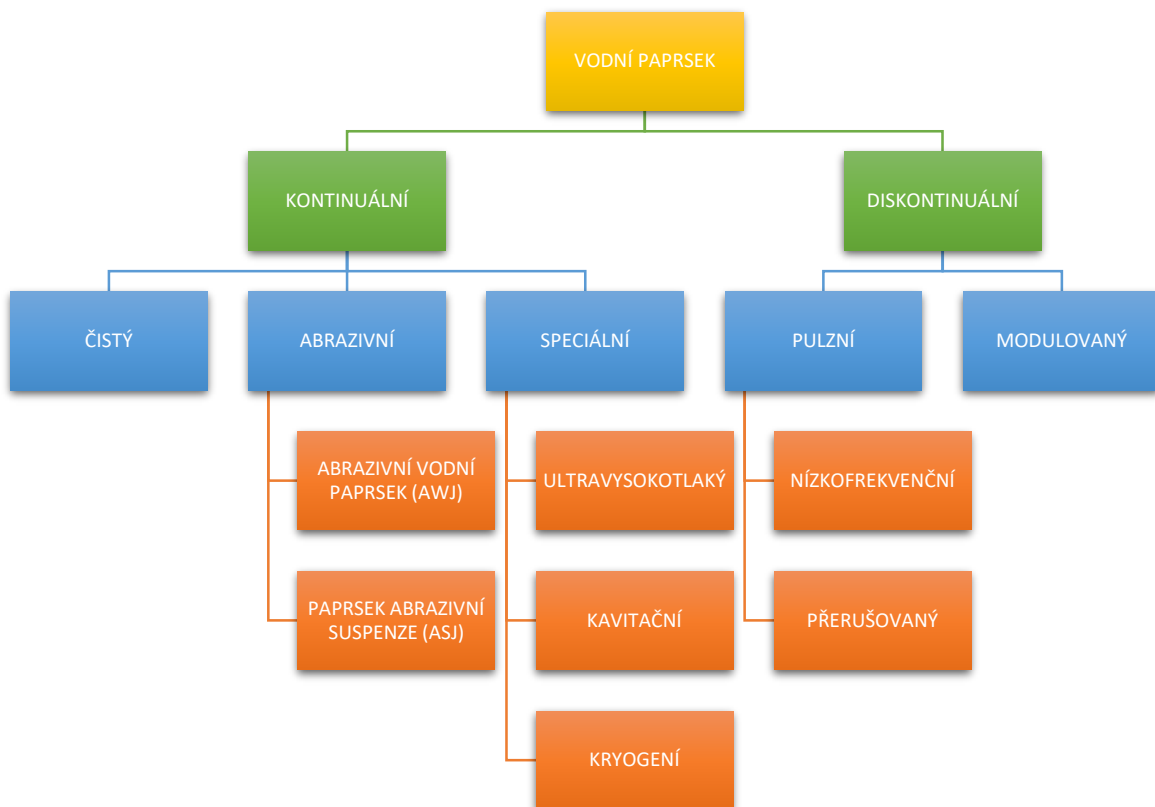


Obr. 2.2: Schéma vodního paprsku.
[4]

Rozdělení kapalinových paprsků (obr. 2.2) se dělí nejčastěji podle typu použitého pracovního média, podle tlaku generovaného vysokotlakými čerpadly, podle druhů příměsí, na základě chování vodního paprsku za tryskou a podle způsobů dodávání abrazivních částic do vodního paprsku [10, 6].

Nejvhodnější pracovní médium je bezpochyby voda, díky své dostupnosti a nízké hodnotě viskozity. V průmyslu se používají většinou vysokorychlostní vodní paprsky. Na obr. 2.3 je uvedeno schématické rozdělení vodních paprsků podle spojitosti výstupního paprsku [4].

V případě využití vody jako primárního pracovního média je nejdůležitějším parametrem při určování možností komerčního využití tlak vody a průtok vody za jednotku času [11].



Obr. 2.3: Schématické rozdělení vodního paprsku.[11]

2.3 Technologie WJ (Water Jet)

Technologie je založena na vysokotlakém vodním čerpadle (pumpě), které generuje tlak vody, ten je dále v multiplikátoru zvýšen na potřebný tlak (pracovní tlak se pohybuje v rozmezí 50 – 650 MPa) a tlakovým potrubím je médium dopraveno k řezací hlavě, které prochází vodní tryskou o průměru okolo 0,4 mm. Vodní paprsek tvoří úzký, čistý vodní paprskem s velkou kinetickou energií. Paprsek



Obr. 2.4: Vzorové příklady použití technologie WJ. [16]

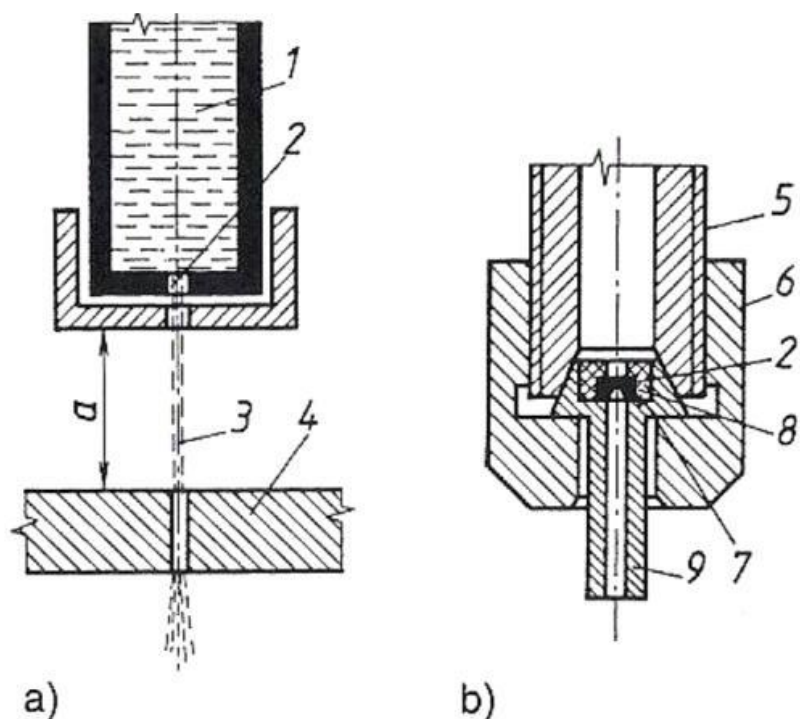
postupně mechanicky narušuje obráběný materiál. Takto utvořený paprsek lze použít pro dělení hlavně nekovových materiálů nebo méně houževnatých materiálů jako jsou lamináty, kevlar, sklotextil, molitan, guma, tenké plasty, kůže, koberce, výplně v automobilovém průmyslu apod. Posuv řezné hlavy se pohybuje v rozmezí 5 až 400 mm min⁻¹ [13,14].

Vodní trysky jsou vyráběny ze safíru, rubínu nebo diamantu. Rozlišujeme širokou škálu průměru trysek, což zajišťuje různou kinetickou energii paprsku a dále určuje kolik pracovišť je možno napájet z jednoho zdroje (vysokotlakého čerpadla) [13,14].

Rychlost proudění kapaliny skrze trysku ven na daný materiál se pohybuje v rozmezí 600 až 1000 m/s. Obecně je řezání vodním paprskem charakteristické pro svoji dobrou energetickou účinností, což platí také pro metodu WJ. Energetická účinnost může dosáhnout až 85 %. Pro porovnání,

energetická účinnost při obrábění paprskem laseru se pohybuje kolem 10 %. Přesnost výsledného řezu je u obrobků do tloušťky 10 mm ± 0,1 mm. Co se týče materiálů s větší

tloušťkou než 10 mm, pak přesnost se pohybuje okolo $\pm 0,2$ mm na metr řezu [1, 9, 11, 15].



Obr. 2.5: Řezací hlava pro vodní paprsek (WJ); a) schéma, b) provedení vodní trysky: 1 – tlaková kapalina, 2 – výstupní tryska, 3 – kapalinový paprsek, 4 – obrobek, 5 – potrubí, 6 – matice, 7 – lůžko trysky, 8 – držák trysky, 9 – stabilizátor, a – vzdálenost trysky od povrchu. [16]

2.4 Technologie AWJ (Abrasive Water Jet)

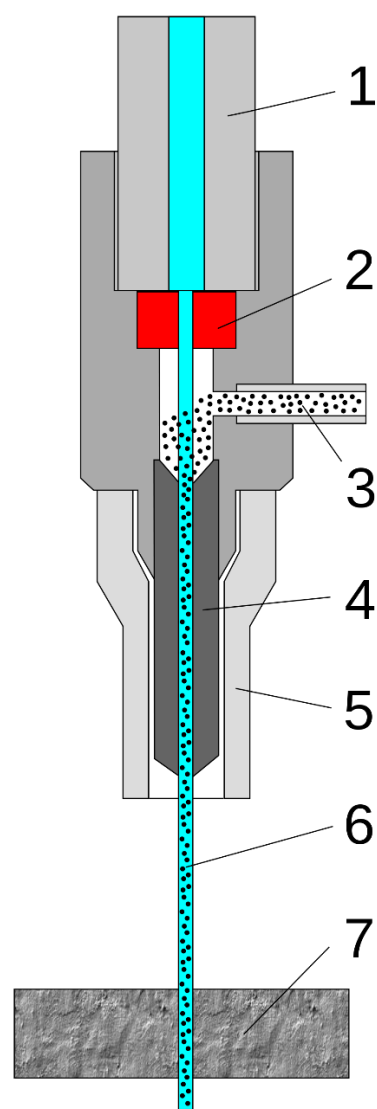
Technologie AWJ je obdobná již zmíněné technologii WJ s tím rozdílem, že využívá rychlost proudění vody při průchodu tryskou k vytvoření podtlaku ve směšovací komoře, díky čemuž se k vysokorychlostnímu proudu vody přisává vzduch s abrazivem, které je přesně dávkováno do směšovací komory ze zásobníku. Abrazivo se smíchá s proudem vody a vytvoří tak řezné médium na bázi abrazivního vodního paprsku, který se následně usměrní v tzv. zaostřovací trubici (obr. 2.6). Vysokotlaký hydroabrazivní paprsek je popisován jako erozní proces nebo jako řízený proces erozního opotřebení materiálu, při němž vykazuje vysokou dělicí účinnost. Obecně by se tato metoda dala popsat jako technologický proces objemového odstraňování částic z obrobku, k němuž dochází při vzájemném styku abraziva s obrobkem [1, 6, 11, 15].

Takto vzniklý výsledný paprsek má tří-složkovou strukturu a skládá se tedy z vody, vzduchu a abraziva, přičemž při dopadu na obrobek má mnohonásobně větší erozivní účinek než čistý paprsek. Avšak nedokonalé promíchávání ve směšovací komoře má za následek snížení řezné účinnosti či jiná negativa spojená s nerovnoměrným opotřebením zaostřovací trubice [1, 18, 20].

Vývojová centra, která se zabývají zlepšením technologií vodního paprsku stále na této problematice pracují, aby dosáhly co možná nejlepšího promíchání pracovního média s abrazivem [6].

Do výsledného procesu vodního paprsku se účastní čtyři mechanismy. Tyto mechanismy, které jsou: řezání, únavové porušení, křehký lom a tavení, většinou nepracují samostatně, ale v kombinaci. Abrazivní vodní paprsek je díky velkému mechanickému účinku schopen obrábět i těžkoobrobitelné materiály [19, 6].

Výstupní průměr zaostřovací trubice u technologie AWJ je většinou větší než u technologie WJ. Nejčastější průměry zaostřovacích trubic se pohybují v rozmezí od 0,75 mm do 2,5 mm. Rychlost proudění pracovního média dosahuje rychlostí až 1100 m/s při pracovním tlaku do 600 MPa. Průměr paprsku je závislý na průměru zaostřovací trubice. Vzdálenost mezi koncem zaostřovací trubice a obrobkem se udržuje co nejkratší, ideálně kolem 2 mm, v praxi je vzdálenost až kolem 4 mm z důvodu manipulace a přejezdu řezné hlavy nad obrobkem [10, 20].



Obr. 2.6: Řezací hlava pro vodní paprsek (AWJ) - 1 - vysokotlaký přívod vody. 2 - drahokam (rubín nebo diamant). 3 – abrazivní materiál. 4 - směšovací trubice. 5 – ochrana trysky. 6 - vodní paprsek. 7 - řezaný materiál. [21]

Oproti jiným nekonvenčním metodám (laser, plazma, autogen) nedochází u technologie vodního paprsku k tepelnému ovlivnění děleného materiálu. Touto metodou lze řezat všechny druhy a tloušťky materiálu (cca od 1,6 mm do 250 mm). Žula, mramor, keramika a umělý kámen je možno řezat až s přesností 0,2 mm v libovolných křivkách řezu bez mikropnutí v kvalitě obrábění diamantovými nástroji. Vysokotlaký hydroabrazivní paprsek je přesný, flexibilní a efektivní systém řezání materiálů, který má využití v mnohých odvětvích průmyslu [10,13, 20].



Obr. 2.7: Vzorové příklady použití technologie AWJ. [16]

2.5 Výhody a nevýhody technologií AWJ

Technologie vysokorychlostních vodních paprsků je stále považována za nekonvenční technologii, díky stále rostoucím investicím do technologického vývoje vodních paprsků a tím spojené vytváření nových možností uplatnění v průmyslu je patrné, že výhody převyšují nevýhody u této nekonvenční technologie [6, 12].

Výhody:

- Velká řezná univerzálnost jako je papír, kov až po speciální pancíře pro tloušťku materiálu od 0,1 mm až po 400 mm
- Řeže měkké, lepkavé, křehké a drolicí materiály
- Vysoká energetická účinnost (do 85 %)
- Chladný řez (70 °C), výhodné pro materiály náchylné na teplo
- Nevzniká teplem ovlivněná oblast, která by mohla negativně ovlivnit obrobek
- Možnost řezání pod vodní hladinou
- Jednoduché upnutí obrobku
- Nízká ztráta materiálu na základě úzkého řezu paprsku
- Univerzálnost řezného nástroje (frézování, gravírování, vrtání, řezání)
- Kvalitní řez bez otřepů

- Rychlý proces řezání oproti konvenčním metodám
- CNC řízení umožňuje automatizovaný proces (sériová výroba)
- Samotné řezání je bez kontaktu nástroje a obrobku
- Možnost použít jiné pracovní médium než vodu (potravinářský průmysl)
- Velká pracovní plocha (závisí na velikosti stolu)
- Ekologická technologie
- Minimální zatížení obrobených ploch zbytkovým napětím
- Bez mikrotrhlin v oblasti řezu
- Dlouhá životnost trysek [u metody WJ do 1000 hodin, u metody AWJ (zaostřovací trubice) přibližně 100 hodin]
- Řezání včetně úkosů
- Použití v otevřeném prostoru a bez znečištění životního prostředí
- Poměrně nízké náklady na údržbu [6, 10, 12, 18, 20, 22, 23]

Nevýhody:

- Vysoká hlučnost sestavy
- Přímý kontakt obrobku s vodou či jiným pracovním médiem
- Vysoké nároky na čisté pracovní médium
- U materiálů náchylných k nasáknutí velmi zdlouhavé vysoušení
- Opracovávané materiály musí být schopné snášet vlastnosti pracovního média
- Povrchy u určitých materiálů náchylných na korozi je nutné ošetřit
- Pro materiály s velkou tloušťkou se již na výstupní straně řezu objevuje značná nepřesnost
- Téměř nemožné řezat materiály, u kterých dochází k porušení vnitřního mechanického předpětí (typickým příkladem je kalené sklo)
- Provozní náklady (cena abraziva) [6, 12, 20, 22, 23]

2.6 Využití technologie AWJ v praxi

Nejvhodnější pro řezání vysokotlakým abrazivním vodním paprskem jsou plechy či tabule jednotlivých materiálů, ale lze i řezat hutní polotovary jak ve formě plných tyčí, tak i ve formě dutých profilů. Pokud je však technologie vybavena výškovým senzorem můžeme řezat i zvlněné materiály [20].

Tab. 2.1 Aplikace vodního paprsku v průmyslu. [1, 5]

ODVĚTVÍ PRŮMYSLU	APLIKACE
Automobilový	Dělení 3D součástek (např.: nádrže, nárazníky, karosérie, opěrky hlavy a rukou, čalounění a interiérové materiály na bázi PVC, kompozity, polyuretáty, fólie, gumy, keramické materiály, těsnění a další).
Elektrotechnický	Dělení plošných spojů, elektroizolačních materiálů, keramiky a skla.
Chemický	Obrábění výbušných látek, plastických hmot, těžko obr. materiálů a kompozitů.
Kamenický	Dělení různých druhů kamene, mozaiky, dlaždice, dekorace.
Kosmický a letecký	Dělení keramiky, kompozitů, titanu, interiérových panelů, hliníkových částí skeletu letadel.
Farmaceutický	Operace mozkových nádorů, klinické a experimentální aplikace.
Metalurgický	Metalografické rozборы, čištění odlitků.
Papírenský	Řezání papíru, buničiny, novinového papíru, papírových plen.
Potravinářský	Dělení ryb, hub, tabáku, ovoce, zeleniny, čokolády, zákusků a sýra.
Sklářský	Dělení skla, plexiskla, matování skla.
Stavební	Dělení izolačních materiálů, polystyrénu, sklovitých materiálů, azbestu, plast-betonu, keramiky.
Strojní	Výroba metalografických vzorků, obrábění rotačních součástek, čištění povrchů, soustružení, frézování.
Textilní	Dělení jemných textilií s maximální úsporou vysoko kvalitního polovýrobku.
Vojenský	Odminování, demilitarizace (zneškodňování raketových municí, binárních chemických zbraní, a jednosložkových chemických zbraní), dělení pancéřů pro obrněná vozidla.

3 KONSTRUKCE ZAŘÍZENÍ AWJ

Základní vybavení řezacího systému obsahuje komponenty, které musí odolávat vysokým tlakům, proto je vysokotlaká soustava základem řezacího systému. Čistý vodní paprsek (WJ) i abrazivní vodní paprsek (AWJ) vytváří ve vysokotlakém zařízení vysokorychlostní proud média. Vysokotlaká soustava se dělí na dva základní okruhy:

- Primární okruh (nizkotlaký)
- Sekundární okruh (vysokotlaký)

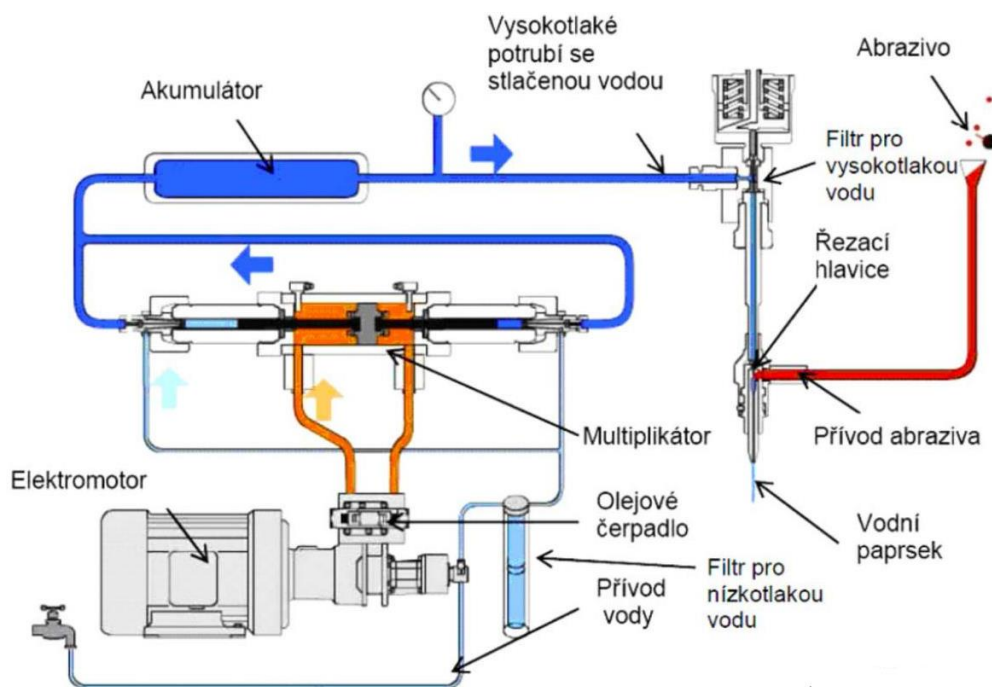
Vysokotlaký okruh je řízen nizkotlakým okruhem prostřednictvím tlaku řídicí kapaliny vyvolaného hydraulickou jednotkou [19].

Základní části vysokotlakého okruhu jsou:

- Filtrační jednotka – nepropustí nečistoty o velikost větší než 0,4 μm
- Zdroj (generátor) tlakové technologické kapaliny – vysokotlaké čerpadlo
- Rozváděcí systém – vysokotlaké potrubí, těsnění, hadice, otočné elementy atd.
- Akumulátor tlaku – vysokotlaká nádoba, která pohlcuje v kapalině rázy (multiplikátor)
- Ventily – řídí průtok kapaliny a tím i samotné dělení materiálu
- Řezací hlavice – v této výstupní dýze vzniká řezný paprsek [19]

Zařízení pro technologii vodního paprsku se skládá z následujících částí:

- Hydraulická jednotka (s čerpadlem a multiplikátorem)
- Akumulátor
- Filtry
- Potrubí pro rozvod vody
- Ventily
- Směšovací komora
- Systém pro dávkování abraziva
- Řezací hlavice
- Zařízení pro pohyb řezací hlavice
- Opěrný rošt
- Obrobek
- Lapač nečistot
- Systém úpravy vody
- Systém recyklace vody
- Řídicí NC a CNC systém (tento řídicí prvek je složen ze souřadnicového portálu a pracovního stolu včetně CAD/CAM systému) [6, 19, 26, 27]



Obr. 3.1: Schéma vodního paprsku. [25]

3.1 Systém pro úpravu technologické kapaliny

Technologická kapalina (voda) přiváděná z vodovodního řádu obsahuje mnoho látek s nežádoucími účinky, jako jsou například minerály a nečistoty. Proto je nutné, aby byl celý systém chráněn, především však část dýzy, jejíž průměr se pohybuje v rozmezí 1,2 až 2,5 mm. Proto je nutné předcházet usazování těchto látek z hlediska správné funkce paprsku. Existují základní postupy pro úpravu vody a to: mechanická úprava vody, biologická úprava vody [10].

3.1.1 Filtrace

Je metoda, při níž dochází k oddělování pevných částic od kapalných. Tento proces probíhá skrze prostupný materiál. Vodní suspenze je vedena přes porézní filtrační přepážku, která bývá opatřena zpravidla nosným roštem. Filtrace se používá při separování částic do velikosti 10^{-5} m [10].

3.1.2 Změkčování vody

Je proces pro úpravu vody, který předchází další úpravou jako je deionizace nebo reverzní osmóza. Změkčování vody, při níž se snižuje tvrdost vody, se určuje podle

koncentrace vápníku a hořčíku v daném objemu. Pro hodnocení tvrdosti vody se používá stupnice dle tabulky 3.1. Jednotkou tvrdosti v soustavě je buď mmol/l, nebo německé stupně tvrdosti (°dH) [10, 29].

Tab. 3.1: Určení tvrdosti vody. [10, 28]

VODA	mmol/l	°dH
velmi měkká	<0,7	<3,9
měkká	0,7-1,25	3,9-7,0
středně tvrdá	1,26-12,5	7,1-14
tvrdá	3,61-3,75	14,1-21
velmi tvrdá	>3,75	>21

3.1.3 Zpětná (reverzní) osmóza

Je technologie produkující vysoce kvalitní (čistou) vodu, kdy je tato voda tlačena vysokým tlakem a usměrňována přes polopropustnou membránu. Membrána zachycuje nečistoty, které jsou odplavovány do odtoku. Rozdíl tlaků je pak hybnou silou membránové filtrace. Proces čištění vody pro řezný paprsek je závislý na více separačních metodách [10].

3.1.4 Deionizace

Technologie využívající výměny iontů je proces mnohem složitější než u změkčování vody. Deionizace využívá kationtovou a aniontovou pryskyřici, která je umístěna v dvoukomorové nádrži. Voda prochází přes kationtovou pryskyřici, jež je lepší ve vodní formě než sodíkové, používané při změkčování, jsou různé kationty jako uhlík (C), hořčík (Mg) a železo (Fe) přesunuty volnými minerály kyselin. Voda poté pokračuje přes aniontovou jednotku, kde jsou chloridy a sulfáty přesunuté a nahrazené hydroxidy. Hydroxidy se slučují a tvoří vodu očištěnou od všech iontových nečistot [10].

Výhody deionizace:

- Zvýšení životnosti celého zařízení
- Jednoduchá obsluha, která spočívá v doplňování sodíkových tablet
- 100% odstranění úplně rozpuštěných částic

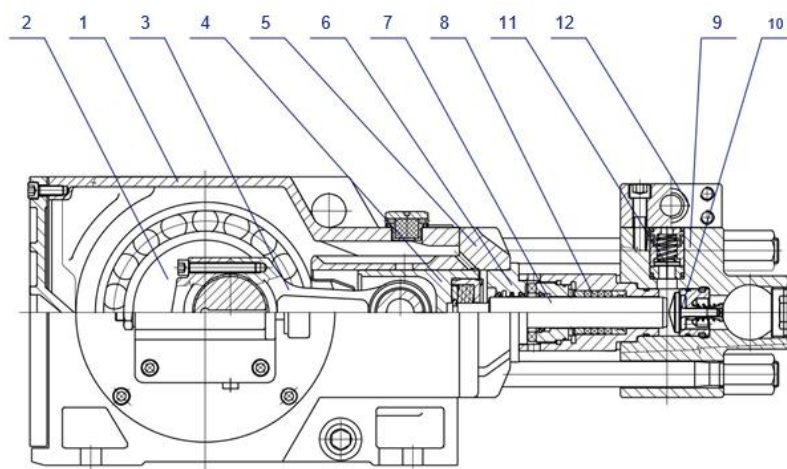
3.2 Zdroj vysokotlaké kapaliny

Slouží k vyvinutí vysokotlakého paprsku pomocí systému hydraulických čerpadel. Vysokotlaký vodní paprsek se generuje hydraulickým zařízením s multiplikátorem nebo triplexovým šoupátkem. Díky vysoké hlučnosti a bezpečnosti (aby nedošlo v případě havárie ke zranění pracovníků) jsou tato zařízení umístěna v oddělených místnostech. Různé velikosti a provedení čerpadel lze dodat jako jednotlivý agregát nebo jako integrované řešení. Zařízení musí hlavně zajišťovat nepřetržitý a stálý proud vody o předepsaném tlaku. Rozeznáváme dvě zařízení v závislosti na velikosti tlaku a průtoku vysokotlaké vody:

- triplexová pístová čerpadla – pro nízké a střední tlaky (do 300MPa)
- multiplikátory – pro vysoké tlaky (až 700MPa) [1, 10]

3.2.1 Plunžrová čerpadla

Tento druh čerpadel pracuje na podobném principu jako čerpadla pístová. Od pístových čerpadel se liší použitím tzv. **plunžr** (pístní tyč a píst v čerpadle, které splývají v jednu součást o stejném průměru). Obr. 3.2 popisuje schéma plunžrového čerpadla. Pohyb klikového mechanismu směrem k dolní úvrati má za důsledek zvýšení objemu v pracovní komoře čerpadla, což vede ke snížení tlaku a nasávání vody do pracovního prostoru skrze otevřené ventily, poté nastává reverzní pohyb plunžru, který má za následek zvětšení tlaku na hodnotu výtlačného tlaku v pracovním prostoru. Ventily pro přívod vody se postupně uzavřou a vysokotlaká kapalina je vytlačena do potrubí [4, 33, 34].



Obr. 3.2: Řez plunžrového čerpadla: 1 – kliková skříň, 2 – kliková hřídel, 3 – ojnice, 4 – křížák, 5 – vedení křížáku, 6 – prachová ucpávka, 7 – plunžr, 8 – vysokotlaká ucpávka, 9 – těleso hydraulické části, 10 – sací ventil, 11 – výtlačný ventil, 12 – víko ventilů. [30]

3.2.2 Multiplikátory

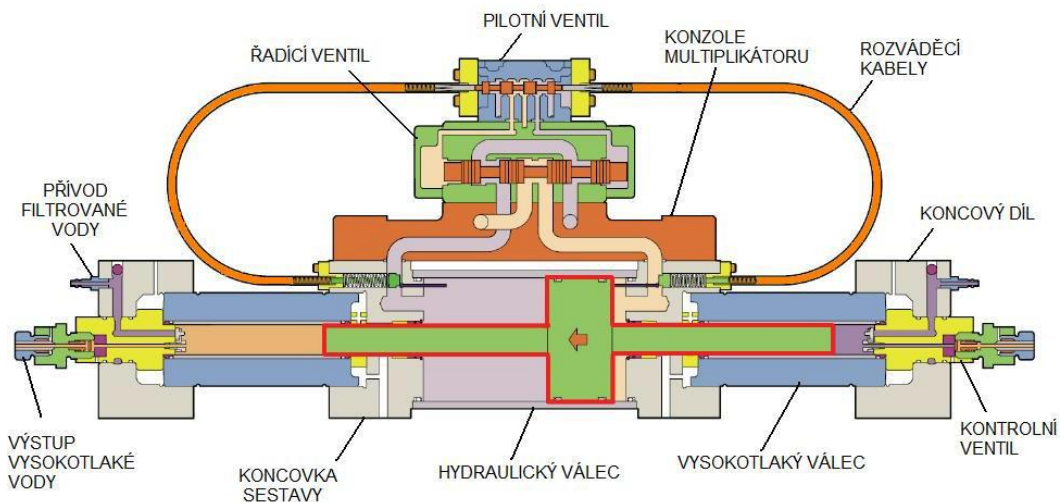
Jsou to zařízení, jež plní funkci hydraulického násobiče vody a využívá se pro vyvození tlakového rozdílu pracovních ploch pístu. Skládá se ze dvou okruhů, do prvního nízkotlakého okruhu se přivádí olej o tlaku p_1 , který je postupně dopravován do oblasti pístu o ploše S_1 . Druhý okruh dodává do systému přefiltrovanou vodu na opačnou stranu pístu o ploše S_2 . Objem vysokotlaké vody dodávané za pomoci multiplikátoru není kontinuální, a proto je zapotřebí v systému použít akumulátor, který vyrovnává kolísání tlaku. Multiplikátory pro vodní paprsek generuje tlaky do 700MPa a dosahují výkonu téměř 90kW při průtoku $12 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ [19].

Pro teoretický výpočet výstupního tlaku pro dvojitě multiplikátory platí vztah:

$$P_2 = \frac{S_1 - S_2}{S_2} \cdot P_1 \text{ [Pa]}$$

V praxi však dochází v multiplikátoru ke ztrátám (hydrodynamické ztráty, tření, apod.), musíme proto vztah upravit o hodnotu mechanické účinnosti ($\eta_m = 0,95$), kde poté získáme konečný vztah ve tvaru: [19]

$$P_2 = \frac{S_1 - S_2}{S_2} \cdot P_1 \cdot \eta_m \text{ [Pa]}$$



Obr. 3.3: Schéma multiplikátoru. [32]

Děj multiplikátoru se rozděluje na dva okruhy vody. Nízkotlaký okruh, který pracuje s tlakovým olejem o tlaku přibližně 20MPa řídí vysokotlaký okruh pracující s řeznou kapalinou. Výsledný tlak kapaliny na výstupu z multiplikátoru dále pokračuje přes akumulátor a potrubí do řezací hlavy vodního paprsku. Součástí multiplikátoru jsou dva zpětné ventily na každé straně multiplikátoru, jeden ventil slouží pro přívod vody do systému a druhý ventil je určen pro výstup vysokotlaké vody dále do akumulátoru [19].

3.2.3 Akumulátory tlaku

Akumulátor tlaku slouží k vyrovnání kolísání tlaku v systému, který způsobuje pohyb pístu v multiplikátoru. Zároveň slouží k tlumení rázů od multiplikátoru. Pomocí akumulátoru je zajištěn konstantní rovnoměrný tlak a rychlost vody. Je to nezbytná součást systému, která zvyšuje životnost a spolehlivost celého zařízení. Jeho užití zvyšuje také kvalitu řezu – nedochází k tvorbě rýh, které by byly způsobeny nepravidelnou dodávkou vody. Umisťuje se do vysokotlakého systému přímo za multiplikátor [5, 33].

Akumulátor má tvar válce, jenž je dutý o určitém objemu. Vyplňuje jej stlačená voda z multiplikátoru. Při průchodu úvratí pístu v multiplikátoru dochází k poklesu tlaku a v tento okamžik dochází k poklesu tlaku v systému. Tento tlak dorovnáva vodu z akumulátoru a tím zajišťuje kontinuální tok kapaliny [5, 33].



Obr. 3.4: Multiplikátor. [32]

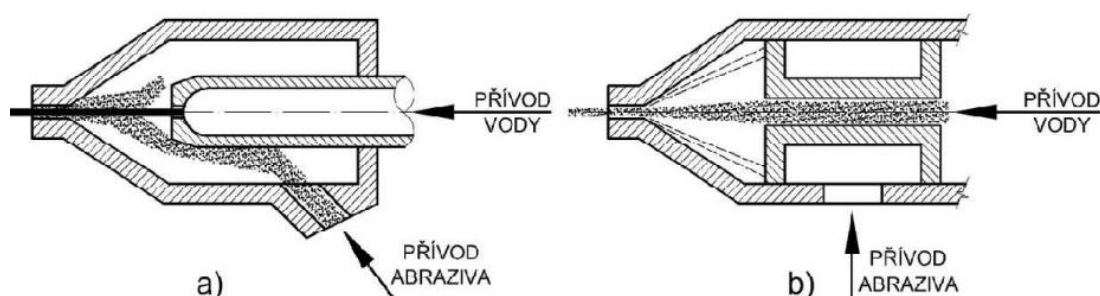
3.3 Řezací hlava

Řezací hlava je jednou ze stěžejních komponent zařízení pro řezání vodním paprskem. Slouží k převádění vysokotlaké pracovní kapaliny na řezný nástroj, který vytváří vysokorychlostní tenký vodní paprsek. Řezací hlavy nám udávají výsledný typ paprsku a jeho vlastnosti. Řezací hlavy rozdělujeme podle způsobu řezání na tři druhy. První z nich je řezací hlava pro řezání čistým vodním paprskem, která má nejjednodušší konstrukci.

Druhý a třetí druh jsou řezací hlavy pro řezání abrazivním vodním paprskem, které rozlišujeme podle přívodu abraziva na řezací hlavu s radiálním přívodem abraziva a na řezací hlavu s axiálním přívodem abraziva [5, 19].

Řezací hlava s radiálním přívodem abraziva funguje na principu strhávání abrazivních částic, které jsou přiváděny radiálně pomocí vodního paprsku. Tento typ řezací hlavy je jednodušší než typ s axiálním přívodem, proto je také jednodušší na výrobu a tím pádem je i levnější. Je možné je po vypnutí dávkování abraziva užívat i pro řezání čistým paprskem [5, 19].

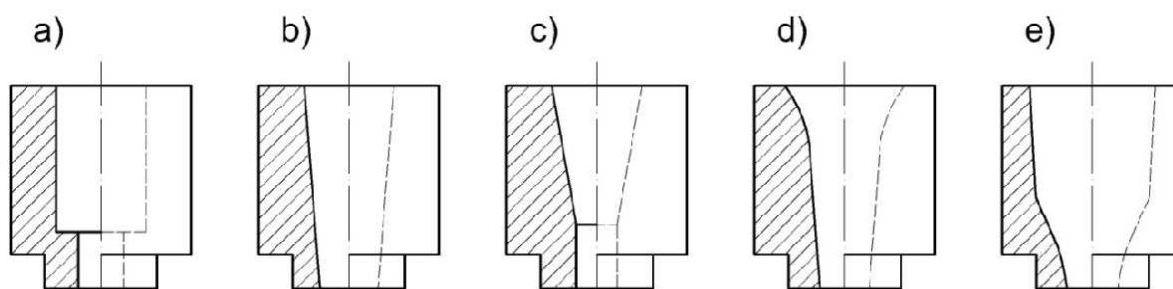
Řezací hlava s axiálním přívodem je složitější (obr. 3.5), ale její konstrukce má výhodu oproti radiálnímu přívodu, protože axiálně přiváděné abrazivo tolik neopotřebovává vnitřní stěnu trysky. Axiálně je přiváděno abrazivo do směšovací komory, kde se mísí s radiálně přiváděnou vysokotlakou vodou. Životnost trysky v řezací hlavě s axiálním přívodem je tedy vyšší [1, 4].



Obr. 3.5: Mísení abraziva s vysokotlakým paprskem AWJ
 a) dýza s jednoduchým vodním paprskem a radiálním přívodem brusiva
 b) dýza se smíšeným paprskem a axiálním přívodem brusiva. [5]

Hlavní částí každé řezací hlavy je dýza. Její jednotlivé geometrické prvky a vlastnosti dotvářejí konečný charakter řezného paprsku. Na obrázku 3.6 je rozlišeno pět základních tvarů vodních dýz [19].

Materiály vodních dýz jsou závislé na provozních tlacích, pro nízké tlaky se volí dýzy z tvrdokovu a pro střední a vysoké tlaky – rubínové, safírové dýzy či dýzy vyrobené ze syntetického diamantu



Obr. 3.6: Tvary vyráběných vodních dýz
 a) válcová b) kuželová c) kombinovaná d) kónická e) složená – bikubická. [5]

Vodní dýzy vyrobené ze syntetického diamantu dosahují až 10-ti násobek životnosti safírových či rubínových dýz, přičemž jsou až 10-ti násobně dražší. Samotná výroba těchto dýz je velmi náročná a nákladná z důvodu vysokých požadavků kladených na přesnost, kvalitu materiálů atd. Vysokorychlostní paprsek vystupuje z dýzy rychlostí přibližně v rozmezí 300 až $1400 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a to při velmi malém vnitřním průměru dýzy (výtokové části). Mezi hlavní kontrolované faktory při výrobě dýz patří drsnost vnitřního povrchu [1,19].

3.4 Souřadnicové stoly

Řezací stůl vodního paprsku je multifunkční zařízení mající za úkol:

- Převádět CNC kód do reálného pohybu řezací hlavy
- Zachycovat energii paprsku
- Zachycovat a odvádět použitou vodu
- Funkční uložení obrobku na loži, které je sestaveno z roštů nebo kuličkových loží

Souřadnicové stoly jsou provázány se softwarem typu CAD/CAM a tím zajišťují automatizovaný provoz potřebný pro efektivní výrobu. Souřadnicové stoly se vyrábí v různých rozměrových variantách a mohou dosahovat plochy až 54 m^2 ($6 \times 9 \text{ m}$) [31].

3.5 Abraziva a jejich vlastnosti

Abraziva hrají velkou roli v technologii obrábění vodním paprskem AWJ, neboť několikanásobně rozšiřují možnosti v oblasti dělení materiálů. Efektivita obráběcího procesu velkou měrou závisí na druhu abraziva, jež je významným technologickým parametrem. Mezi nejvýznamnější kritéria abrazivních částic patří řezivost, zrnitost, tvrdost, pevnost, atd. [1]:

Řezivost

Řezivost je určena na základě krystalické struktury abrazivních částic, které se značí tvarem kubické krystalové mřížky. Mřížka zajišťuje částicím nižší hodnotu otupení. Při dopadu částice na hranu řezaného materiálu dochází k vytvoření nových hran na ploše částice, a proto lze jedinou použité abrazivní materiály recyklovat. Tyto částice však po opětovném použití ztrácí svůj řezný výkon (při prvním procesu řezání přibližně o 30%). Proces recyklace je náročný a využívá se tam, kde je nedostatek užitkové vody[5].

Zrnitost

Je charakterizována jako velikost abraziva. Udává se v jednotkách MESH, které vyjadřují počet ok síta na čtvereční palec. Zrnitost můžeme rozdělit na:

- Jemnou (MESH 100,120,150,...)
- Střední (MESH 60,80,...)
- Hrubou (MESH 10,16,36,...)

Velikost zrna se pohybuje od 0,1 mm až po 0,5 mm. Čím jemnější zrno je použito, tím má řez menší drsnosti Ra, ovšem celý řezný proces nižší řeznou rychlost [5].

Tvrдост

V oblasti strojírenství můžeme jednotlivé druhy abrazivních materiálů rozdělit do dvou základních skupin [5, 34]:

- **Kovové materiály** (ocelový granulát, ocelová drť, korozivzdorný granulát)
- **Nekovové materiály** (balotina, hnědý a bílý korund, keramické a plastické abrazivo, křemičitý písek, granát, olivín)

V praxi se nejvíce užívají abraziva na bázi granátu (indický, ruský, čínský, australský), kde australský je nejkvalitnější. Tyto granáty se směšují společně s olivínem a křemičitými písky.

Existuje několik druhů abraziva. Jako příklad slouží tab. 3.2 vytvořená na základě informací od firmy PTV s.r.o [34].

Tab. 3.2 Složení abrazivního materiálu GMA australského původu. [37]

CHEMICKÉ SLOŽENÍ								
Prvek	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	CaO	MgO
Obsah v %	36	20	30	2	1	1	2	6
MINERÁLNÍ SLOŽENÍ								
Minerál	Granát	Ilmenit	Zirkon	Křemen	Ostatní			
Obsah v %	97-98	1-2	< 0,2	< 0,5	< 0,25			

Fyzikální charakter. granátu GMA [35]:

- Sypná hmotnost 2,38 t·m⁻³
- Měrná hmotnost 4,1 t·m⁻³
- Tvrdost dle Mohra 7,5 ÷ 8,0
- Bod tavení 1250 °C
- Tvar přírodních zrn kubický

Další charakteristiky [35]:

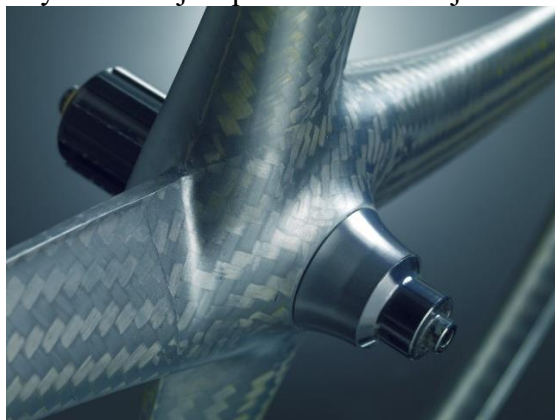
- Vodivost max. 0,25 mS/cm
- Radioaktivita není měřitelná
- Absorpce vlhkosti je inertní
- Chloridy celkem < 0,0025 %
- Volné Fe; Cu; ostatní < 0,01 %



Obr. 3.7: Druhy abrazivních materiálů dle firmy PKIT s.r.o [34]

4 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozitní materiál je heterogenní materiál, ve kterém jsou určitým způsobem kombinovány dvě nebo více komponentů (fází). Celkové vlastnosti daného kompozitního materiálu jsou dány kombinací všech složek a jejich objemových podílů. Základní složky u kompozitních materiálů jsou takzvané komponenty. Komponenty jsou rozděleny na matrice a výztuž. Matrice nebo také nosič má hlavně za úkol vzájemně obklopovat a spojovat výztuž (vlákna), přenášet zatížení mezi jednotlivými vlákny, formovat (fixovat) plnivo a vytvářet tvar výsledného profilu. Výztuž má za úkol přenos hlavního zatížení na matici. Kombinací matrice a výztuže tvořících soustavu heterogenních složek vzniká výsledný homogenní materiál, který vykazuje určité vlastnosti v daném směru zatížení. Velkou výhodou je ovlivnění těchto vlastností pro daný směr cílenou výrobou materiálu. Díky pokročilým technologiím, kompozitní materiály nacházejí uplatnění ve strojírenském průmyslu, a to jak v automobilovém, leteckém, kosmonautickém, námořním, tak i silničním průmyslu. Největší podíl na trhu stále tvoří kompozity založené na vyztužování polymerů, především polyesterových nebo vynilesterových pryskyřic. Vlastnosti kompozitních materiálů jsou dány jejich výrobou a především použitým typem matrice a výztuže [40, 41].



Obr. 4.1: Příklad použití kompozitního materiálu. [46]

Hlavní výhody kompozitních materiálů jsou vysoká pevnost a tuhost, nízká hmotnost, odolnost vůči korozi, dobré vlastnosti při zatěžování (statickém i dynamickém), dobré tlumící vlastnosti, dobré tepelné vlastnosti [40].

Nevýhody kompozitních materiálů jsou v mnohdy složitěm způsobu výroby a zpracování, horší mechanické vlastnosti ve směru kolmo k orientaci uložení vláknem (vláknité kompozity), lokální poškození (obtížná identifikace a oprava) [40].

4.1 Rozdělení kompozitních materiálů

Kompozitní materiály jsou nejčastěji rozděleny podle druhu matrice a podle druhu výztuže (vláken).

4.1.1 Rozdělení dle matrice kompozitu

Matrice neboli pojivo je určitý druh materiálu, který tvoří základní stavební prvek výsledného kompozitního materiálu. Úkolem matrice je zaručení geometrického tvaru, zavedení a přenos sil na jednotlivá vlákna, ochrana vlákna před vlivy okolí [40, 43].

Rozdělení kompozitních materiálů podle druhu matrice:

- **Kompozity s polymerní matricí** – nejčastěji používaná matrice. Je tvořena termoplastem (např. polypropylen, polyamid), reaktoplastem (epoxid) nebo síťovaným elastomerem (např. styren-butadien). Výztuže pak tvoří zejména skleněná, uhlíková a aramidová vlákna. U automobilového průmyslu se využívá na obvodové konstrukci (karoserie) a v interiéru. Polymerní kompozity se dále dělí na kompozity s termoplastickou a termosetickou matricí [40, 43].
- **Kompozity s kovovou matricí** - lehké slitiny hliníku, hořčíku, titanu, ale i slitiny železa, kobaltu nebo mědi (ve formě vláken nebo částic). K výztuži se používají vlákna keramická nebo kovové materiály (wolframová vlákna). Kompozitní materiály, které tvoří tuto matrici, dosahují dobré tepelné vodivosti, koeficientu tepelné roztažnosti, objemové stálosti a odolnosti proti opotřebení. U automobilového průmyslu se můžeme nejčastěji setkat s takovými kompozity u spalovacích motorů, pístů, kluzných ložisek, brzdových bubnů a kotoučů [42, 43].
- **Kompozity s uhlíkovou matricí** - matrice je tvořena uhlíkem v různém stavu strukturní uspořádanosti. K vyztužení slouží uhlíková vlákna [43].

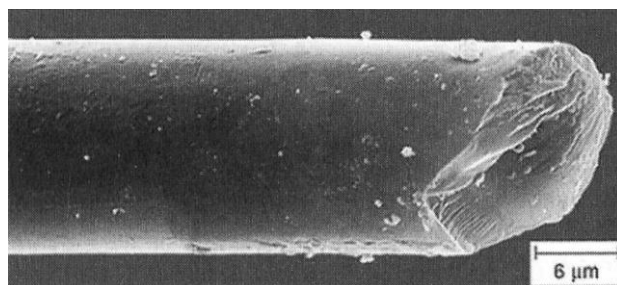
4.2 Vyztužující vlákna

Úlohou vyztužujících vláken v kompozitu je především zajistit mechanické vlastnosti materiálu, jako je pevnost a tuhost. Na základě těchto dvou vlastností jsou stanoveny podmínky vyztužujícího účinku, které musí být splněny [40].

Běžně užívaným typem výztuže je skleněné, uhlíkové a aramidové vlákno. Samostatná vlákna jsou ale parametrově nevýznamná a využívána jsou jen výjimečně, proto je nutné vytvořit z nich svazek vláken bez zákrutu (nebo s minimálním zákrutem). [41].

4.2.1 Skelná vlákna

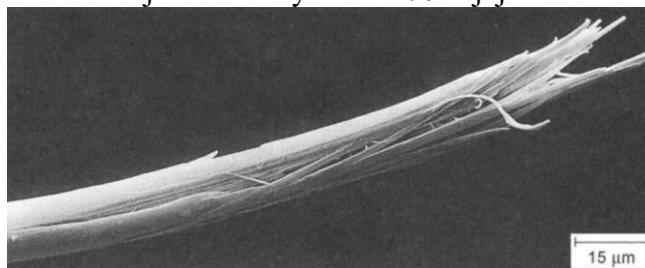
Skelná vlákna (obr. 4.2) jsou vlákna s pravidelným kruhovým průřezem, která jsou nyní jedna z nejatraktivnějších vláken vzhledem k jejich dobrým, mechanickým vlastnostem a nízké ceně. Jsou na bázi oxidu siřičitého (SiO_2) a příměsí dalších oxidů (Fe, Al, B, Ca, Na). Vyrábí se pomocí tažení skla (v tavném stavu), průměr vláken se pohybuje okolo 10 μm . Hlavní výhody jsou odolnost vůči teplotě (dlouhodobě snáší teploty až 450°C) a mnoha chemikáliím. Mají poměrně vysokou pevnost v tahu a nízký modul pružnosti, naopak jejich pevnost snižuje vlhkost a odolnost vůči oděru je rovněž nízká. [40]



Obr. 4.2: Řez skelného vlákna. [40]

4.2.2 Aramidová vlákna

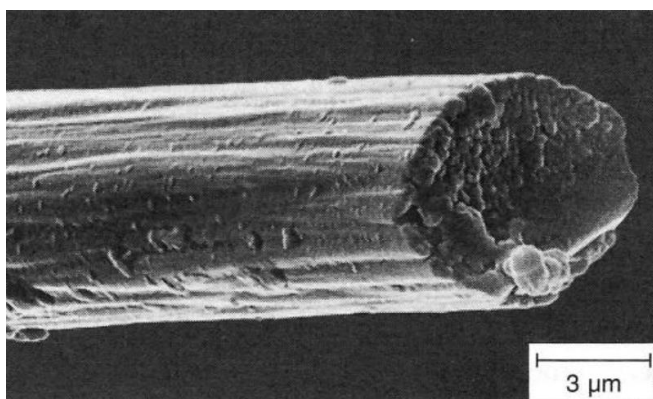
Aramidová vlákna (obr. 4.3) jsou vyrobena na bázi lineárních organických polymerů, jejichž kovalentní vazby jsou orientovány podle osy vlákna. Molekuly jsou navzájem spojeny vazbami vodíkových můstků, aromatická jádra v řetězcích jsou nositeli vysoké tuhosti. Aramidová vlákna se mohou zpracovávat se všemi běžnými reaktivními pryskyřicemi i termoplasty. V hotovém laminátu je možné využít až 70% jejich skutečné pevnosti. Předností těchto vláken je vysoká pevnost a tuhost při nízké specifické hmotnosti. Aramidová, resp. para-aramidová vlákna (vyšší pevnost v tahu a vyšší modul pružnosti) jsou známá jako kevlar [40].



Obr. 4.3: Řez aramidového vlákna. [40]

4.2.3 Uhlíková vlákna

Jedná se o technická vlákna s extrémně vysokou pevností a tuhostí, avšak s nízkou tažností. Pro výrobu uhlíkových vláken se využívají dva výrobní postupy, jeden výrobní postup využívá polyakrylonitrilových vláken (PAN) a druhý vychází přímo ze surovin bohatých na uhlík (celulóza, smola). Uhlíková vlákna (obr. 4.4) jsou technická vlákna o průměru mezi 5 a 10 μm tvořená převážně atomy uhlíku (přibližně 90%, zbytek tvoří dusík, kyslík a vodík). Uhlíková vlákna jsou považována za nejlepší výztuž pro kompozity, zvláště u materiálu zvaném uhlíkový laminát, kde je požadována nízká hmotnost, ale naopak vysoká odolnost vůči dynamickému namáhání. Mezi další jejich vlastnosti patří také vysoká korozní odolnost, dobrá elektrická a tepelná vodivost [40].



Obr. 4.4: Řez uhlíkového vlákna. [40]

4.3 Řezání kompozitního materiálu vodním paprskem

Řezání vodním paprskem získává čím dál větší atraktivitu v oblasti kompozitních materiálů. Nicméně z důvodu delaminace (dezintegrace) vrstev, které mohou vzniknout v oblasti počátečního průniku, se řezání většinou zahajuje na hraně nebo na obrobeném povrchu a posléze vodní paprsek začne postupně pronikat do požadované oblasti. Obrábění vodním paprskem s abrazivem – AWJ, má mnoho výhod oproti ostatním nekonvenčním technologiím obrábění. Ve srovnání s tepelným obráběním (laserem), nevznikají při tomto obráběcím procesu zvýšené teploty, a proto v místě řezu nevzniká tepelně ovlivněná oblast ani žádné tepelné deformace materiálu. Stejně jako laser, je vodní paprsek vhodný pro hrubý stříh, a také lze díky vysoké rychlosti posuvu řezné hlavy tento způsob obrábění považovat za efektivní. Proto je řezání vodním paprskem výhodné pro řezání kompozitních materiálů s polymerní maticí.

Při řezání vodním paprskem vznikají malé řezné síly oproti konvekčním metodám obrábění, proto obecně stačí pouze upnutí nebo přidržení součásti na daném stole. Průnik

vody mezi vrstvami vláken je potenciální problém v případě, že laminát má póry nebo pokud se tlak vody hromadí v jednom místě a nemá kam pronikat, toto je obzvláště problematické v případě nadměrných tlaků vody či velké tloušťce materiálu, kdy síla paprsku není dostačující, aby včas odstranila z povrchu řezu řezné médium. Mezi nevýhody patří drsný povrch způsobený vlivem vroubkovaného povrchu na vstupní části řezané plochy a hrany. Pokud je zapotřebí kvalitnější povrchu řezu, je zapotřebí snížení posuvu rychlosti řezné. Kvalita řezu, zejména drsnost, závisí na tvrdosti a pevnosti vlákna. Například řez borových vláken je mnohem drsnější, než třeba měkčích aramidových vláken [43].

5 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ MATERIÁLU

Práce se zabývá obráběním polymerních kompozitních materiálů pomocí technologie využívající vodní paprsek (hydroabrazivní vodní paprsek - AWJ, vodní paprsek - WJ). Výzkum byl zaměřen na vyhodnocení vlivu rychlosti posuvu řezné hlavy na šířku řezné drážky. Cílem tohoto experimentu je zhodnocení výstupních charakteristik daného materiálu po procesu dělení vybranými metodami se zaměřením se na AWJ a jejich porovnání na základě kterých by mohla být v budoucnu provedena jejich optimalizace.

5.1 Materiál vzorků

Výstupním materiálem pro provedení experimentu je polymerní kompozitní materiál s označením Deltherm 68.890. Jedná se o tepelně izolační materiál, jehož nosič je skelné vlákno a pryskyřice je tvořená z epoxidu. Materiál se vyznačuje vysokou odolností proti stlačování a ohýbání, nízkou absorpcí vody, nízkou tepelnou vodivostí a vysokou rozměrovou stabilitou. Jejich použití umožňuje omezit tepelné ztráty ve výrobním procesu a eliminovat nepřiměřené výrobní náklady [36, 48].

Hlavní použití materiálu je v oblasti izolace vstřikovacích a lisovacích forem, izolace lisovacích desek (pro všechny typy topných procesů), izolace indukčních pecí a lisů pro pneumatiky, dále elektrické obloukové pece a v oblasti sklářského průmyslu.



Obr. 5.1: Kompozitní tepelně izolační materiály. [48]

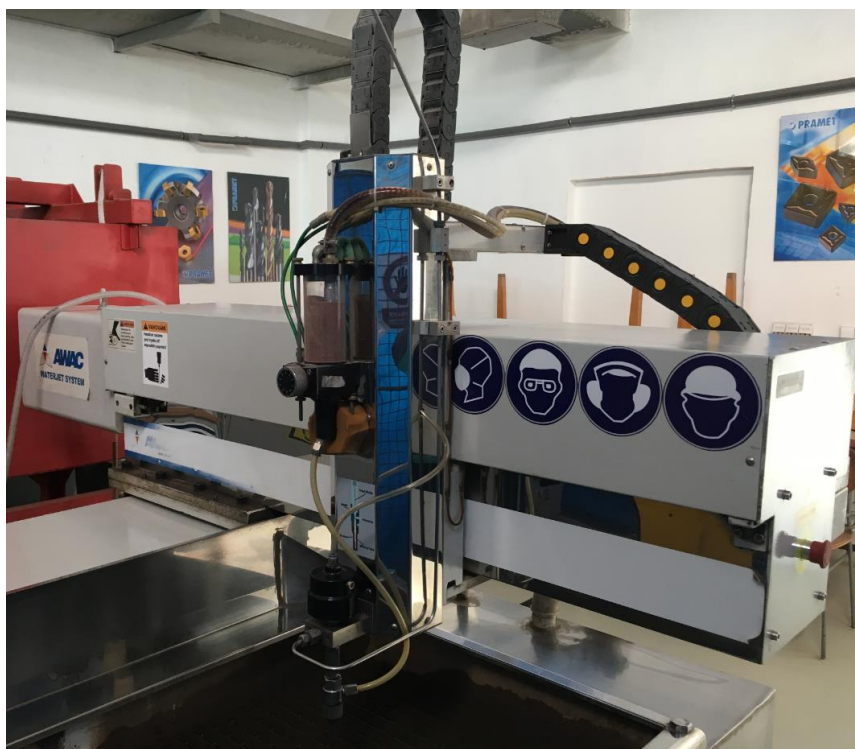
Nízká tepelná vodivost umožňuje dosáhnout značných úspor nákladů na energii (snižuje ztrátu tepla, zabraňuje přenosu tepla například do hydraulického systému). Díky velmi nízké absorpci vody a chemické stability, dochází k prodloužení životnosti tepelně izolačních materiálů. Materiál neobsahuje azbest (nezatěžuje tolik životní prostředí), odolává vysokým teplotám a má dobrou mechanickou odolnost i při zvýšené teplotě. Z mechanického hlediska má tento materiál vysokou mechanickou odolnost při vysokých teplotách, lze ho snadno obrobit (vrtání, soustružení, pískování a obecně splňuje všechny požadavky zákazníků v moderních obráběcích centrech) [37].

Tab. 5.1 Vlastnosti kompozitního materiálu Deltherm 68.890. [36]

ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI			
	Hodnota	Jednotka	Norma
Složení pryskyřice + nosná část	epoxid + skelná matrice		
Tloušťka desky	3-5 ± 0,05	mm	
Barva	žlutá		
MECHANICKÉ VLASTNOSTI			
Pevnost v tlaku	520	MPa	ISO 604
Pevnost v tlaku při 200°C	350	MPa	ISO 604
Pevnost v ohybu	420	MPa	ISO 178
Pevnost v ohybu při 200°C	160	MPa	ISO 178
ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI			
Elektrická pevnost	15	kV/mm	IEC 60243
FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI			
Objemová hmotnost	1,9± 0,01	g/cm ³	ISO 1183
Nasákavost	0,08	%	ISO 62
Teplotní odolnost trvale	240	°C	
Teplotní odolnost krátkodobě	280	°C	
Součinitel prostupu tepla	0,24	W/m.K	DIN 52612

5.2 Příprava vzorků dělením vodního paprsku (AWJ a WJ)

Vytvoření zkušebních vzorků bylo provedeno na výrobním zařízení firmy AWAC, na pracovišti Technické fakulty, České zemědělské univerzity v Praze. Jako typ vysokotlakého vodního paprsku byl použit CNC AWJ CT 0806 (obr. 5.2) a vysokotlaké čerpadlo typ AccuStream A6030 (obr. 5.3).



Obr. 5.2: Obráběcí stroj CNC AWJ CT 0806.



Obr. 5.3: Vysokotlaké čerpadlo AccuStream A-6030.[40]

Uvedené vysokotlaké čerpadlo má výkon 22 kW. Ke kompresi kapaliny využívá dvojitý multiplikátor, jehož násobící poměr je 1:20. Maximální dosažitelný provozní tlak vody se pohybuje okolo 415 MPa a její maximální průtočné množství je až 2,40 l/min (to závisí také na průměru použité vodní trysky). [39]

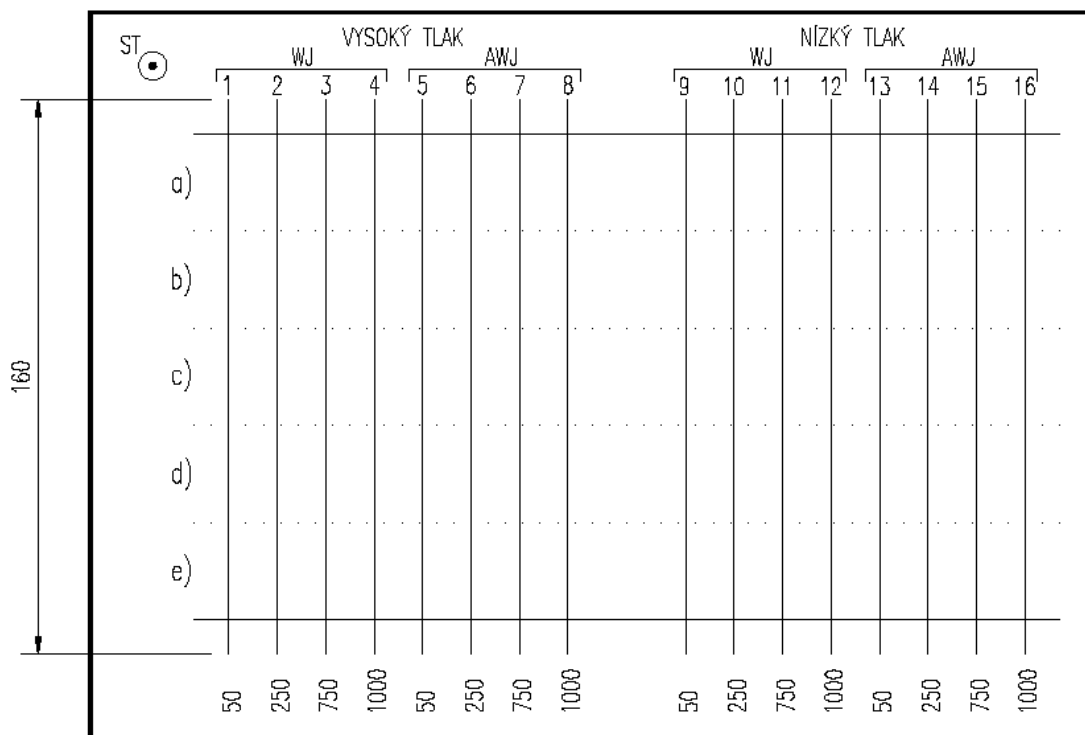
Zkušební vzorky byly řezány pomocí metody AWJ a WJ, při použití metody AWJ bylo použito abrazivo s příměsí granátu a hodnota zrnitosti byla MESH 80. Mechanické dávkování bylo poskytnuto dávkovacím zařízením Bimba Flat.

Veškeré vstupní hodnoty parametrů použité při experimentu byly konstantní, pouze rychlost posuvu řezné hlavy měla různé hodnoty, tj. 50, 250, 750 a 1000 mm/min. Pracovní tlak vysokotlakého vodního paprsku byl 380 MPa. Rychlost se pohybovala až 1000 m/s. Vzdálenost trysky od řezaného materiálu byla 3 mm. Průměr trysky byl 0,8 mm. Úhel trysky vůči kompozitnímu materiálu byl 90 °

Rychlost posuvu řezné hlavy patří k technologicky nejdůležitějším a nejsnáze regulovatelným parametrům výrazně ovlivňujícím výslednou kvalitu řezu. Cílem tohoto experimentu je tedy objasnění vlivu tohoto procesního faktoru na šířku řezu.

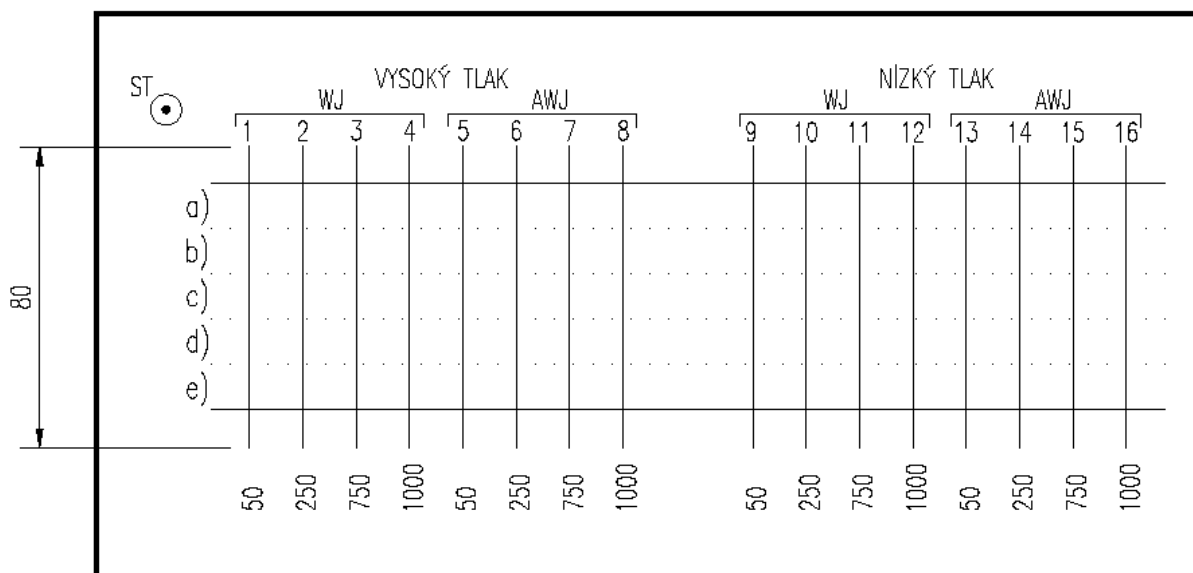
Testovaný kompozitní materiál byl rozdělen na dvě tloušťky stěn. První deska měla tloušťku stěny 4 mm o rozměrech desky 210x290 mm (obr. 5.4). Na desku bylo zhotoveno celkově 16 řezů o různých parametrech. První skupina zhotovených řezů je rozdělena na skupinu řezů zhotovených za vysokého tlaku (380 MPa) – řezy s označením 1-8 a druhá skupina byla zhotovena za nízkého tlaku (200 MPa) – řezy s označením 9-16.

Každá ze skupin obsahuje čtveřici řezů, které byly zhotoveny jinou technologií. Řezy 1 - 4 a 9 – 12 byly zhotoveny technologií WJ (čistý vodní paprsek). Řezy 5 - 8 a 13 – 16 jsou zhotoveny technologií AWJ (abrazivní vodní paprsek). V každé podskupině jsou obsaženy čtyři řezy o rozdílných rychlostech posuvu řezné hlavy. Hodnoty posuvu řezné hlavy jsou 50, 250, 750 a 1000 mm/min. Celková délka řezů je 160 mm. Značka „ST“ znamená středící terč, a slouží k orientaci polohy desky.



Obr. 5.4: Schéma řezacího plánu desky o tloušťce 4mm.

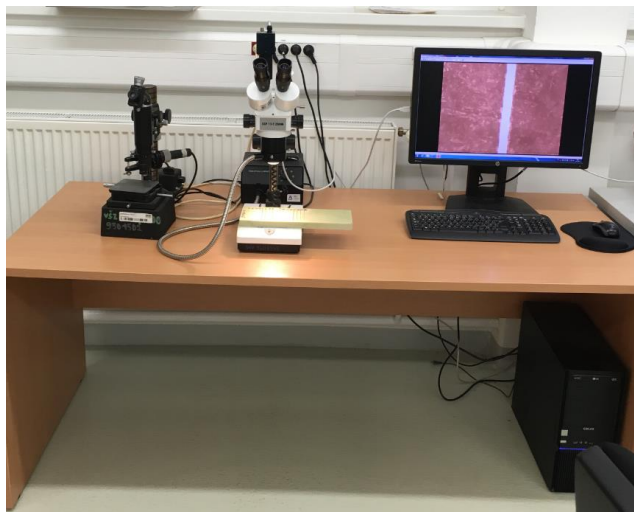
Pro druhou desku byl použit materiál o tloušťce 20mm a rozměrech desky 150x290 mm (obr. 5.5). Na desku bylo také zhotoveno celkově 16 řezů a to ve skupině pro vysoký a nízký tlak, každá skupina také obsahovala podskupiny s jinou technologií zhotovení. V každé podskupině byl každý řez zhotoven v rozdílných rychlostech posuvu řezné hlavy.



Obr. 5.5: Schéma řezacího plánu desky o tloušťce 20 mm.

5.3 Metodika měření topografie povrchu

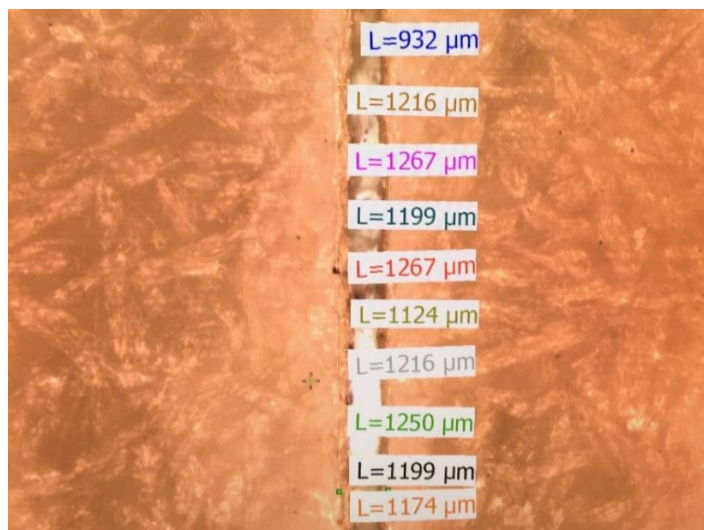
Měření zkušebních vzorků vytvořených jak hydroabrazivním paprskem, tak vodním paprskem bylo provedeno pomocí mikroskopu SZP 11 – T – ZOOM propojeného s počítačem. Vyhodnocení bylo provedeno v prostředí softwaru QuickPHOTO Industrial 2.3 na ČZU – TF v Praze.



Obr. 5.6: Měřící zařízení SZP 11 – T – ZOOM.

Obě dvě desky byly měřeny jak ze vstupní strany (ze strany dopadajícího vodního paprsku), tak z výstupní strany (strany s podřezem). U každé drážky bylo měřeno 5 úseků (úseky a, b, c, d, e). První úsek (a) a poslední úsek (e) začínaly a končily přibližně 10 mm od začátku a konce drážky, z důvodu náběhu a doběhu vodního paprsku. (obr. 5.4 a obr 5.5).

Každý daný úsek drážky byl měřen na deseti místech pomocí softwaru (obr. 5.7), aby bylo dosaženo co nejpřesnějšího měření.

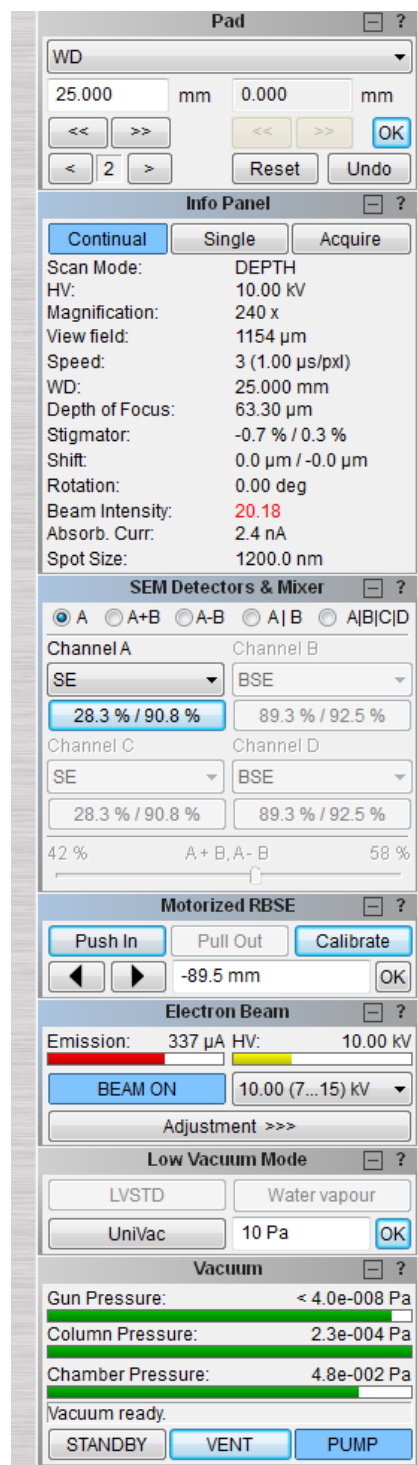


Obr. 5.7: Měření šířky drážky daného úseku.

Po zhodnocení řezů optickou analýzou za pomoci mikroskopu SZP 11 – T – ZOOM byly vybrány nejvhodnější vzorky pro zhotovení další analýzy za pomoci SEM mikroskopu.

Rastrovací elektronový mikroskop (SEM) je zařízení, které využívá k zobrazování pohyblivého svazku urychlených elektronů. Mikroskop pracuje s tenkým svazkem elektronů, který dopadá postupně na celý povrch vzorku. Při interakci elektronů s povrchem sledovaného vzorku vzniká celá řada druhů záření. Tato záření jsou detekována a na základě toho se tvoří různé typy obrazu, které nám poskytují o zkoumaném vzorku různé informace. SEM umožňuje pozorovat celistvé vzorky, jejich povrch však musí být vodivý, toho se u nevodivých materiálů docíluje naprášením nebo napařením tenkých vodivých vrstev, nejčastěji uhlíku, nebo směsi zlata a palladia (v našem případě zlata), aby docházelo k odvodu elektrostatického náboje, který vzniká při dopadu primárních paprsků. Pozorování se provádí ve vakuu. V našem případě bylo zvoleno urychlovací napětí 10 kV. Pro měření metodou SEM byl zvolen vzorek (deska) o tloušťce 20 mm z důvodu větší zkoumané plochy, a také pro stabilnější a jednodušší měření. [46]

Vyhodnoceny byly tři řezy (řezy č. 5-7) a to z obou jejich stran. Řezy byly zhotoveny pomocí technologie AWJ za vysokého tlaku. Na obrázku 5.5 lze vidět, že rychlost posuvu řezné hlavy pro tyto řezy se pohyboval od 50 mm/min do 250 mm/min. Fotografie, které byly během tohoto měření pořízeny, nalezneme v kapitole 7.3.

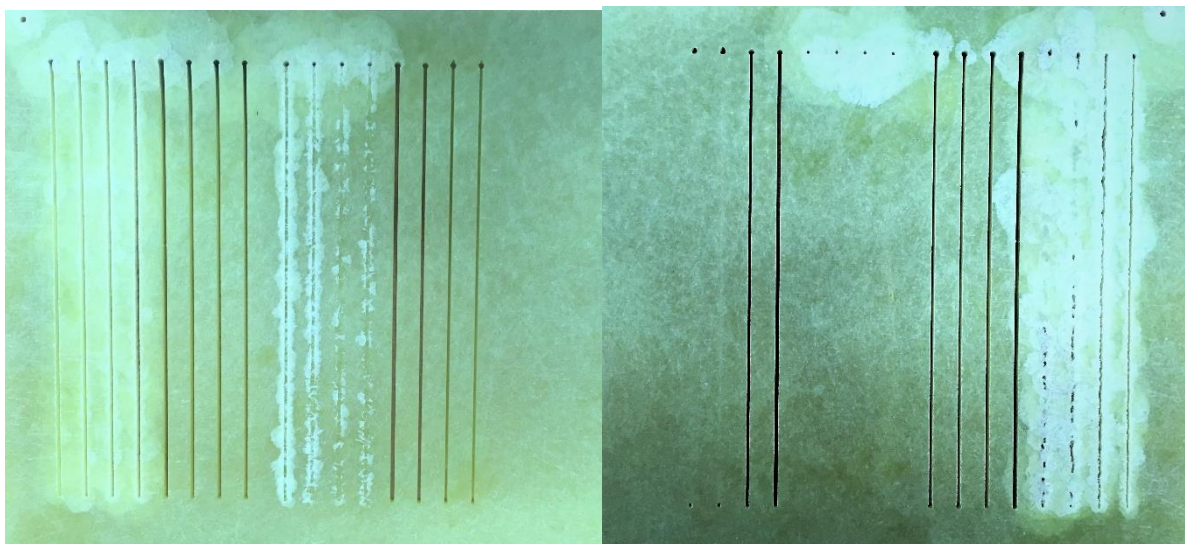


Obr. 5.8: Nastavení SEM mikroskopu.

6 HODNOCENÍ PARAMETRU ŘEZNÝCH DRÁŽEK

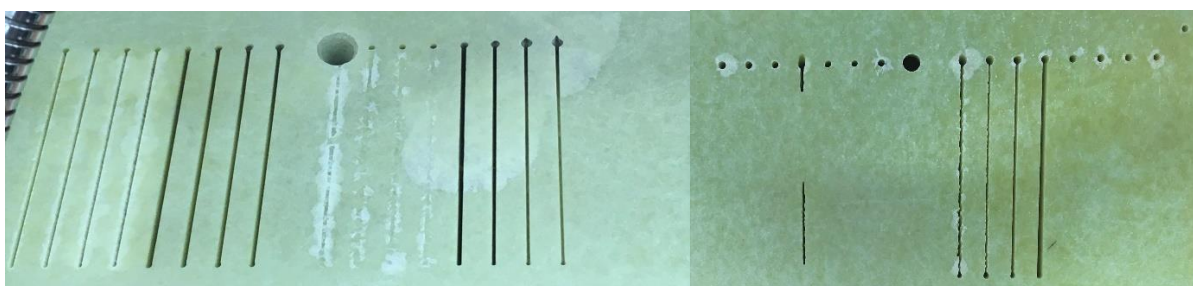
Každá deska obsahuje celkem 16 řezů. Každý řez byl řezán za určitých podmínek (rychlost řezací hlavy, velikost tlaku, metoda řezání a tloušťka materiálu). Každý řez byl rozdělen na 5 úseků a v každém úseku bylo naměřeno 10 hodnot šířky řezu.

Na obrázcích 6.1 a 6.2 jsou znázorněny řezané desky a to jak ze vstupní strany, tak z výstupní strany. V této kapitole bude posouzen každý řez jednotlivě dle naměřených hodnot, dále budou také posouzeny řezy dle způsobu řezacího média (WJ a AWJ), na konci kapitoly budou vyhodnoceny nejlepší řezné podmínky z tohoto experimentu.



Obr. 6.1: Fotografie povrchu desky o tloušťce 4 mm.

a) vstupní strana desky b) výstupní strana desky



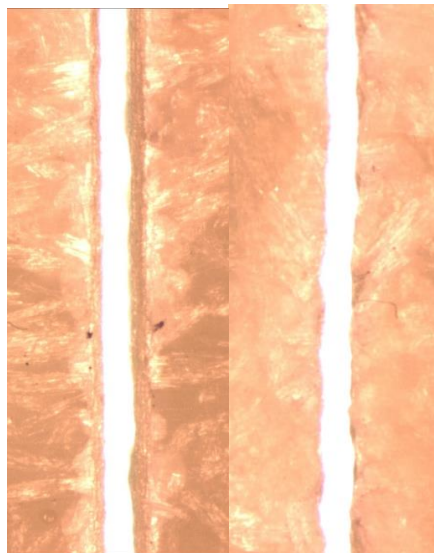
Obr. 6.2: Fotografie povrchu desky o tloušťce 20 mm.

a) vstupní strana desky b) výstupní strana desky

6.1 Deska o tloušťce 4 mm

Řez č. 1

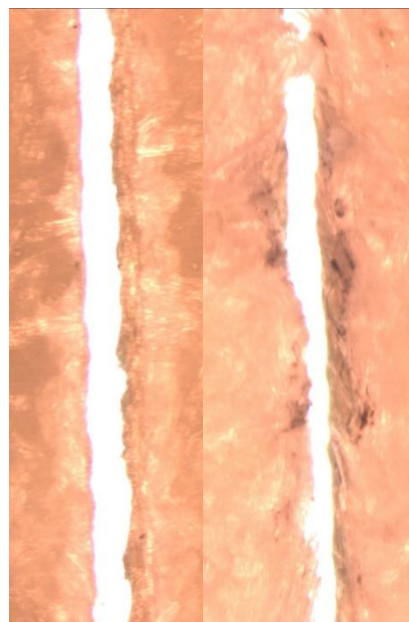
Řez č. 1 byl řezán při vysokém tlaku (380 MPa) za použití technologie WJ (Water Jet), posuv řezné hlavy byl 50 mm/min. Na obrázku 6.3 lze vidět, že řez je průchozí skrz celý materiál a na obrázku 6.1 je patrné, že i celý řez je průchozí v celé jeho délce. Na obrázku je také patrné, že řez nemá stálou šířku řezu a že jsou patrné menší odchylky v šířce řezu. Z měření bylo zjištěno, že šířka řezu z vstupní strany se pohybovala od 990 do 1384 μm a střední hodnota šířky řezu byla 1307 μm , v místě podřezu byla šířka řezu od 495 do 847 μm a střední hodnota šířky podřezu byla 660 μm (obr. 6.7).



Obr. 6.3: Řez č. 1 kompozitní desky o tloušťce 4 mm. a) vstupní strana, b) výstupní strana.

Řez č. 2

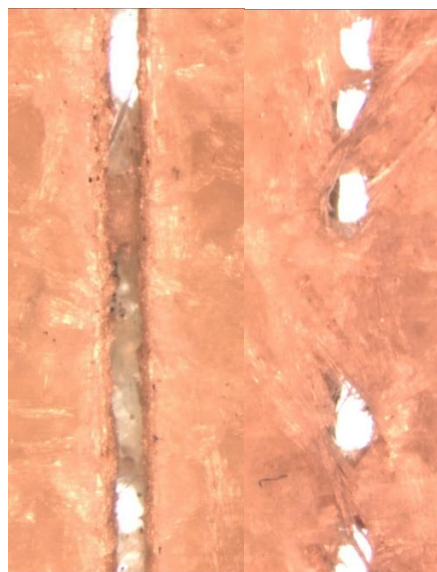
Řez č. 2 byl řezán při vysokém tlaku (380 MPa) za použití technologie WJ (Water Jet), posuv řezné hlavy byl 250 mm/min. Na obrázku 6.4 jsou patrné ostřejší a méně pravidelnější hrany než u řezu č. 1, avšak řez prochází skrz celý materiál a i na obrázku 6.1 je patrné, že materiál je proříznut v celé délce řezu. Z měření bylo zjištěno, že šířka řezu se pohybovala od 839 do 1268 μm a střední hodnota šířky řezu byla 1070 μm , v místě podřezu byla šířka řezu od 193 do 772 μm a střední hodnota šířky řezu byla 536 μm (obr. 6.7).



Obr. 6.4: Řez č. 2 kompozitní desky o tloušťce 4 mm. a) vstupní strana, b) výstupní strana.

Řez č. 3

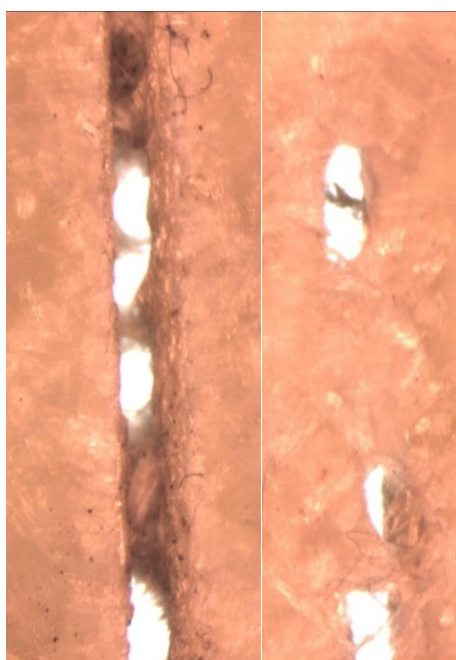
Řez č. 3 byl řezán při vysokém tlaku (380 MPa) za použití technologie WJ (Water Jet), posuv řezné hlavy byl 500 mm/min. Na obrázku 6.5 jsou patrné tzv. ostrůvky neboli místa, kde řez neprocházel skrz celý materiál. Z měření bylo zjištěno, že šířka řezu se pohybovala od 990 do 1217 μm a střední hodnota šířky řezu byla 1164 μm , v místě podřezu byla jeho šířka po započtení tzv. ostrůvků od 0 do 865 μm a střední hodnota šířky podřezu byla 359 μm (obr. 6.7).



Obr. 6.5: Řez č. 3 kompozitní desky o tloušťce 4 mm. a) vstupní strana, b) výstupní strana.

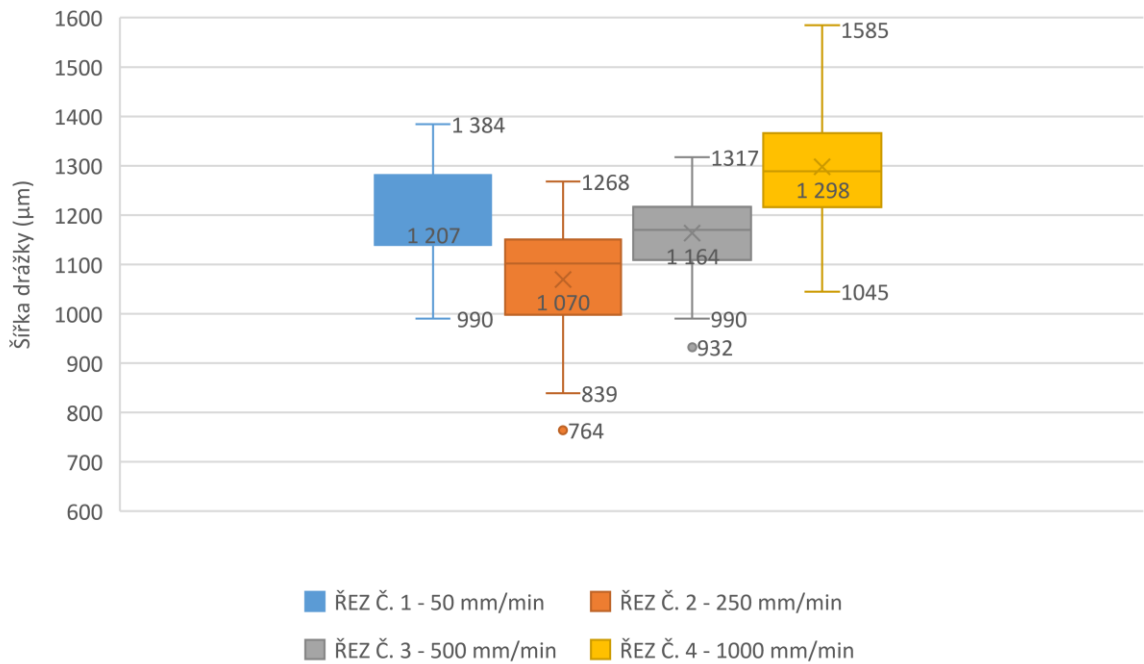
Řez č. 4

Řez č. 4 byl řezán při vysokém tlaku (380 MPa) za použití technologie WJ (Water Jet), posuv řezné hlavy byl 1000 mm/min. Na obrázku 6.6 lze pozorovat, že díky velké rychlosti řezací hlavy byl materiál ve velké části řezu nedoříznutý. Z měření bylo zjištěno, že šířka řezu se pohybovala od 1045 do 1585 μm a střední hodnota šířky řezu byla 1298 μm v místě podřezu byla jeho šířka od 0 do 914 μm , jelikož větší část materiálu nebylo proříznuto, nemá význam zaznamenávat střední hodnotu podřezu (obr. 6.7).

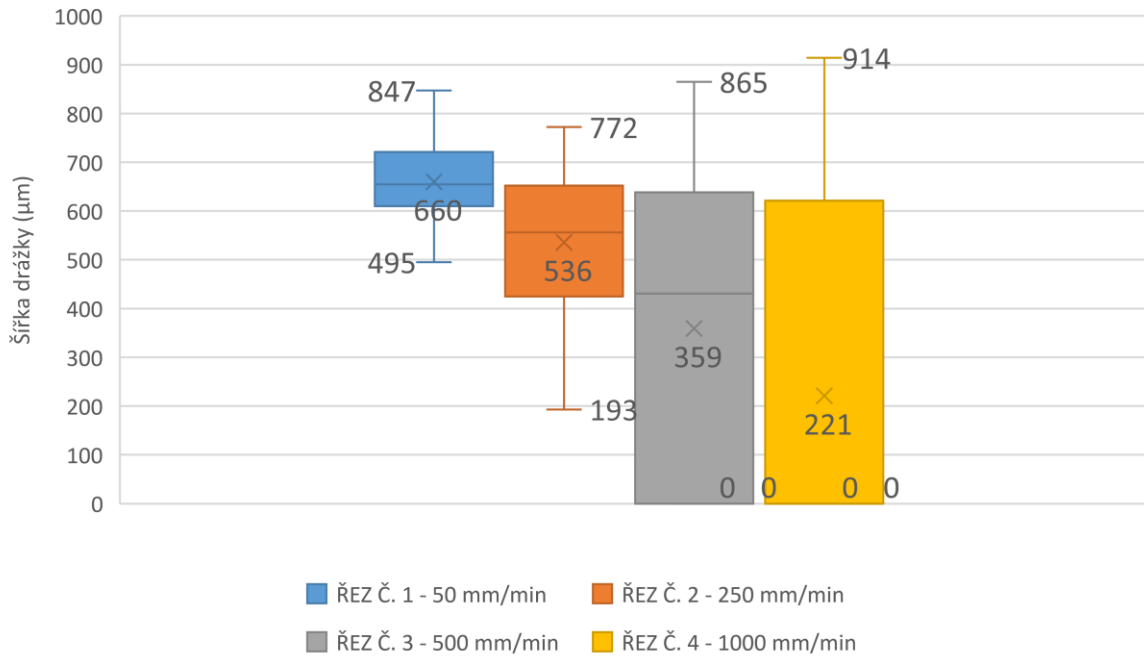


Obr. 6.6: Řez č. 4 kompozitní desky o tloušťce 4 mm. a) vstupní strana, b) výstupní strana.

VYSOKÝ TLAK VSTUPNÍ STRANA - WJ



VYSOKÝ TLAK VÝSTUPNÍ STRANA - WJ

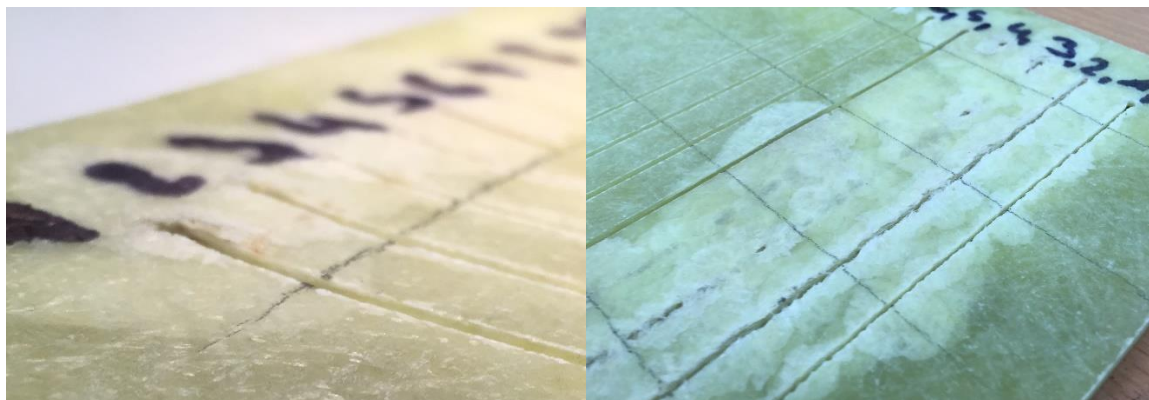


Obr. 6.7: Grafy řezů č. 1-4 metodou WJ. a) vstupní strana b) výstupní strana desky

Posouzení řezu č. 1 - 4

Dle naměřených hodnot u vstupní strany desky (obr. 6.7) se jeví jako nejlepší řez č. 2, který má střední hodnotu šířky řezu 1070 μm , avšak se zohledněním hodnot, které byly naměřeny na výstupní části desky (podřez se jeví jako nejlepší řez č. 1, protože z obou dvou stran má řez nejhladší (nejkvalitnější) povrch řezu.

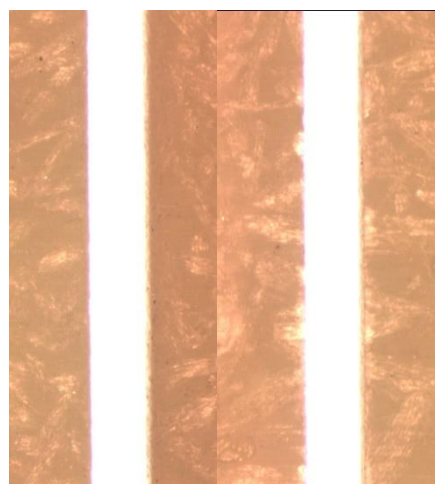
Z obrázku 6.8 a) lze zpozorovat určitý prořez materiálu neboli dezintegrace materiálu v místě rozběhu paprsku. Na výstupní straně desky (obr. 6.8 b) lze zpozorovat rozsáhlý podřez materiálu po celé délce všech řezů, což zásadně ovlivňuje kvalitu daného výrobku.



Obr. 6.8: Podřez u řezů č. 1-4 kompozitní desky (tl. 4 mm) - a) vstupní strana, b) výstupní strana.

Řez č. 5

Řez č. 5 byl řezán při vysokém tlaku (380 MPa) za použití technologie AWJ (Abrasive Water Jet), posuv řezné hlavy byl 50 mm/min. Na obrázku 6.9 lze vidět rovnoměrně proříznutý materiál v celé jeho tloušťce. Z měření bylo zjištěno, že šířka řezu z vstupní strany se pohybovala od 1552 do 1744 μm a střední hodnota šířky řezu byla 1639 μm , v místě podřezu byla šířka řezu od 1418 do 1677 μm a střední hodnota šířky podřezu byla 1532 μm . (obr. 6.13).



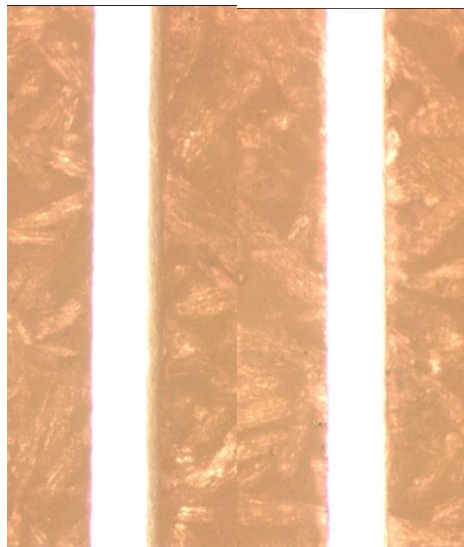
Obr. 6.9: Řez č. 5 kompozitní desky o tloušťce 4 mm. a) vstupní strana, b) výstupní strana.

Řez č. 6

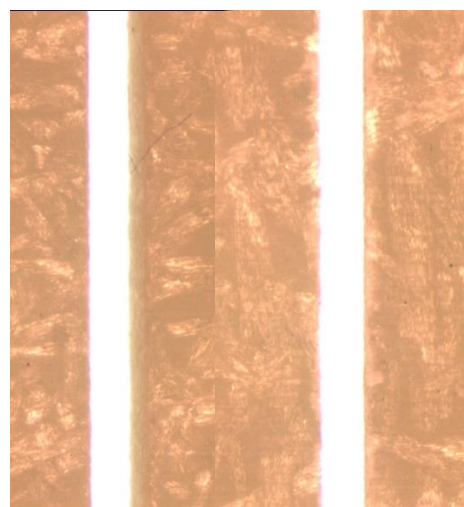
Řez č. 6 byl řezán při vysokém tlaku (380 MPa) za použití technologie AWJ (Abrasive Water Jet), posuv řezné hlavy byl 250 mm/min. Na obrázku 5.10 lze vidět stejně jako v předchozím řezu (obr. 6.9) rovnoměrně proříznutý materiál v celé jeho tloušťce. Z měření bylo zjištěno, že šířka řezu z vstupní strany se pohybovala od 1424 do 1661 μm a střední hodnota řezu byla 1555 μm , v místě podřezu byla šířka řezu od 1208 do 1537 μm a střední hodnota podřezu byla 1368 μm . (obr. 6.13)

Řez č. 7

Řez č. 7 byl řezán při vysokém tlaku (380 MPa) za použití technologie AWJ (Abrasive Water Jet), posuv řezné hlavy byl 500 mm/min. Na obrázku 6.11 lze také vidět krásně rovnoměrný řez skrz materiál v celé jeho tloušťce. Z měření bylo zjištěno, že šířka řezu z vstupní strany se pohybovala od 1333 do 1568 μm a střední hodnota řezu byla 1444 μm , v místě podřezu byla šířka řezu od 1057 do 1267 μm a střední hodnota podřezu byla 1163 μm . (obr. 6.13)



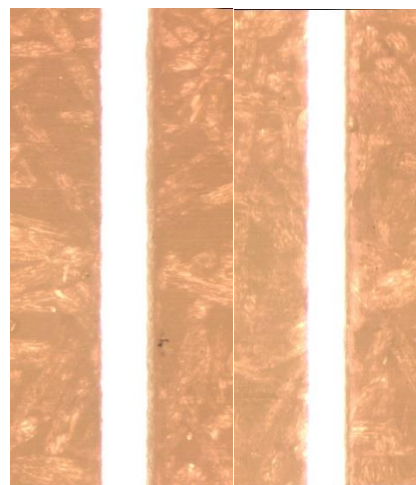
Obr. 6.10: Řez č. 6 kompozitní desky o tloušťce 4 mm. a) vstupní strana, b) výstupní strana.



Obr. 6.11: Řez č. 7 kompozitní desky o tloušťce 4 mm. a) vstupní strana, b) výstupní strana.

Řez č. 8

Řez č. 8 byl řezán při vysokém tlaku (380 MPa) za použití technologie AWJ (Abrasive Water Jet), posuv řezné hlavy byl 1000 mm/min. Na obrázku 6.12 stejně jako u předešlých řezů řezaných za pomoci abraziva je rovnoměrný řez po celé jeho tloušťce. Z měření bylo zjištěno, že šířka řezu z vstupní strany se pohybovala od 1284 do 1552 μm a střední hodnota šířky řezu byla 1425 μm , v místě podřezu byla šířka řezu od 981 do 1200 μm a střední hodnota šířky podřezu byla 1099 μm (obr. 6.13).

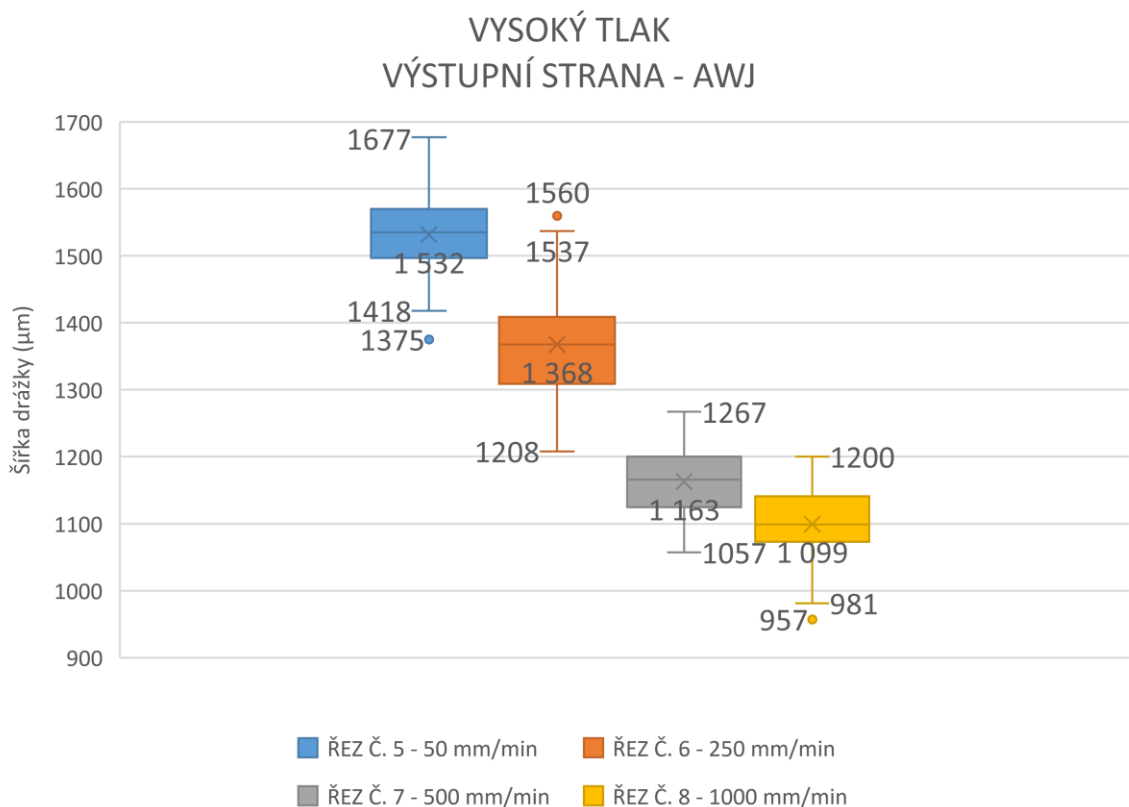
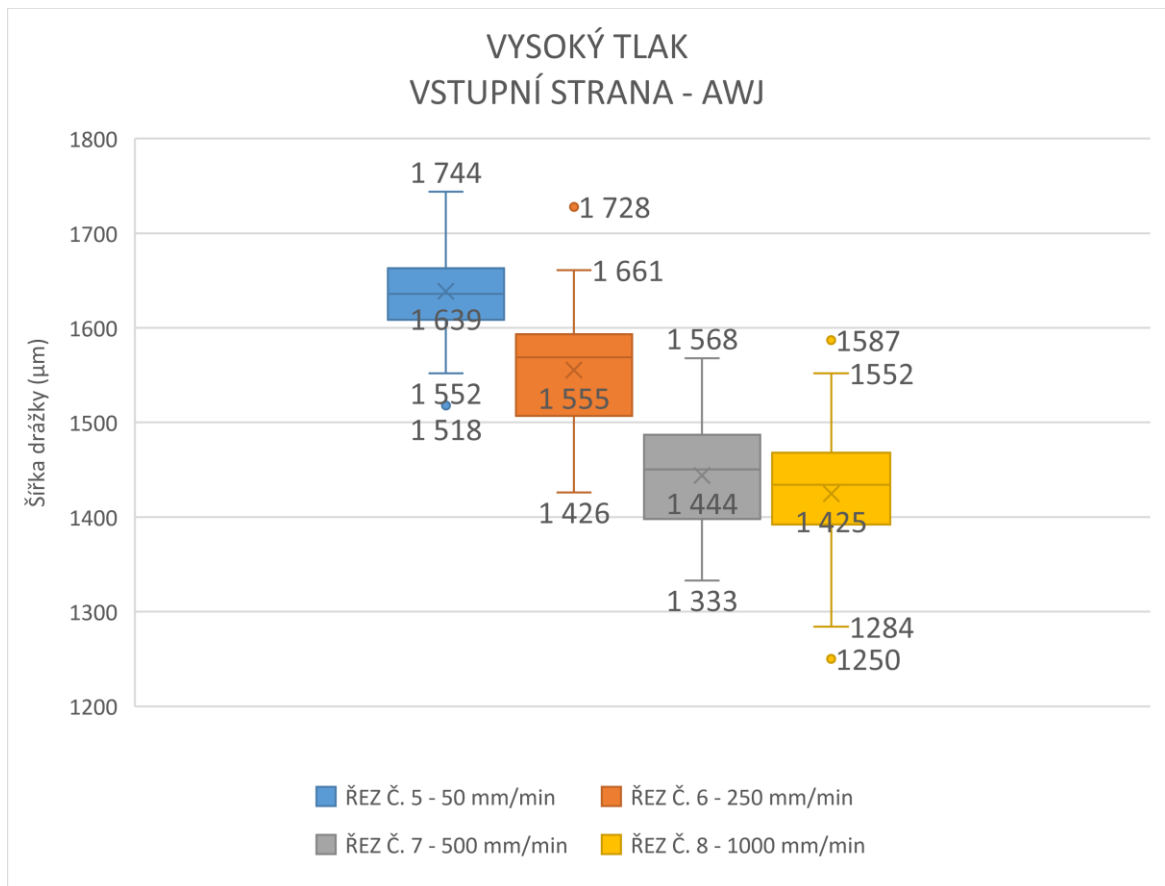


Obr. 6.12: Řez č. 8 kompozitní desky o tloušťce 4 mm. a) vstupní strana, b) výstupní strana.

Posouzení řezu č. 5 - 8

Řezy 5-8, které byly řezány technologií AWJ mají rovnoměrnou šířku řezu, jednotlivé řezy se od sebe dají rozlišit pouze šířkou řezu - homogenita všech čtyř řezů dle optické analýzy vyšla velmi podobně. Největší šířkou řezné čáry včetně šířky podřezu je řez č. 5 (rychlost řezné hlavy činila 50 mm/min). Střední hodnota šířky tohoto řezu činí 1639 μm .

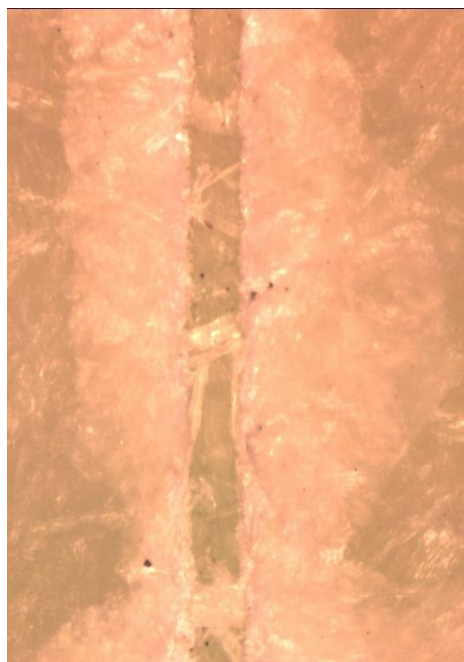
Řez s nejlepšími hodnotami vyšel řez č. 8, kde posuv řezné hlavy činil 1000 mm/min. Střední hodnota šířky tohoto řezu byla nejmenší, a to 1425 μm podřezu a měl také nejmenší střední hodnotu šířky a to 1099 μm .



Obr. 6.13: Grafy řezů č. 5-8 metodou AWJ. a) vstupní strana b) výstupní strana desky

Řez č. 9

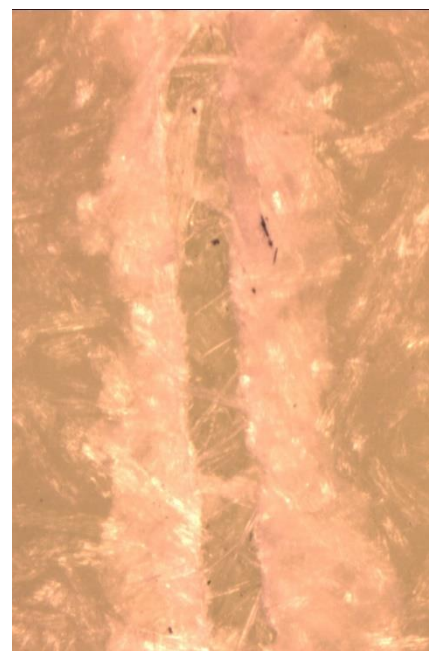
Řez č. 9 byl řezán při nízkém tlaku (200 MPa) za použití technologie WJ (Water Jet), posuv řezné hlavy byl 50 mm/min. Na obrázku 6.14 je patrné, že paprsek neprošel skrz celý materiál. Hloubka řezu je v desetinách milimetru, proto se dá říci, že tato metoda spíše spadá pod gravírování povrchu. Tento řez má také ovlivněnou velkou část povrchu (obr. 6.14), kde v okolí řezu vodní paprsek narušil integritu materiálu a proniknul do výstupní vrstvy. Z měření bylo zjištěno, že šířka gravírovaného řezu se pohybovala od 931 do 1317 μm a střední hodnota šířky řezu byla 1096 μm (obr. 6.19).



Obr. 6.14: Řez č. 9: vstupní strana kompozitní desky o tloušťce 4 mm.

Řez č. 10

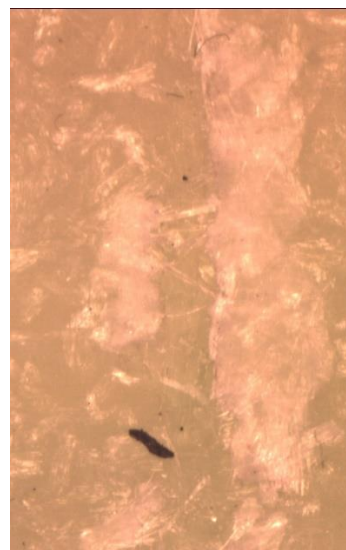
Řez č. 10 byl řezán při nízkém tlaku (200 MPa) za použití technologie WJ (Water Jet), posuv řezné hlavy byl 250 mm/min. Na obrázku 6.15 lze vidět, že paprsek vygravíroval drážku, která má však menší ovlivněnou oblast řezu než řez č. 9, ale také menší hloubku. Tento fakt je způsoben rychlostí řezací hlavy paprsku, která je v tomto případě větší, a proto nemůže více ovlivnit danou oblast. Z měření bylo zjištěno, že šířka gravírovaného řezu se pohybovala od 882 do 2097 μm a střední hodnota šířky řezu byla 1328 μm (obr. 6.19). Takto velký rozptyl hodnot je způsoben tím, že paprsek neřeže materiál, ale spíše „odštipuje“ z povrchu daný materiál.



Obr. 6.15: Řez č. 10: vstupní strana kompozitní desky o tloušťce 4 mm.

Řez č. 11

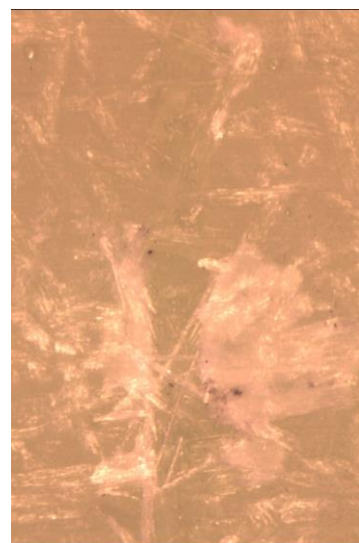
Řez č. 11 byl řezán při nízkém tlaku (200 MPa) za použití technologie WJ (Water Jet), posuv řezné hlavy byl 500 mm/min. Na obrázku 6.16 lze sotva zpozorovat řez. Od paprsku je narušena pouze vstupní vrstva materiálu. Z měření bylo zjištěno, že část řezu, který byl měřitelný, se jeho hodnoty se pohybovaly od 800 do 1997 μm a střední hodnota šířky řezu byla 1471 μm . Oproti předchozím řezům se u tohoto řezu nedá počítat ani s gravírováním povrchu, spíše s pouhým narušením vstupní vrstvy materiálu.



Obr. 6.16: Řez č. 11: vstupní strana kompozitní desky o tloušťce 4 mm.

Řez č. 12

Řez č. 12 byl řezán při nízkém tlaku (200 MPa) za použití technologie WJ (Water Jet), posuv řezné hlavy byl 1000 mm/min. Na obrázku 6.17 je sotva znatelný zásadnější zásah vodního paprsku, proto bylo obtížné u tohoto řezu spočítat větší množství řezné šířky řezu. Z tohoto důvodu má tento řez největší odchylku hodnot šířky řezu oproti ostatním řezům, které byly řezány metodou WJ za nižšího tlaku. Hodnoty šířky řezu byly naměřeny od 910 do 2415 μm a střední hodnota šířky řezu byla 1630 μm .



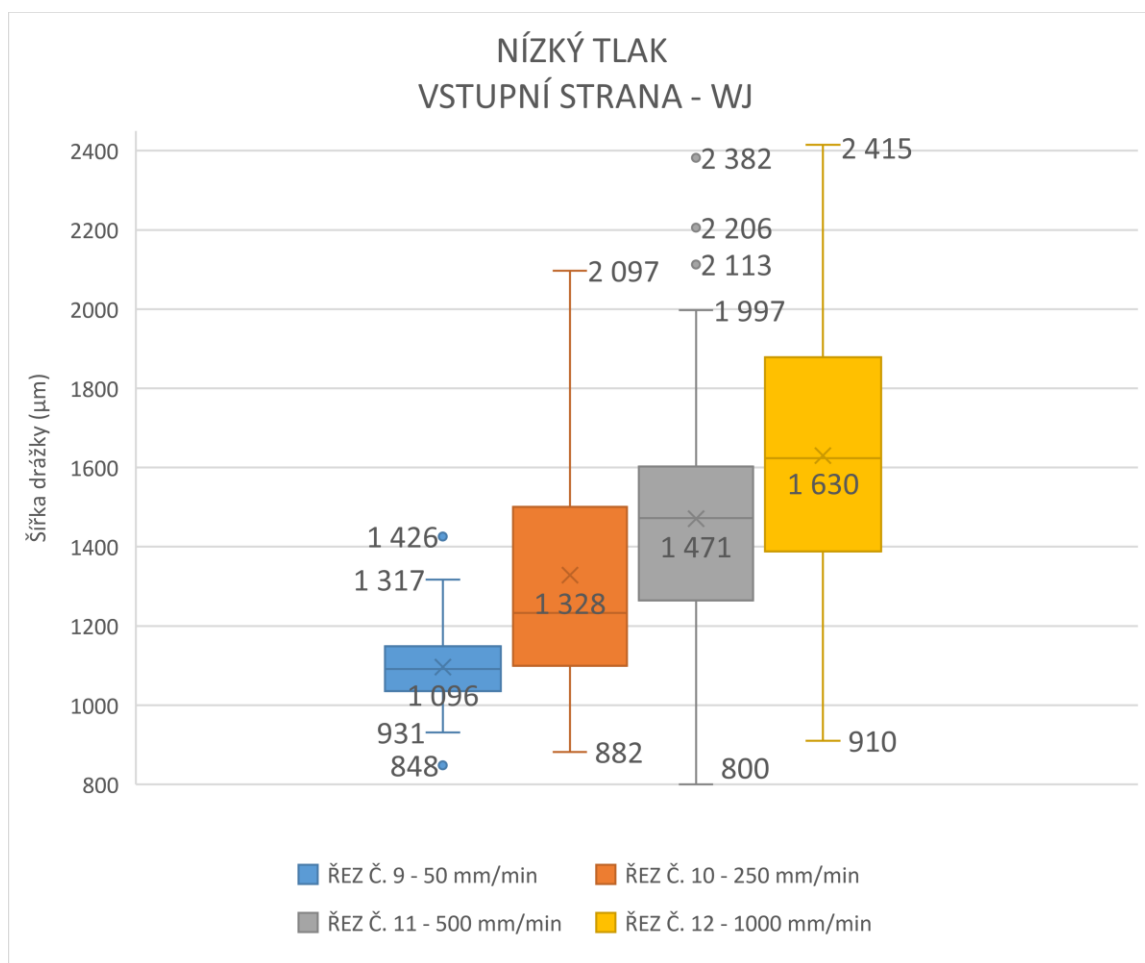
Obr. 6.17: Řez č. 12: vstupní strana kompozitní desky o tloušťce 4 mm.

Posouzení řezu č. 9 - 12

Při tlaku o hodnotě 200 MPa a technologii WJ není vhodné použít tyto řezné podmínky pro řezání tohoto kompozitního materiálu. Řez č. 9, jehož posuv řezné hlavy činil 50 mm/min lze nazývat gravírováním, avšak jeho okolní ovlivněná oblast je příliš velká, aby v praxi přinesla širší využití. U ostatních řezů bylo dosaženo závěru, že ani v jednom případě nejsou řezné podmínky uspokojivé. (Obr. 6.18)



Obr. 6.18: Řezy č. 9 (zleva) až 12 (zprava) vstupní strany kompozitní desky o tloušťce 4 mm.



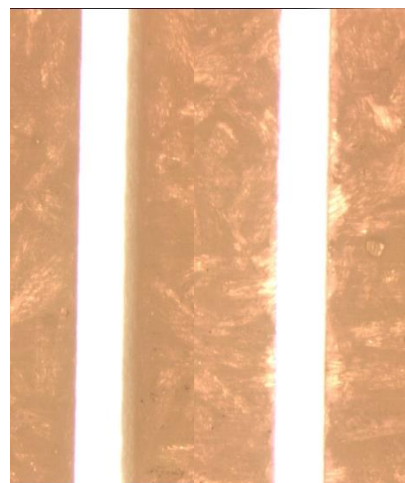
Obr. 6.19: Graf řezů č. 9-12 metodou WJ.

Řez č. 13

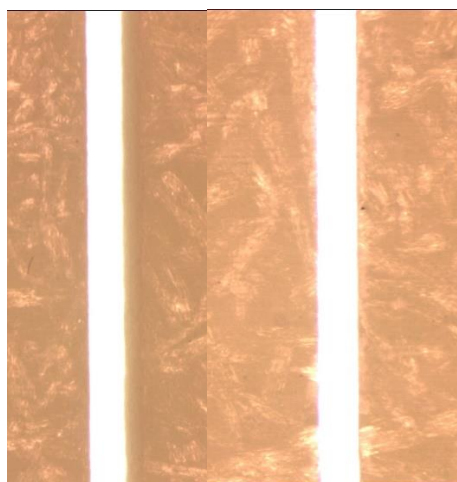
Řez č. 13 byl řezán při nízkém tlaku (200 MPa) za použití technologie AWJ (Abrasive Water Jet), posuv řezné hlavy byl 50 mm/min. Na obrázku 6.20 lze vidět rovnoměrně proříznutý materiál v celé jeho tloušťce. Z měření bylo zjištěno, že šířka řezu z vstupní strany byla v rozmezí od 1159 do 1871 μm a střední hodnota šířky řezu byla 1663 μm , v místě podřezu byla šířka řezu od 1268 do 1442 μm a střední hodnota šířky podřezu byla 1356 μm (obr. 6.25).

Řez č. 14

Řez č. 14 byl řezán při nízkém tlaku (200 MPa) za použití technologie AWJ (Abrasive Water Jet), posuv řezné hlavy byl 250 mm/min. Na obrázku 6.21 lze vidět také rovnoměrný řez skrz celou tloušťku materiálu. Z měření bylo zjištěno, že šířka řezu z vstupní strany byla v rozmezí od 1368 do 1720 μm a střední hodnota šířky řezu byla 1544 μm , v místě podřezu byla šířka řezu od 998 do 1174 μm a střední hodnota šířky podřezu byla 1083 μm . (obr. 6.25)



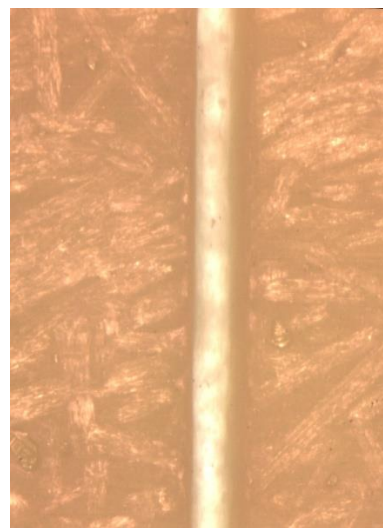
Obr. 6.20: Řez č. 13 kompozitní desky o tloušťce 4 mm. a) vstupní strana, b) výstupní strana.



Obr. 6.21: Řez č. 14 kompozitní desky o tloušťce 4 mm. a) vstupní strana, b) výstupní strana.

Řez č. 15

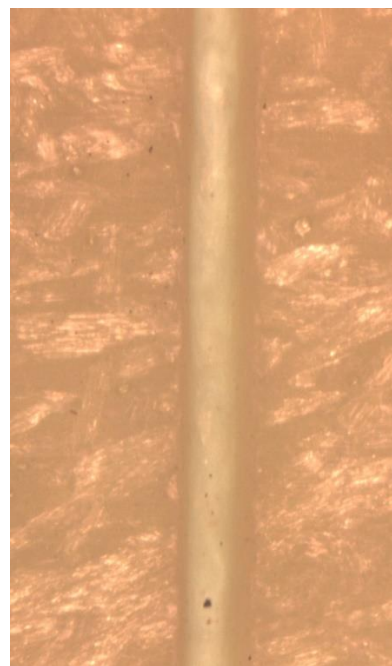
Řez č. 15 byl řezán při nízkém tlaku (200 MPa) za použití technologie AWJ (Abrasive Water Jet), posuv řezné hlavy byl 500 mm/min. Na obrázku 6.22 lze vidět, že materiál nebyl proříznut skrz celou tloušťku materiálu, z výstupní části řezu lze pozorovat pronikající světlo. Z toho lze odvodit, že tloušťka zbývajícího materiálu je v řádech několika setin milimetru. Z měření bylo zjištěno, že šířka řezu z vstupní strany byla v rozmezí od 1199 do 1678 μm a střední hodnota šířky řezu byla 1447 μm . (obr. 6.25)



Obr. 6.22: Řez č. 15 kompozitní desky o tloušťce 4 mm. a) vstupní strana, b) výstupní strana.

Řez č. 16

Řez č. 16 byl řezán při nízkém tlaku (200 MPa) za použití technologie AWJ (Abrasive Water Jet), posuv řezné hlavy byl 1000 mm/min. Na obrázku 6.23 je neproříznutá vrstva větší než u předešlého řezu, to je způsobeno rychlostí řezací hlavy. Na dně řezu je možné spatřit zbylé částičky abraziva. Z měření bylo zjištěno, že šířka řezu z vstupní strany desky byla v rozmezí od 1183 do 1554 μm a střední hodnota šířky řezu byla 1394 μm (obr. 6.25).



Obr. 6.23: Řez č. 16 kompozitní desky o tloušťce 4 mm. a) vstupní strana, b) výstupní strana.

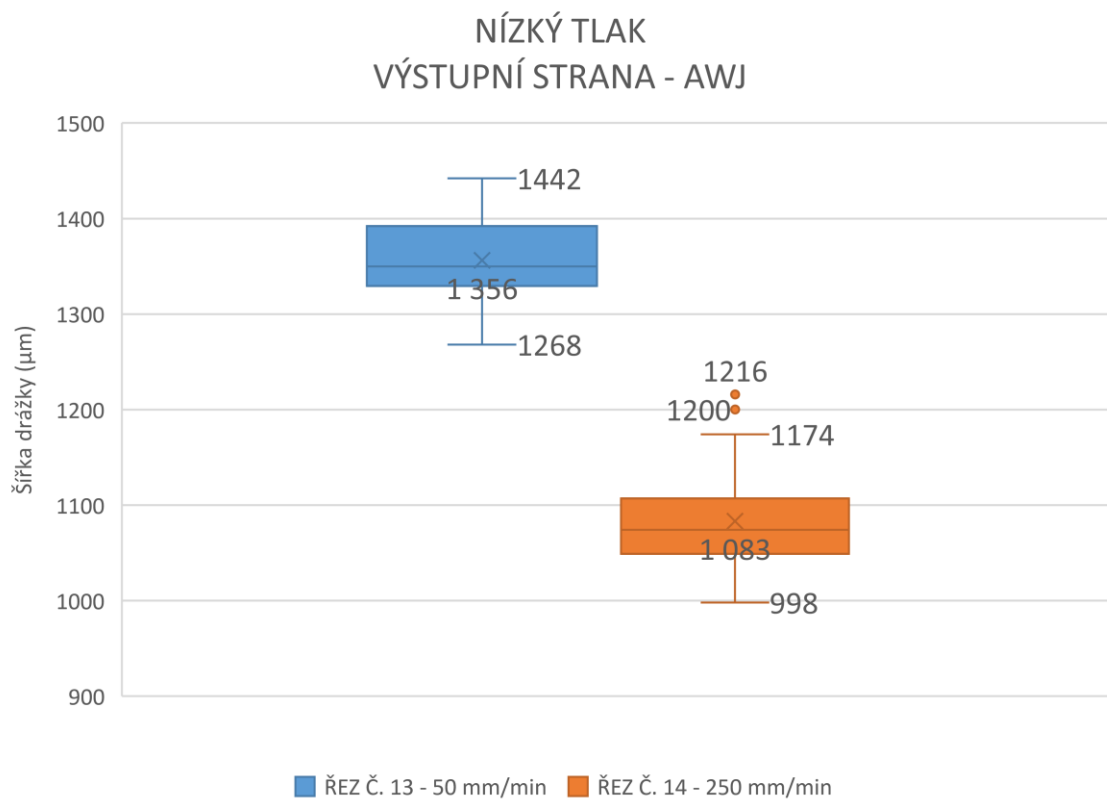
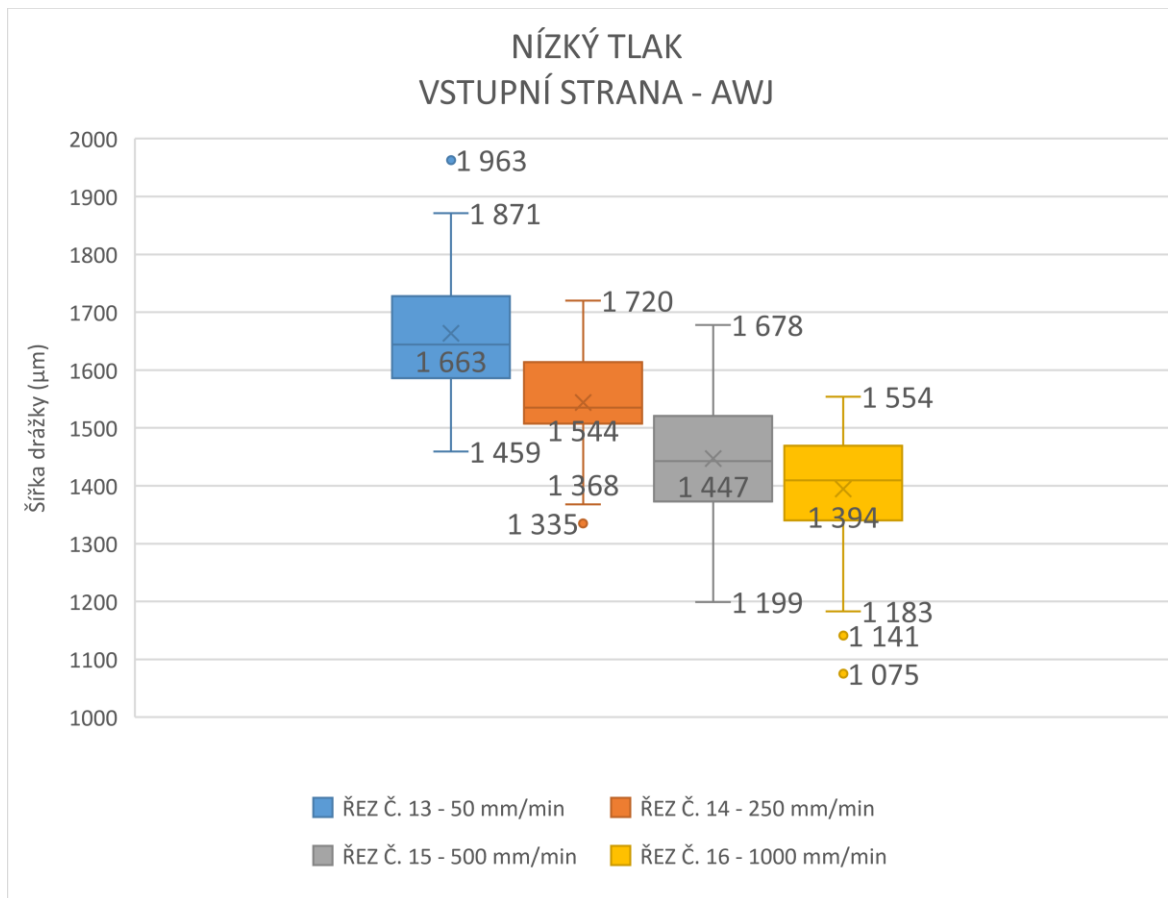
Posouzení řezu č. 13 - 16

Při tlaku 200 MPa měl nejnižší šířku řezu řez č. 16 (při posuvu 1000 mm/min), ale při této rychlosti posuvu proud vody nestačil odebrat materiál v celém jeho rozsahu. Řez, u něhož byl všechn materiál odebrán a měl nejmenší šířku řezu, byl řez č. 14 (při posuvu 250 mm/min), jehož střední hodnota šířky řezu byla 1544 μm a střední hodnota šířky podřezu byla 1083 μm .

Řez č. 15 nebyl průchozí skrz celou tloušťku materiálu, ale u obrázku 6.24 lze zpozorovat velmi malou vrstvu zbývajícího materiálu. Proto kdyby se nastavila taková řezná rychlost, která je nižší než 500 mm/min (doporučeno 400 mm/min), aby byl všechn řezný materiál odstraněn. Tak bychom určitě dosáhli nižších hodnot šířky řezu než u řezu č. 14 a materiál by byl proříznutý v celé jeho tloušťce materiálu.



Obr. 6.24: Řezy č. 13 (zprava) až 15 (zleva) výstupní strany kompozitní desky o tloušťce 4 mm.

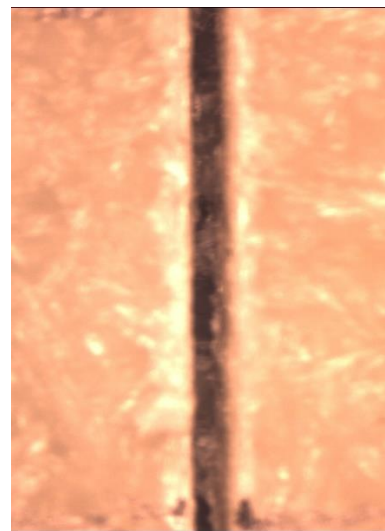


Obr. 6.25: Grafy řezů č. 5-8 metodou AWJ. a) vstupní strana b) výstupní strana desky

6.2 Deska o tloušťce 20 mm

Řez č. 1

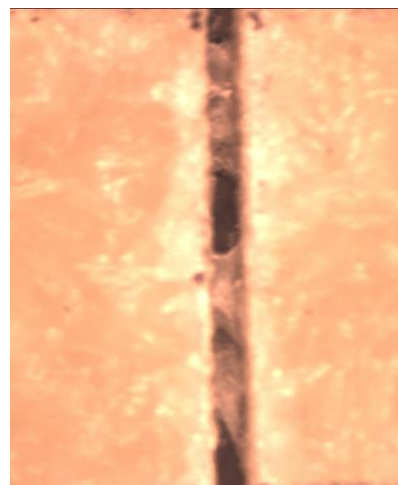
Řez č. 1 byl řezán při vysokém tlaku (380 MPa) za použití technologie WJ (Water Jet), posuv řezné hlavy byl 50 mm/min. Na obrázku 6.26 je zřejmé, že materiál není proříznut po celé tloušťce materiálu. Na obrázku je také patrné, že řez nemá stálou šířku řezu, a že jsou patrné menší odchylky v šířce řezu. Z měření bylo zjištěno, že šířka řezu z vstupní strany se pohybovala od 956 do 1267 μm a střední hodnota šířky řezu byla 1121 μm (obr. 6.30).



Obr. 6.26: Řez č. 1 kompozitní desky o tloušťce 20mm, vstupní strana desky.

Řez č. 2

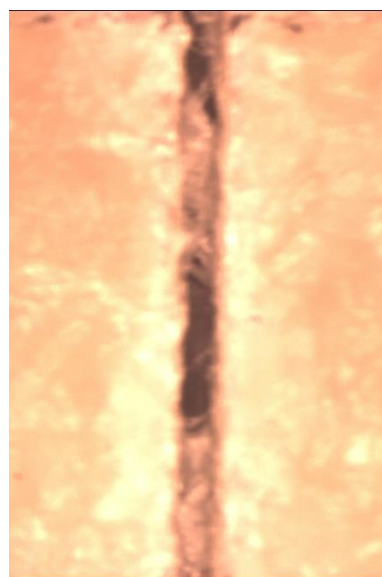
Řez č. 2 byl řezán při vysokém tlaku (380 MPa) za použití technologie WJ (Water Jet), posuv řezné hlavy byl 250 mm/min. Na obrázku 6.27 lze vidět ostřejší a méně pravidelnější hrany řezu než u řezu č. 1. Na obrázku lze také spatřit nepravidelnou tloušťku řezné drážky, která se projevuje ve formě tzv. ostrůvků, které jsou způsobeny větší rychlostí řezací hlavy. Z měření bylo zjištěno, že šířka řezu se pohybovala od 906 do 1209 μm a střední hodnota šířky řezu byla 1083 μm (obr. 6.30).



Obr. 6.27: Řez č. 2 kompozitní desky o tloušťce 20 mm, vstupní strana desky.

Řez č. 3

Řez č. 3 byl řezán při vysokém tlaku (380 MPa) za použití technologie WJ (Water Jet), posuv řezné hlavy byl 500 mm/min. Na obrázku 6.28 jsou také patrné tzv. ostrůvky, oproti řezu č. 2 je patrnější větší nehomogenita (větší odchylky), tzn. horší pravidelnost povrchu řezu (zubatější povrch). Z měření bylo zjištěno, že šířka řezu se pohybovala od 850 do 1224 μm a střední hodnota šířky řezu byla 1055 μm (obr. 6.30).



Obr. 6.28: Řez č. 3 kompozitní desky o tloušťce 20 mm, vstupní strana desky.

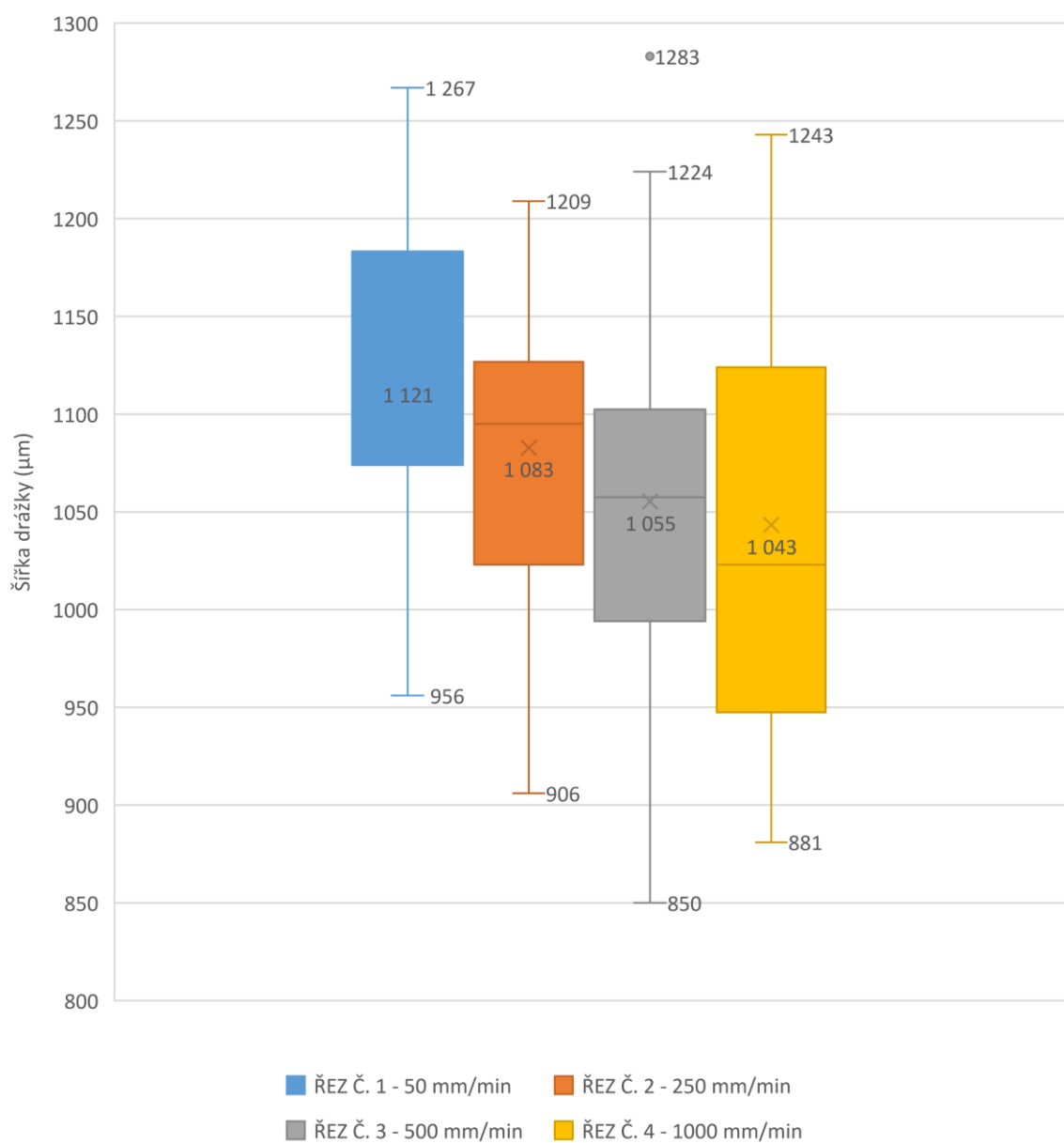
Řez č. 4

Řez č. 4 byl řezán při vysokém tlaku (380 MPa) za použití technologie WJ (Water Jet), posuv řezné hlavy byl největší, a to 1000 mm/min. Na obrázku 6.29 lze pozorovat, že díky velké rychlosti řezací hlavy byla hloubka řezné drážky nejvíce rozdílná. Z měření bylo zjištěno, že šířka řezu se pohybovala od 881 do 1243 μm a střední hodnota šířky řezu byla 1043 μm (obr. 6.30).



Obr. 6.29: Řez č. 4 kompozitní desky o tloušťce 20 mm, vstupní strana desky.

VYSOKÝ TLAK VSTUPNÍ STRANA - WJ

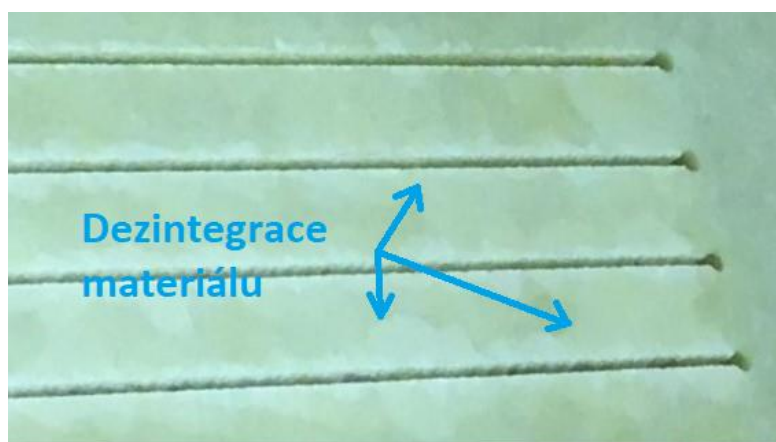


Obr. 6.30: Graf řezů č. 1-4 metodou WJ., vstupní strana.

Posouzení řezu č. 1 - 4

Dle naměřených hodnot vynesných do grafu u vstupní strany desky (obr. 6.30) se jeví jako nejlepší řez č. 2, který má střední hodnotu šířky řezu 1083 μm , oproti řezu č. 3, který má nejnižší střední hodnotu šířky řezu (1055 μm), nemá však takové rozpětí naměřených hodnot, což dokazuje větší homogenitu daného řezu (č. 2). Po zohlednění i vizuálního stavu řezů, nejlépe vyšel řez č. 1, který má nejpravidelnější (obr. 6.26) šířku řezu.

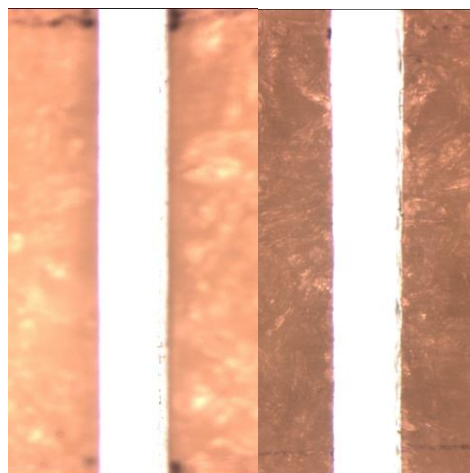
Z obrázku 6.31 lze zpozorovat určitý prořez materiálu neboli dezintegrace materiálu. Dezintegraci lze vidět po celé délce všech čtyř řezů, což zásadně ovlivňuje kvalitu daného výrobku.



Obr. 6.31: Řezy č. 1 - 4 na vstupní straně kompozitní desky (tl. 20 mm).

Řez č. 5

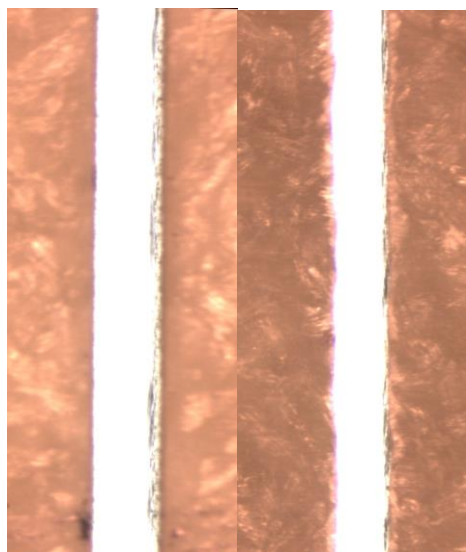
Řez č. 5 byl řezán při vysokém tlaku (380 MPa) za použití technologie AWJ (Abrasive Water Jet), posuv řezné hlavy byl 50 mm/min. Na obrázku 6.32 lze vidět rovnoměrně proříznutý materiál v celé jeho tloušťce, jak ze vstupní strany desky, tak z výstupní strany desky. Z měření bylo zjištěno, že šířka řezu z vstupní strany se pohybovala od 1820 do 2265 μm a střední hodnota šířky řezu byla 1993 μm , v místě podřezu byla šířka řezu od 1805 do 2080 μm a střední hodnota šířky podřezu byla 1929 μm (obr. 6.37).



Obr. 6.32: Řez č. 5 kompozitní desky o tloušťce 20 mm. a) vstupní strana, b) výstupní strana.

Řez č. 6

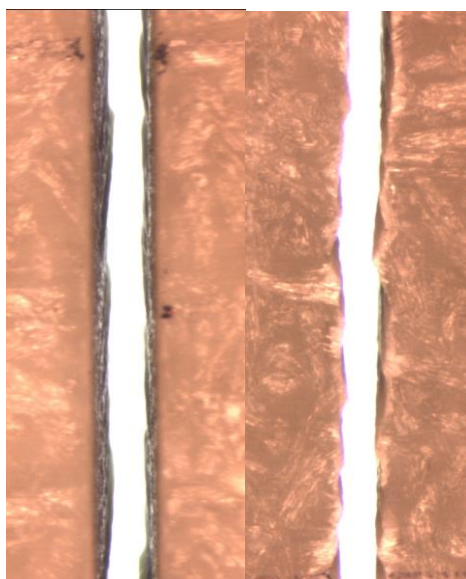
Řez č. 6 byl řezán při vysokém tlaku (380 MPa) za použití technologie AWJ (Abrasive Water Jet), posuv řezné hlavy byl 250 mm/min. Na obrázku 6.33 lze vidět stejně jako v předchozím řezu rovnoměrně proříznutý materiál v celé jeho tloušťce. Oproti předchozímu řezu lze spatřit zásadně menší šířku podřezu. Z měření bylo zjištěno, že šířka řezu z vstupní strany se pohybovala od 1518 do 1681 μm a střední hodnota šířky řezu byla 1681 μm , v místě podřezu byla šířka řezu od 1166 do 1351 μm a střední hodnota šířky podřezu byla 1260 μm (obr. 6.37).



Obr. 6.33: Řez č. 6 kompozitní desky o tloušťce 20 mm. a) vstupní strana, b) výstupní strana.

Řez č. 7

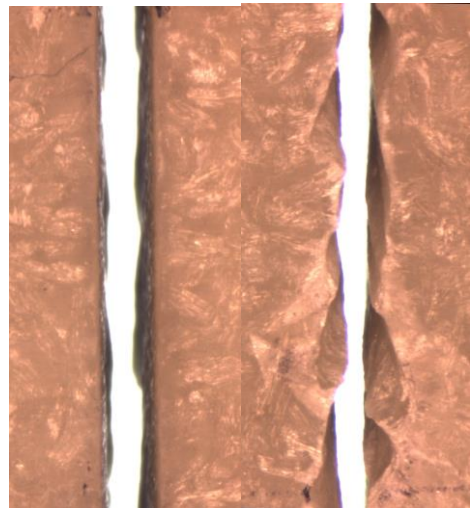
Řez č. 7 byl řezán při vysokém tlaku (380 MPa) za použití technologie AWJ (Abrasive Water Jet), posuv řezné hlavy byl 500 mm/min. Na obrázku 6.34 lze vidět snížení průraznosti paprsku (zkosení paprsku), které je způsobeno díky velké rychlosti řezací hlavy. Na výstupní straně desky (obr. 6.34b) je vidět nerovnoměrné uštipování podřezu desky. Z měření bylo zjištěno, že šířka řezu z vstupní strany se pohybovala od 1263 do 1551 μm a střední hodnota šířky řezu byla 1405 μm , v místě podřezu byla šířka řezu od 704 do 1175 μm a střední hodnota šířky podřezu byla 903 μm (obr. 6.37).



Obr. 6.34: Řez č. 7 kompozitní desky o tloušťce 20 mm. a) vstupní strana, b) výstupní strana.

Řez č. 8

Řez č. 8 byl řezán při vysokém tlaku (380 MPa) za použití technologie AWJ (Abrasive Water Jet), posuv řezné hlavy byl 1000 mm/min. Na obrázku 6.35 jsou patrné největší nerovnosti v kvalitě řezu. Na výstupní straně desky (obr. 6.35b) je vidět největší uštipování podřezu desky, což způsobuje největší rozptyl v šířce podřezu desky. Z měření bylo zjištěno, že šířka řezu z vstupní strany se pohybovala od 1241 do 1493 μm a střední hodnota šířky řezu byla 1346 μm , v místě podřezu byla šířka řezu od 655 do 2006 μm a střední hodnota šířky podřezu byla 1296 μm (obr. 6.37).



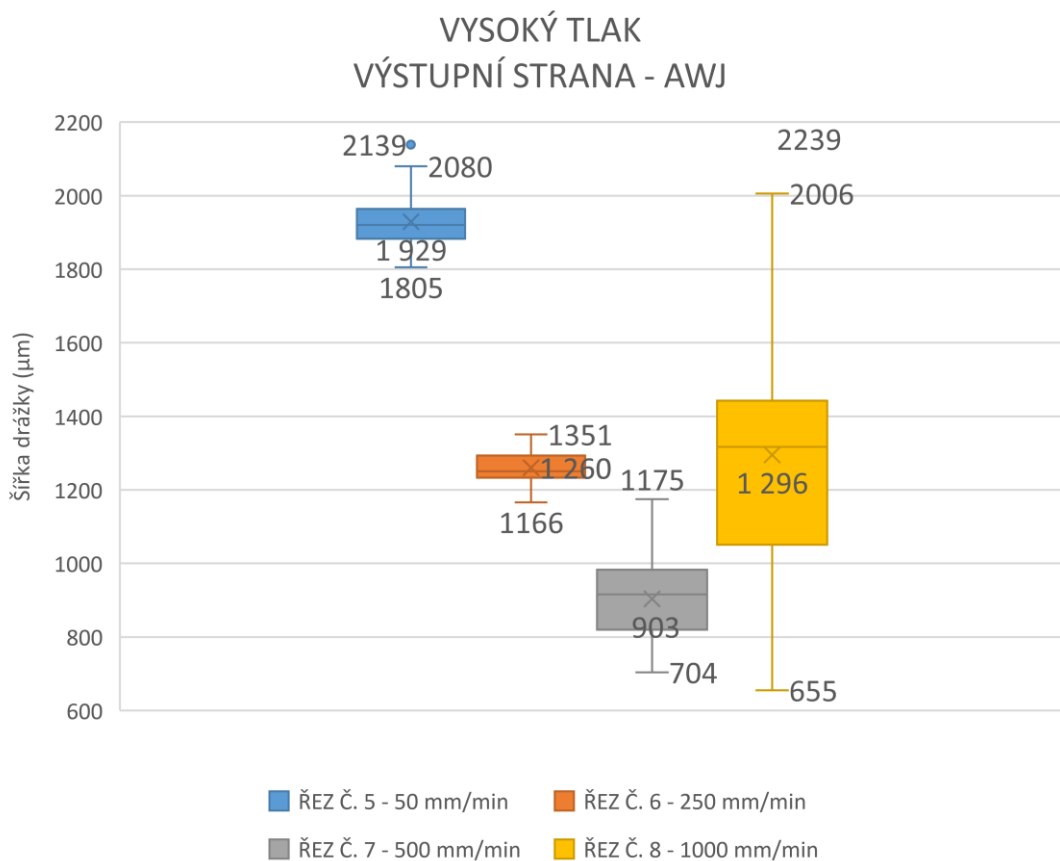
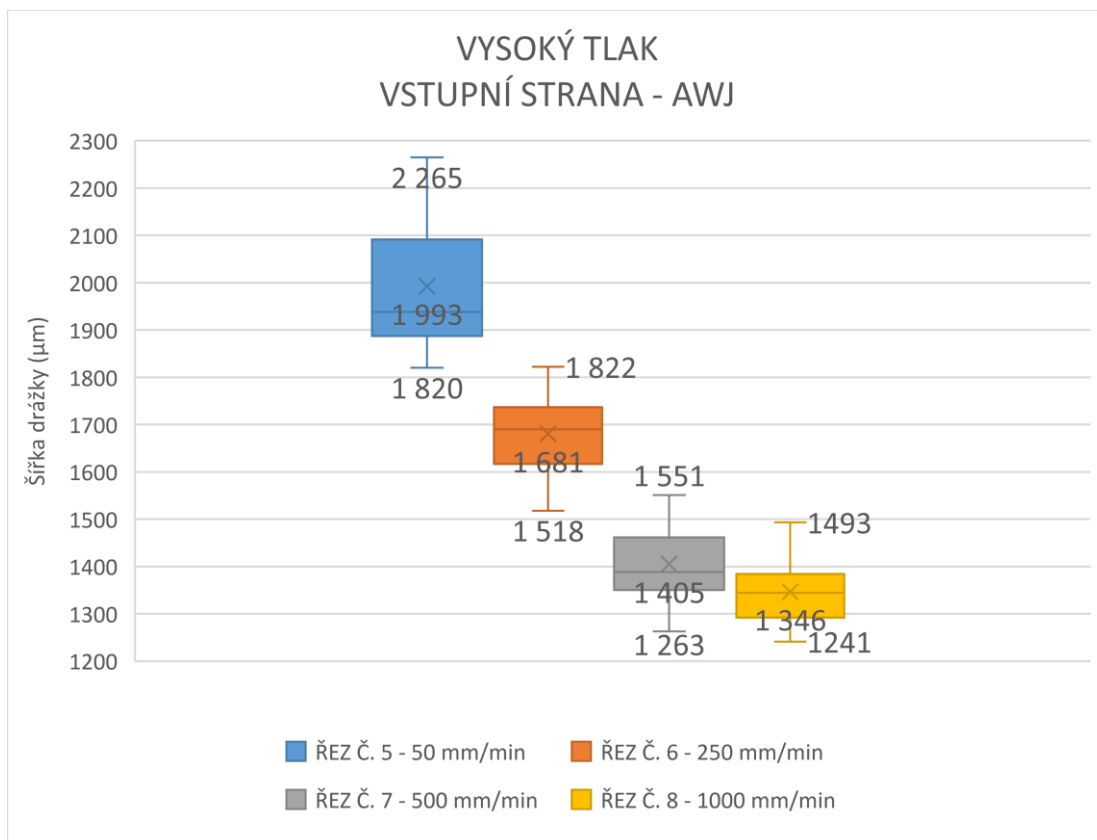
Obr. 6.35: Řez č. 8 kompozitní desky o tloušťce 20 mm. a) vstupní strana, b) výstupní strana.

Posouzení řezu č. 5 - 8

U řezů č. 5 - 8, které byly řezány technologií AWJ lze na první pohled vidět na vstupní straně desky určitou rovnoměrnost šířky řezu. Hlavní rozdíl je v její celkové šířce. Řez č. 5, který byl řezán nejpomaleji (50 mm/min) má největší průměrnou šířku řezu a to 1993 μm . Zato řez č. 8, který byl řezán nejrychleji (1000 mm/min) má nejmenší šířku řezu, a to 1346 μm . Pokud však zohledníme podřez materiálu na výstupní straně desky (obr. 6.26), tak řez č. 8 je nedostačující, protože má největší odštěpy materiálu. Nejpravidelnější podřez má řez č. 5, jehož šířka je také nejširší a to 1939 μm (obr. 6.37). Optimální řez se jeví jako řez č. 6, který má stále ještě rovnoměrný podřez bez odštěpů.



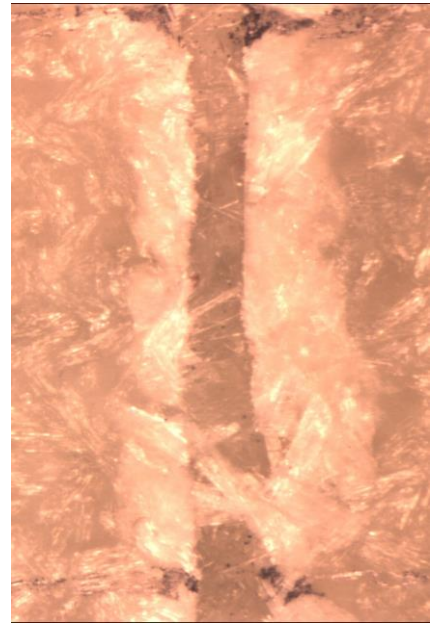
Obr. 6.36: Řezy č. 5-8 na výstupní straně kompozitní desky o tloušťce 20 mm.



Obr. 6.37: Grafy řezů č. 5-8 metodou AWJ. a) vstupní strana b) výstupní strana desky

Řez č. 9

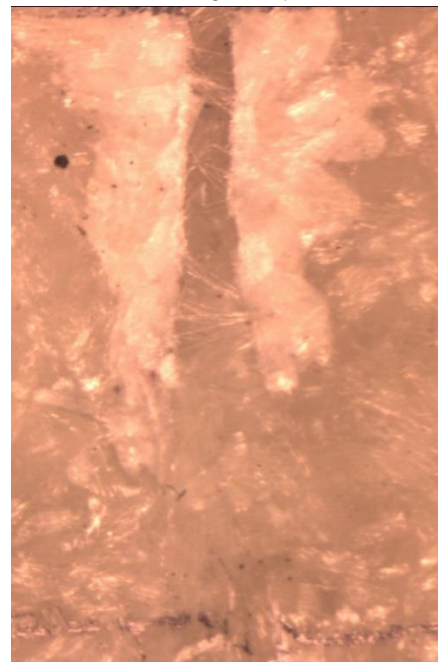
Řez č. 9 byl řezán při nízkém tlaku (200 MPa) za použití technologie WJ (Water Jet), posuv rezné hlavy byl 50 mm/min. Na obrázku 6.38 je patrné, že paprsek neprošel skrz celý materiál. Hloubka řezu se pohybuje v desetinách milimetru. Na obrázku 6.42 je patrné, že řez není konstantní v celé své délce. Z měření bylo zjištěno, že šířka řezu se pohybovala od 790 do 1661 μm a střední hodnota šířky řezu byla 1228 μm (obr. 6.42).



Obr. 6.38: Řez č. 9: vstupní strana kompozitní desky o tloušťce 20 mm.

Řez č. 10

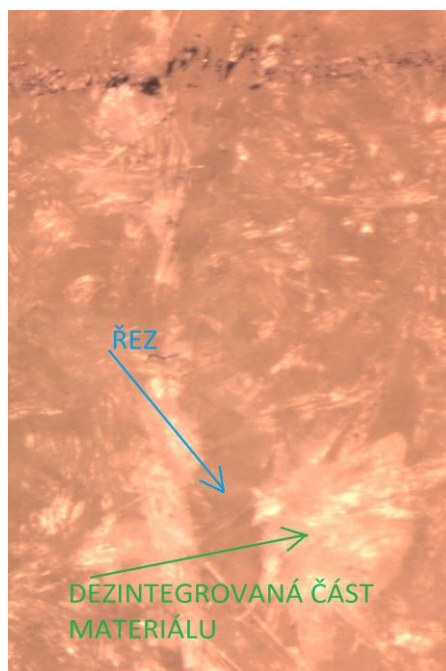
Řez č. 10 byl řezán při nízkém tlaku (200 MPa) za použití technologie WJ (Water Jet), posuv rezné hlavy byl 250 mm/min. Na obrázku 6.39 lze vidět malý řez, který místy není ani měřitelný. Z měření bylo zjištěno, že šířka řezu se pohybovala včetně nezměřitelné části od 0 do 2157 μm a střední hodnota šířky řezu byla 1194 μm (obr. 6.42).



Obr. 6.39: Řez č. 10: vstupní strana kompozitní desky o tloušťce 20 mm.

Řez č. 11

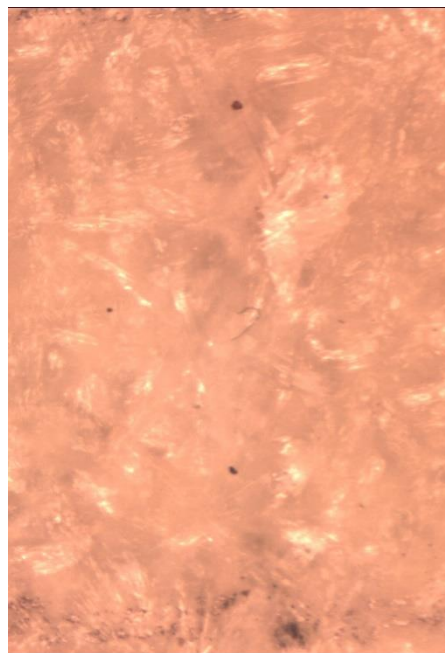
Řez č. 11 byl řezán při nízkém tlaku (200 MPa) za použití technologie WJ (Water Jet), posuv řezné hlavy byl 500 mm/min. Na obrázku 6.40 lze sotva zpozorovat řez. Šířka řezné čáry se u tohoto řezu většinou dala změřit na základě dezintegrované části materiálu, která se utvořila v oblasti řezu. U řezu č. 11 byla oblast „d“, ze které nešlo změřit žádnou šířku řezu, protože řez nebyl pod mikroskopem viditelný. Z měření bylo zjištěno, že u měřitelné části řezu se hodnoty pohybovaly od 0 do 2214 μm . a střední hodnota šířky řezu byla 1256 μm (obr. 6.42).



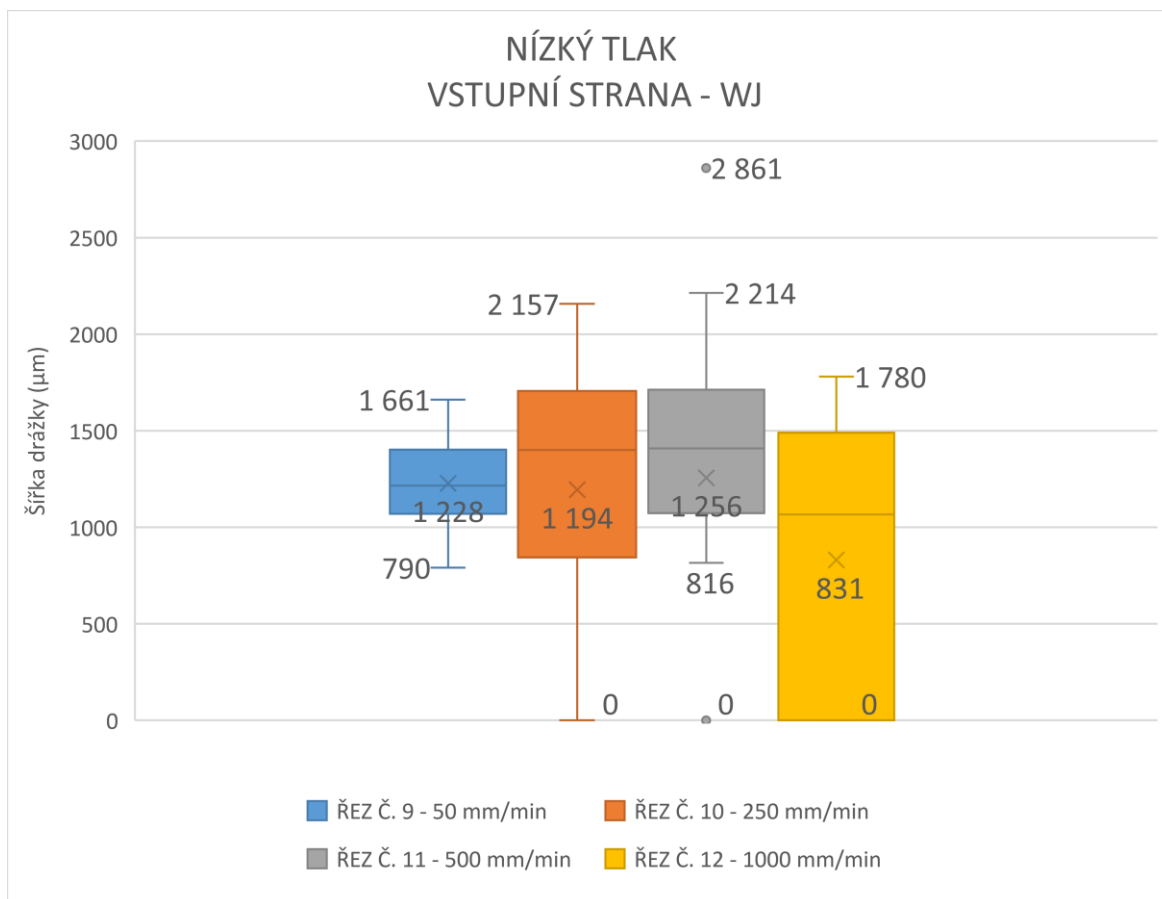
Obr. 6.40: Řez č. 11: vstupní strana kompozitní desky o tloušťce 20 mm.

Řez č. 12

Řez č. 12 byl řezán při nízkém tlaku (200 MPa) za použití technologie WJ (Water Jet), posuv řezné hlavy byl 1000 mm/min. Na obrázku 6.41 je oblast „c“, kde nebylo možné uskutečnit žádné měření, protože řez je sotva viditelný. Tento řez měl celkově dvě neměřitelné oblasti pod mikroskopem, a to oblasti „a“ a „c“. Včetně ostatních oblastí, kde byl řez částečně měřitelný pro měření, byly naměřeny hodnoty šířky řezu od 0 do 1780 μm . a střední hodnota šířky řezu byla 831 μm (obr. 6.42).



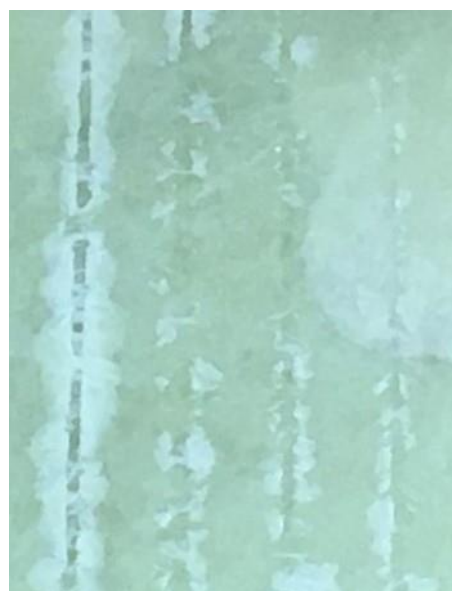
Obr. 6.41: Řez č. 12 oblast „c“ z vstupní strany kompozitní desky o tloušťce 20 mm.



Obr. 6.42: Grafy řezů č. 9-12 metodou WJ.

Posouzení řezu č. 9-12

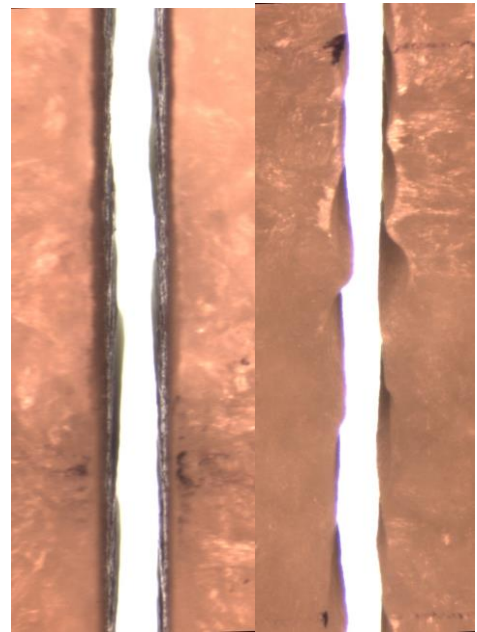
Pro materiál o tloušťce 20 mm a sníženém tlaku o hodnotě 200 MPa, není technologie WJ vhodná k řezání tohoto kompozitního materiálu. Z řezu č. 9, jehož posuv řezné hlavy činil 50 mm/min je patrný náznak tvaru řezné drážky, který je však také přerušovaný (obr. 6.43). Avšak u tohoto řezu je patrná nejvýraznější dezintegrace okolní oblasti řezu. U ostatních řezů je sotva patrné nějaké ovlivnění vodním paprskem. U všech řezů bylo dosaženo závěru, že ani v jednom z uvedených řezů nejsou řezné podmínky uspokojivé.



Obr. 6.43: Řezy č. 9 (zleva) až 12 (zprava) vstupní strany kompozitní desky o tloušťce 20 mm.

Řez č. 13

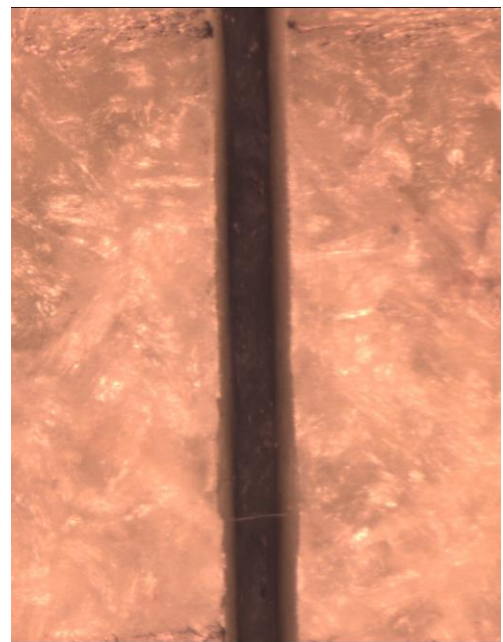
Řez č. 13 byl řezán při nízkém tlaku (200 MPa) za použití technologie AWJ (Abrasive Water Jet), posuv řezné hlavy byl 50 mm/min. Na obrázku 5.44 lze vidět nerovnoměrnost řezu, na výstupní straně desky (obr. 6.44 b) je patrné uštipování materiálu. V celé délce řezu byla výstupní strana desky měřitelná pouze v oblastech „d“ a „e“, ostatní oblasti byly neproříznuté. Z měření bylo zjištěno, že šířka řezu z vstupní strany byla v rozmezí od 1343 do 1863 μm a střední hodnota šířky řezu byla 1597 μm , v místě podřezu byla šířka řezu od 0 do 1393 μm a střední hodnota šířky podřezu byla 404 μm (obr. 6.49).



Obr. 6.44: Řez č. 13 kompozitní desky o tloušťce 20 mm. a) vstupní strana, b) výstupní strana.

Řez č. 14

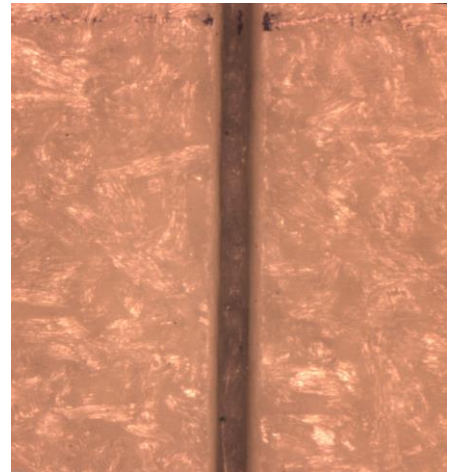
Řez č. 14 byl řezán při nízkém tlaku (200 MPa) za použití technologie AWJ (Abrasive Water Jet), posuv řezné hlavy byl 250 mm/min. Na obrázku 6.45 lze vidět řez, který nebyl tzv. proříznut skrz celou tloušťku daného materiálu. Z měření bylo zjištěno, že šířka řezu z vstupní strany byla v rozmezí od 1241 do 1653 μm a střední hodnota šířky řezu byla 1414 μm (obr. 6.49).



Obr. 6.45: Řez č. 14 kompozitní desky o tloušťce 20 mm. a) vstupní strana, b) výstupní strana.

Řez č. 15

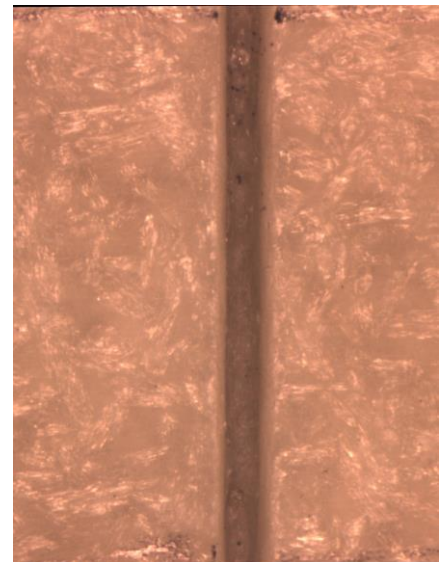
Řez č. 15 byl řezán při nízkém tlaku (200 MPa) za použití technologie AWJ (Abrasive Water Jet), posuv řezné hlavy byl 500 mm/min. Na obrázku 6.46 lze vidět, že materiál nebyl proříznut skrz celou tloušťku materiálu, Z měření bylo zjištěno, že šířka řezu z vstupní strany byla v rozmezí od 1015 do 1470 μm a střední hodnota šířky řezu byla 1285 μm (obr. 6.49).



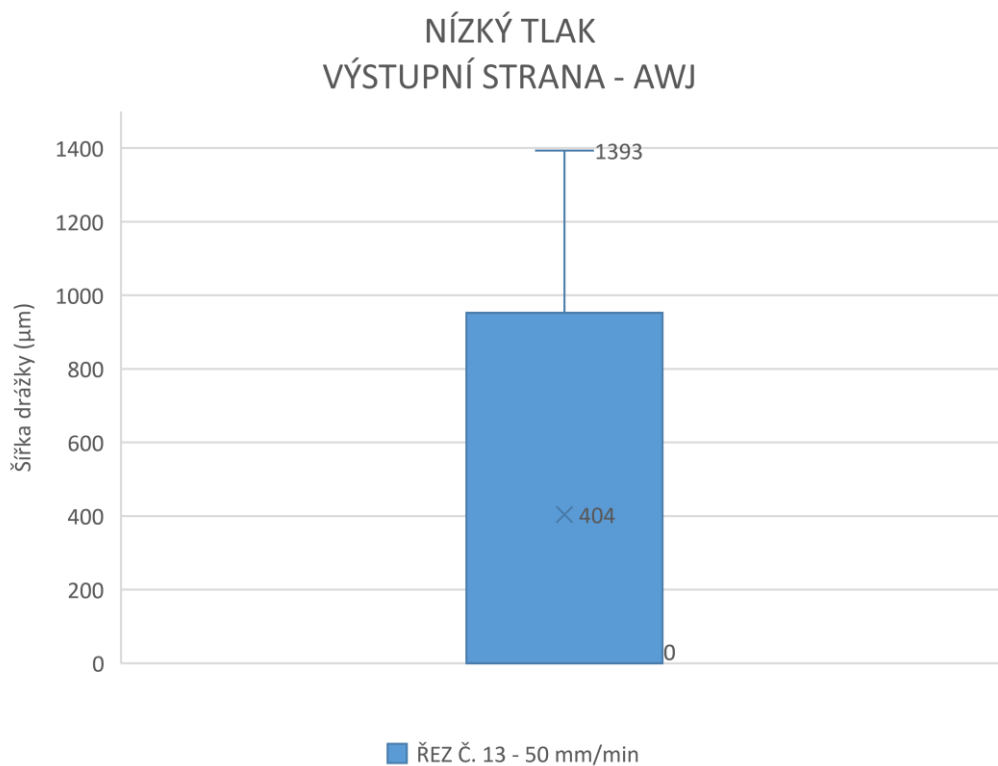
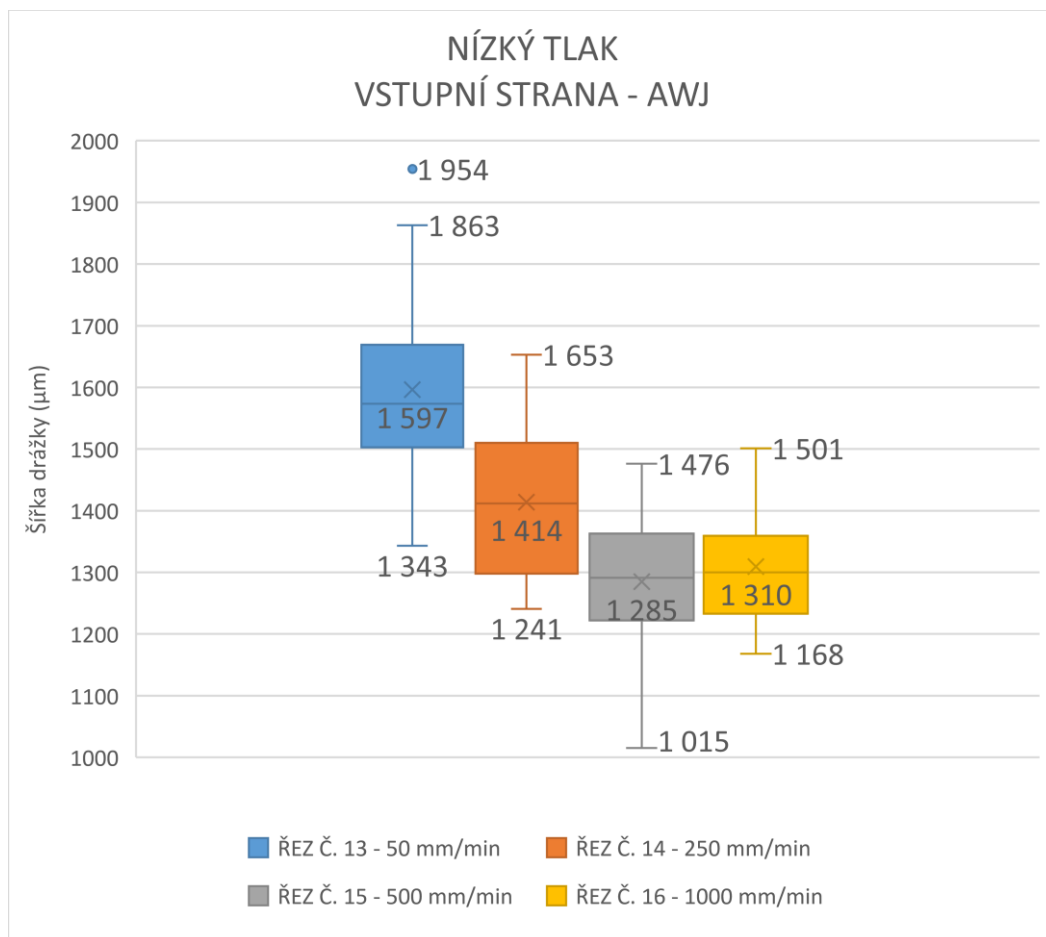
Obr. 6.46: Řez č. 15 kompozitní desky o tloušťce 20 mm. a) vstupní strana, b) výstupní strana.

Řez č. 16

Řez č. 16 byl řezán při nízkém tlaku (200 MPa) za použití technologie AWJ (Abrasive Water Jet), posuv řezné hlavy byl 1000 mm/min. Na obrázku 6.47 lze spatřit řez, který nebyl tzv. proříznut skrz celou tloušťku daného materiálu. Z měření bylo zjištěno, že šířka řezu z vstupní strany byla v rozmezí od 1168 do 1501 μm a střední hodnota šířky řezu byla 1310 μm (obr. 6.49).



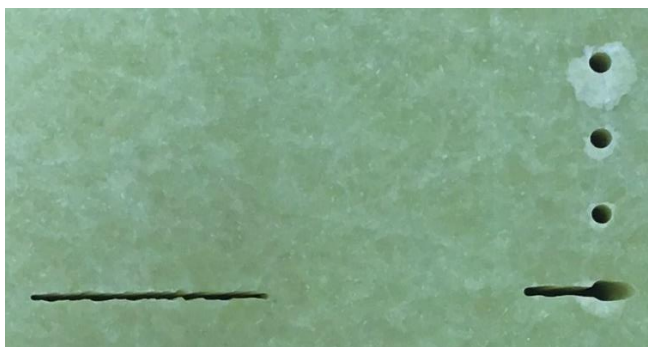
Obr. 6.47: Řez č. 16 kompozitní desky o tloušťce 20 mm. a) vstupní strana, b) výstupní strana.



Obr. 6.48: Grafy řezů č. 5-8 metodou AWJ. a) vstupní strana b) výstupní strana desky

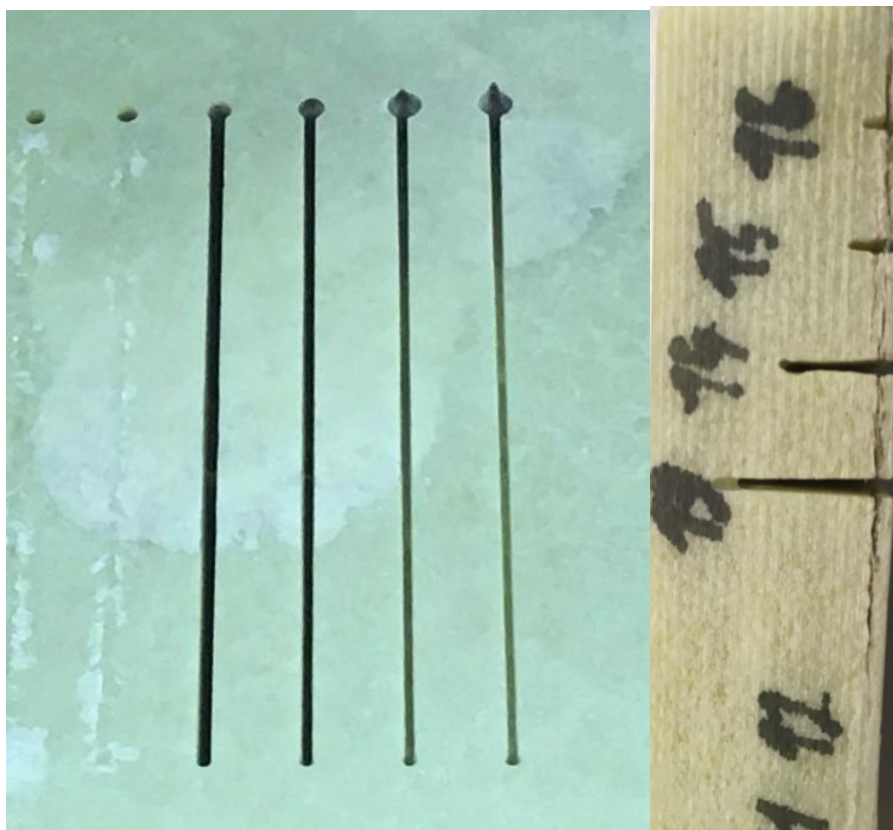
Posouzení řezu č. 13 - 16

Při tlaku 200 MPa má nejnižší a nejstálější šířku řezu řez č. 16 (při posuvu 1000 mm/min). Avšak při této rychlosti proud vody nestačil odebrat materiál v celé jeho délce, to platí i pro řezy č. 15 a č. 14. Řez, u něhož byl zaznamenán částečný podřez (obr. 6. 48) je řez č. 13 (při posuvu 50 mm/min), jehož střední hodnota šířky řezu byla 1597 μm .



Obr. 6.49: Řez č. 13 výstupní strany kompozitní desky o tloušťce 20 mm.

U obrázku 5.49b lze vidět značnou dezintegraci materiálu u všech čtyř řezů (řezy 13-16). Dezintegrace nezasahuje pouze v okolí řezů, ale v mnohem větším rozsahu (obr. 6.49a). Tento fakt je způsobem malou řeznou silou paprsku, která je způsobena nízkým tlakem o hodnotě 200 MPa.

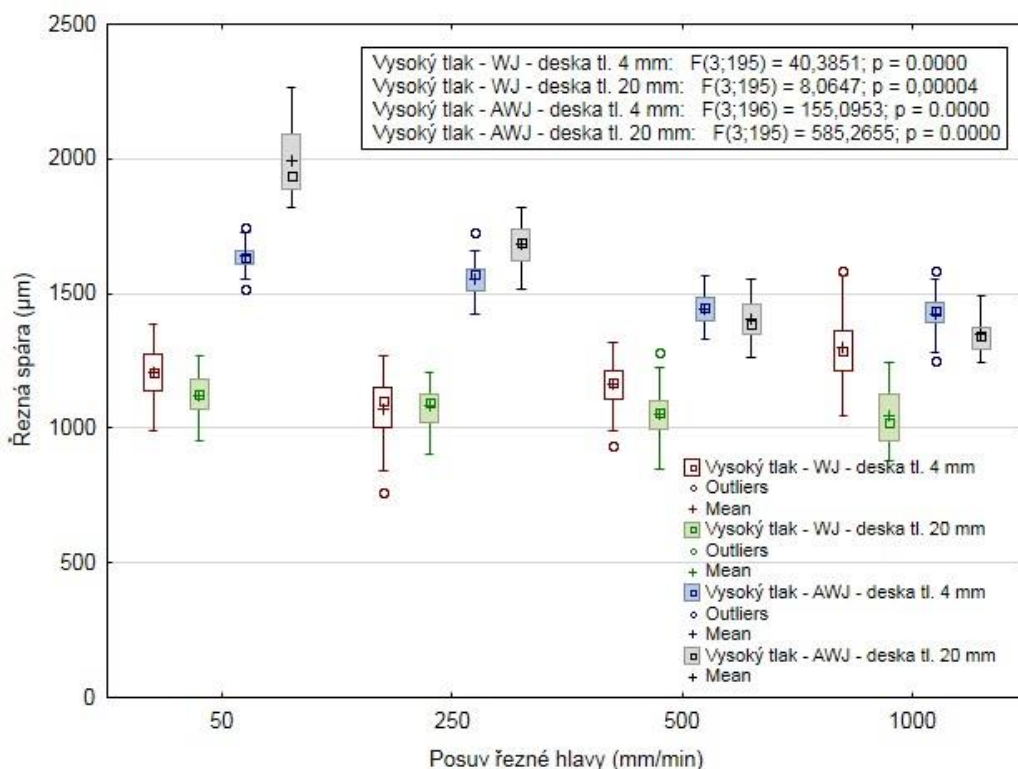


Obr. 6.50: a) řezy č. 13-16 pohled na vstupní stranu desky b) boční průřez řezů č. 13-16 kompozitní desky o tloušťce 20 mm.

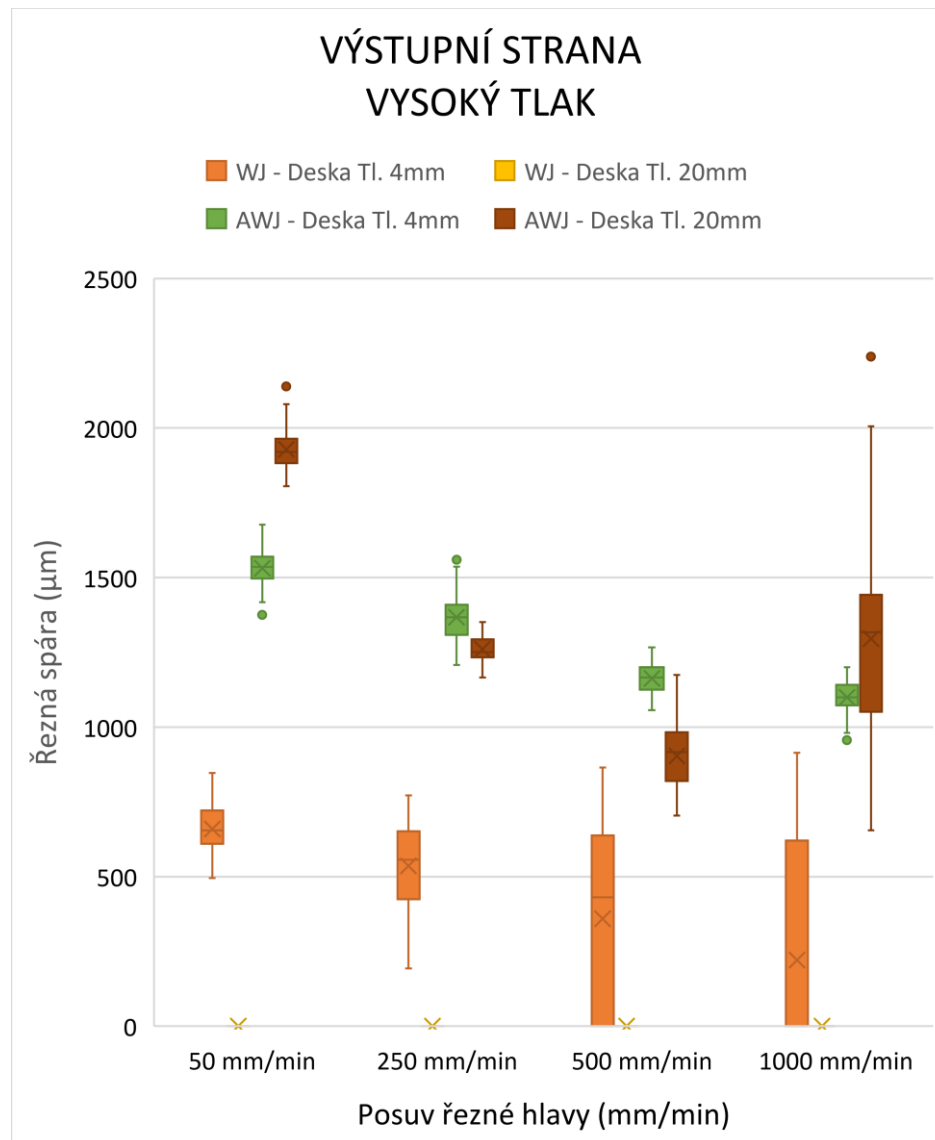
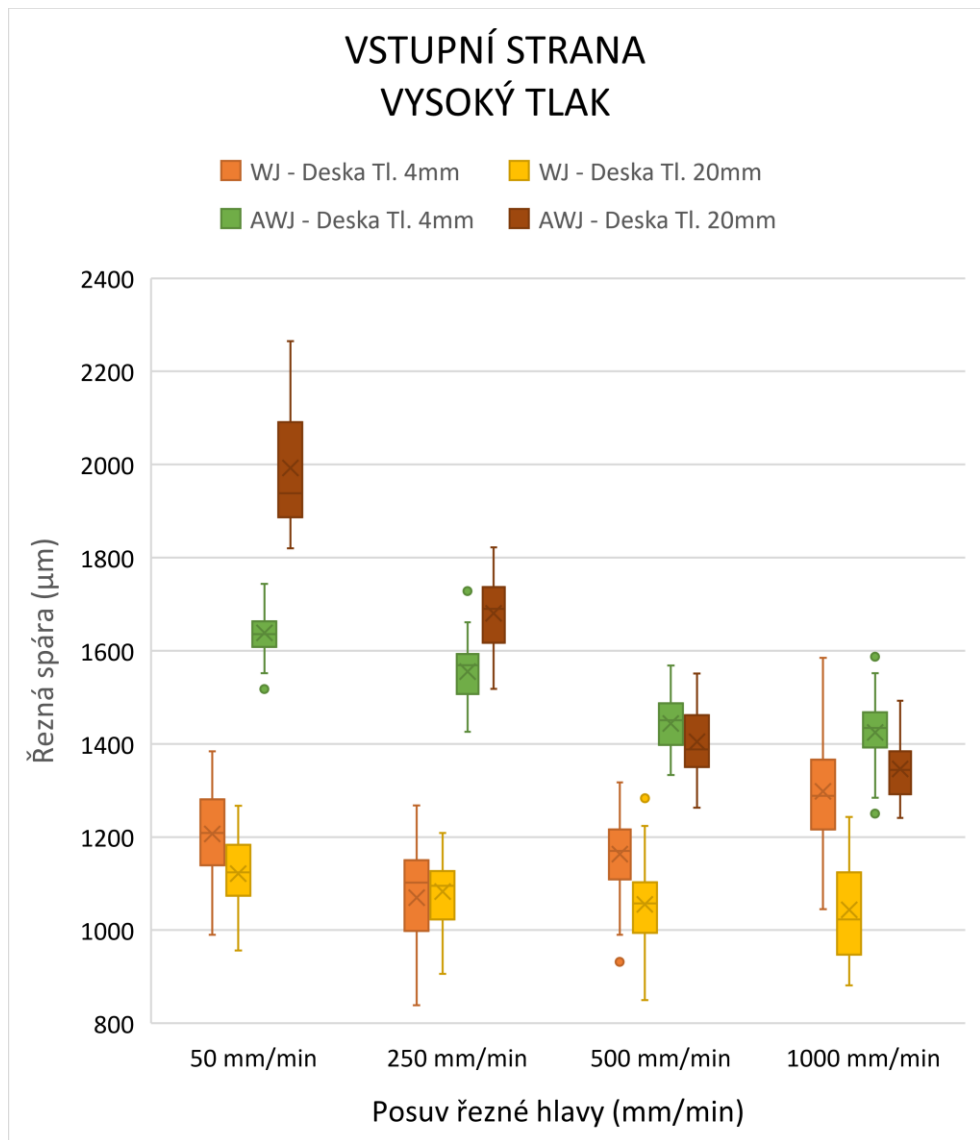
7 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU

Cílem experimentu bylo zjistit a porovnat šířku i vzhled řezů. U jednotlivých vzorků se porovnávala jak vstupní, tak dolní struktura řezu. Vzorky byly z desek stejného kompozitního materiálu, ale o odlišné tloušťce, a to 4 mm a 20 mm, obě desky byly řezány za stejných podmínek (viz kapitola 5.2). Každá deska byla řezána pomocí dvou technologií (AWJ a WJ), při dvou odlišných tlacích (380 MPa a 200MPa) a čtyřech odlišných rychlostech posuvu řezné hlavy (50, 250, 500 a 1000 mm/min). Obrázky 7.2 a 7.3 obsahují obecný souhrn všech řezů na obou deskách a to jak ze strany vstupní, tak ze strany výstupní. Tyto grafy slouží k přehlednějšímu porovnání všech řezů. Jejich vyhodnocením se zabírají kapitoly 7.1 a 7.2.

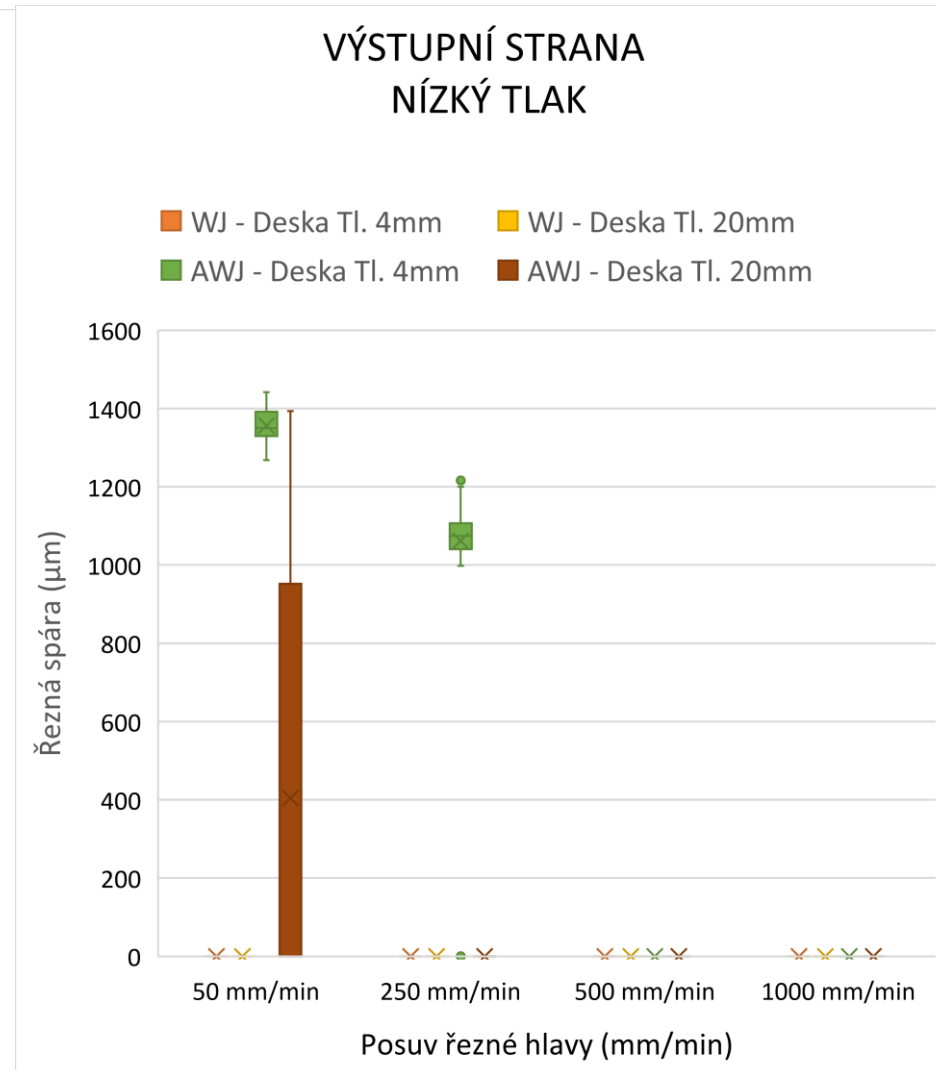
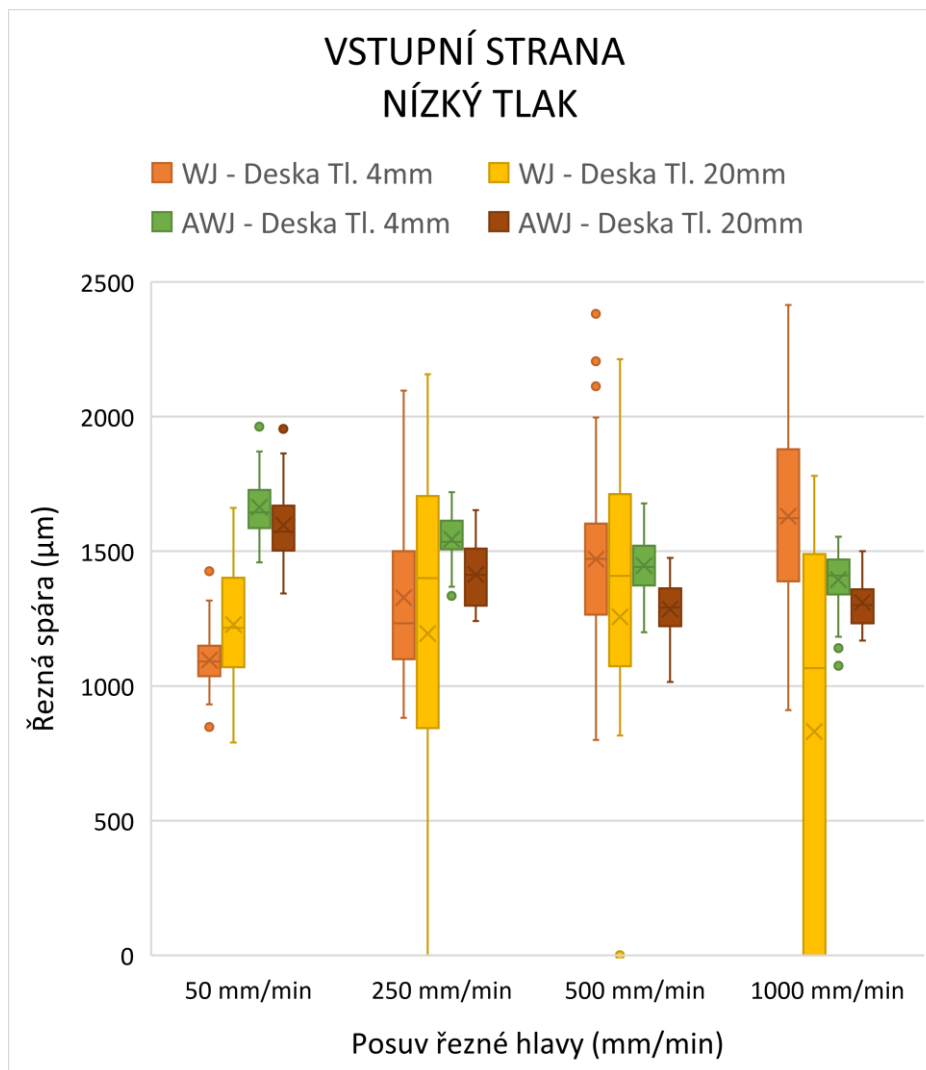
Jednotlivé varianty experimentu byly mezi sebou testovány dle ANOVA F-testu v hladině významnosti 0.05. Výsledky jsou patrné z obr. 7.1. Za nulovou hypotézu H_0 byl označen stav, kdy mezi jednotlivými porovnávanými soubory dat není z hlediska jejich středních hodnot statisticky významný rozdíl: $p > 0.05$. U všech testovaných variant se nepotvrdila hypotéza H_0 , tj. rozdílů v hladině významnosti 0,05 mezi testovanými materiály ($p = 0.000$) v závislosti na rozdílném posuvu řezné hlavy ($p = 0,0000$ až $0,00004$).



Obr. 7.1: Graf statistického porovnání homogenity souboru různých tlouštěk materiálu pomocí Anova F testu.



Obr. 7.2: Grafy porovnávající šířky řezů u obou tlouštěk za vysokého tlaku.



Obr. 7.3: Grafy porovnávající šířky řezů u obou tloušťek za nízkého tlaku.

7.1 Vyhodnocení desky o tloušťce 4mm

U desky o tloušťce 4 mm byl menší řezný tlak (200 MPa) zásadně horší jak vyšší řezný tlak (380 MPa). U technologie WJ nebyl nízký tlak schopen vytvořit průchozí řezy v celé jejich délce (řezy č. 9-12), pouze jeden řez, a to řez č. 9, který byl řezán nejnižší rychlostí posuvu řezné hlavy 50 mm/min měl relativně rovnoměrnou strukturu (obr. 6.18), avšak v okolí oblasti řezu vznikla ve velké míře dezintegrace materiálu.

Pro nízký tlak a použití technologie AWJ byly vyhovující pouze dva řezy (řezy č. 13 a 14), které byly průchozí skrz celý materiál. Všechny řezy měly stálý a rovnoměrný řez. Čím byla rychlost posuvu řezné hlavy větší, tím byla šířka drážky menší (obr. 6.25). V tomto případě neměla rychlost zásadní vliv na kvalitu povrchu. Řez č. 15 neprošel celým materiálem (obr. 6.24). Pro jeho celé proříznutí stačilo velmi málo (v řádech desetin milimetru). Kdyby se nastavila taková rychlost posuvu řezné hlavy, která je nižší než 500 mm/min (doporučeno 400 mm/min), aby byl všechn řezný materiál odstraněn, tak bychom určitě dosáhli nižších hodnot šířky řezu než u řezu č. 14 a materiál by byl proříznutý v celé jeho tloušťce.

U vyššího tlaku (380 MPa) a za použití technologie WJ, byly všechny řezy nevyhovující, i když řez č. 1 (rychlost posuvu 50 mm/min) prořízl materiál rovnoměrně v celé jeho délce (obr. 6.8). U všech řezů v okolní oblasti vznikla ve velké míře dezintegrace materiálu a to jak na vstupní, tak na výstupní straně desky.

U vyššího tlaku (380 MPa) a za použití technologie AWJ byly všechny řezy (č. 5-8) průchozí. Čím byla řezná rychlost vyšší, tím byla šířka řezné drážky užší. Kvalita řezu byla u všech řezů velmi podobná. Pro tyto podmínky nejvíce vyhovuje řez č. 8, který byl řezán za nejvyšší rychlosti posuvu řezné hlavy (1000 mm/min) a šířka řezu měla průměrnou hodnotu 1425 μm .

Z výsledných grafů (obr. 7.2 a 7.3) výsledky experimentu ukázaly, že šířka řezu je vyšší u technologie AWJ (při použití abraziva MESH 80) než u WJ, za to řezy zhotovené technologií WJ, které byly průchozí obsahovaly zvýšený rozptyl hodnot oproti technologií AWJ. U technologie AWJ nedocházelo k plastické destrukci na výstupní straně desky, k významnému zničení ve výstupní části řezu však došlo při použití technologie WJ (obr

6.8b). Šířky řezu na výstupní straně desky byly menší než na vstupní straně desky (obr. 7.2), z toho vyplývá, že proud ztrácí svou kinetickou energii, tj. nedostatečná schopnost odstraňovat materiál ve spodní části řezu, který vede k úzkému otvoru zářezu. Ve výsledném hodnocení vyšly nejlépe dva řezné parametry, které se oba týkaly technologie AWJ. První z nich má řez č. 8, který byl řezán za vysokého tlaku (380MPa) a rychlost řezné hlavy činila 1000 mm/min. Druhý parametr je při nízkém tlaku (200 MPa) a rychlost posuvu řezné hlavy je odhadována přibližně na 400 mm/min (viz. popis obrázku 6.24). V praxi by byly doporučeny parametry pro vysoký tlak (380 MPa) a rychlost posuvu řezné hlavy 1000 mm/min., protože rychlost řezání je oproti druhému parametru více jak dvojnásobná a to má pro praktické využití větší váhu než nižší tlak. Řezy zhotovené technologií WJ nejsou v žádném případě dostačující a to díky menší účinnosti vodního paprsku, který způsobuje vyšší riziko vzniku dezintegrace materiálu.

7.2 Vyhodnocení desky o tloušťce 20 mm

U desky o tloušťce 20 mm byl také menší řezný tlak (200 MPa) zásadně horší jak vyšší řezný tlak (380 MPa). U takto nízkého tlaku byla technologie WJ také nedostačující. Žádný z řezů (č. 9-12) neměl rovnoměrnou a stálou strukturu, u řezu č. 12 (rychlost posuvu 1000 mm/min) nebylo možno změřit šířku řezu řez na základě hloubky řezu, ale spíše na ovlivněném okolí díky dezintegraci materiálu (obr. 6.43).

U technologie AWJ byl průchozí pouze řez č. 13 (rychlost posuvu 50 mm/min) a to ne v celé jeho délce (obr. 6.49). Díky technologii AWJ, která je mnohem účinnější než technologie WJ a díky faktu, že materiál nebyl ve většině řezů (č. 14-16), vznikla masivní a viditelná dezintegrace materiálu (obr. 6.49) na základě nedostatečného odvodu řezného média pryč z řezů.

U vyššího tlaku (380 MPa) a za použití technologie WJ, byly všechny řezy nevyhovující (řezy č. 1-4), žádný z řezů nebyl proříznut skrz materiál v celé jejich délce (obr. 6.2). U všech řezů (obrázek 6.31) vznikla pod povrchem viditelná dezintegrace právě kvůli neproříznutí materiálu, který by zajistil dostatečný odvod řezného.

U vyššího tlaku (380 MPa) a za použití technologie AWJ byly všechny řezy (č. 5-8) průchozí. Čím byla řezná rychlost vyšší, tím byla šířka řezné drážky užší. Kvalita řezu však

byla s narůstající hodnotou rychlostí horší (obr. 6.36). Řez č. 6, který byl řezán rychlostí posuvu řezné hlavy 250 mm/min (obr. 6.33), má o něco horší povrch než řez č. 5 (obr. 6.32), ale díky mnohonásobně větší rychlosti posuvu řezné hlavy je tento řez pro praktické využití výhodnější.

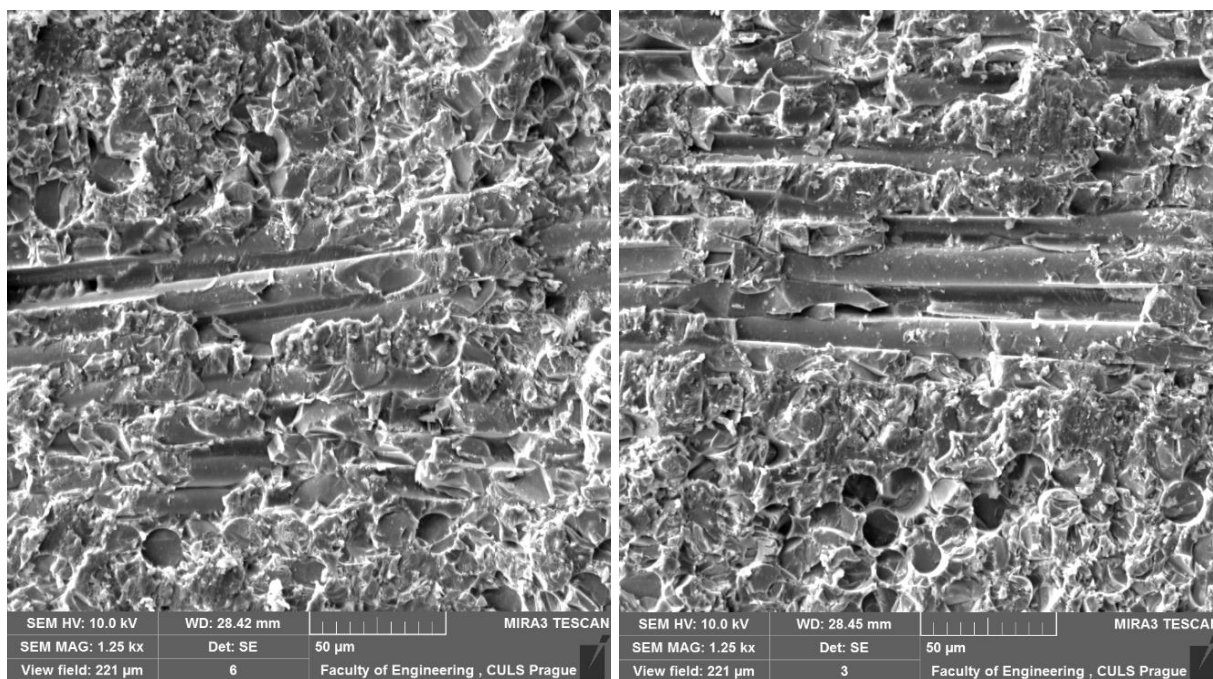
Ve výsledném hodnocení jsou vhodné pouze dva řezy, oba řezy byly zhotoveny technologií AWJ a za vysokého tlaku. První řez (č. 5) z nich byl řezán rychlostí posuvu řezné hlavy 50 mm/min a měl o něco kvalitnější povrch řezu (obr. 6.32), za to větší průměrnou šířku řezu 1993 μm (obr. 6.37), u druhého řezu č. 6 (obr. 6.33) byla rychlost posuvu řezné hlavy 250 mm/min s průměrná šířka řezu byla 1681 μm . Se zohledněním kvality povrchu šířky řezu a rychlosti posuvu nejlépe vyšel řez č. 6 a to díky rychlosti posuvu řezné hlavy, který je pětinašobný, což má v praxi při několika hodinovém každodenním provozu obrovský dopad.

7.3 Vyhodnocení SEM vzorků

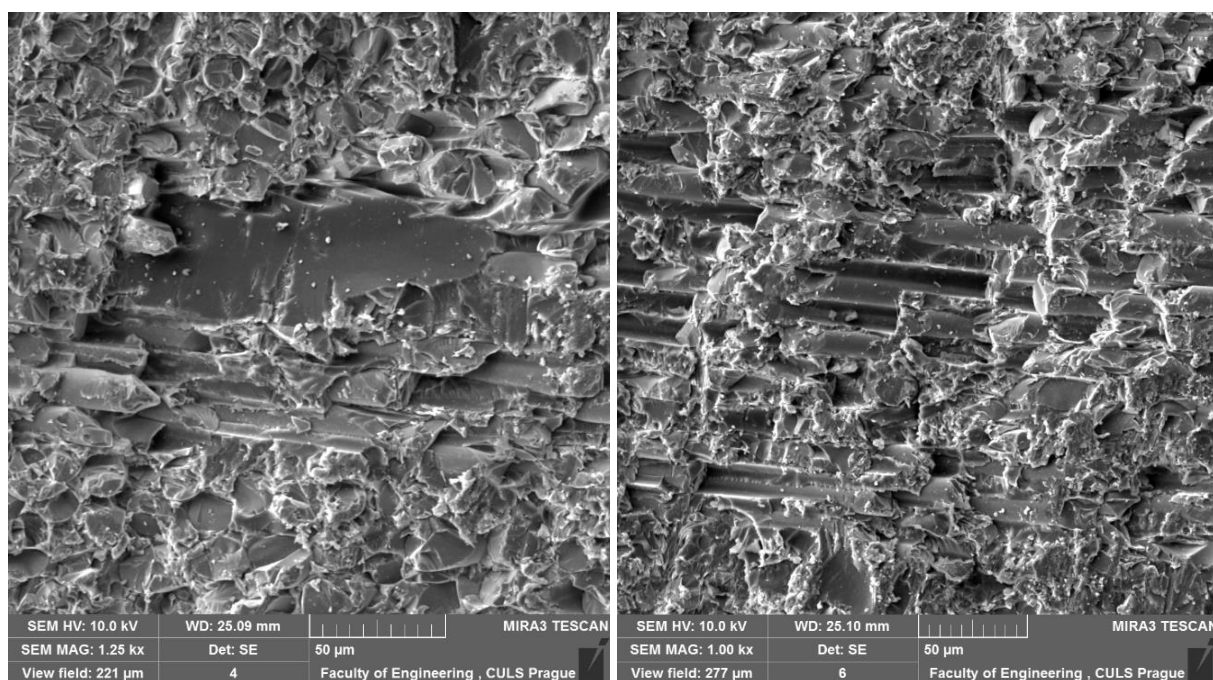
Jak už bylo zmíněno v kapitole 5.3, s pomocí technologie SEM byly vyhotoveny snímky nejvhodnějších řezů (č. 5-7). Tyto řezy byly zhotoveny technologií AWJ a za vysokého tlaku (380 MPa). Díky těmto základním parametrům byla řezná hlava vodního paprsku schopna zhotovit průchozí řezy v celé délce řezu (včetně řezu č. 8) jako jediné ze všech 16-ti řezů. Pro toto měření byl vyloučen řez č. 8, který měl vysokou rychlost posuvu řezné hlavy (1000 mm/min) a díky tomu byla kvalita řezu nevyhovující pro měření metodou SEM.

Na zhotovených snímcích (obrázky 7.2, 7.3 a 7.4) lze pozorovat vliv orientace vláken vůči směru řezu. Vlákná, která jsou orientována kolmým směrem vůči řezu byla ve většině případů přeříznuta. Vlákná, která jsou orientována ve směru, ve kterém prochází řez, jsou buď podélně přeříznuta, nebo vytržena.

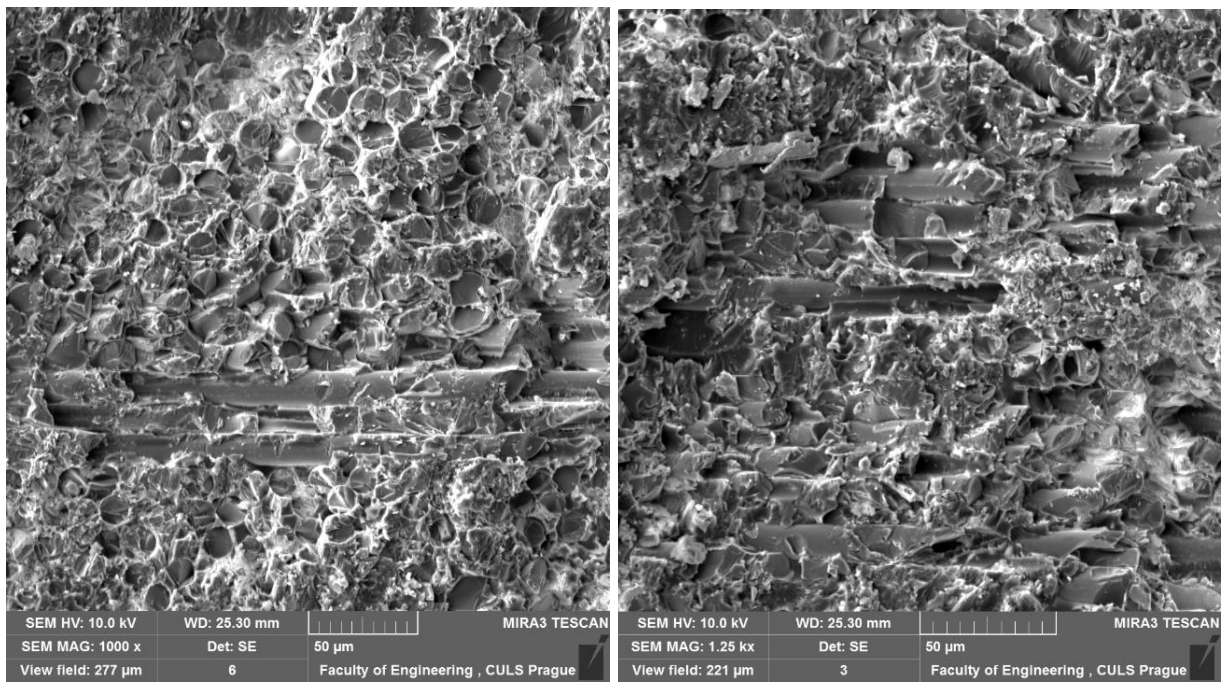
Na obrázku 7.6 lze pozorovat pro řez č. 7, nejhorší strukturu (homogenitu) povrchu. Tento fakt je způsoben zvolením nepřiměřeně vysoké rychlosti posuvu řezné hlavy (500 mm/min).



Obr. 7.4: Snímek řezu č. 5 u kompozitní desky o tloušťce 20 mm.



Obr. 7.5: Snímek řezu č. 6 u kompozitní desky o tloušťce 20 mm.



Obr. 7.6: Snímek řezu č. 7 u kompozitní desky o tloušťce 20 mm.

ZÁVĚR

V teoretické části diplomové práce jsou shromážděny aktuální poznatky o nekonvenční metodě obrábění vodním paprskem. V této části je uveden podrobný popis technologie AWJ (abrazivní vodní paprsek), včetně poznatků o problematice této technologie. Tato technologie je podrobně rozebírána jak z hlediska jednotlivých komponentů samotného zařízení, tak z hlediska vzniku paprsku. Dále jsou v teoretické části nashromážděny základní všeobecné poznatky ohledně kompozitních materiálů a to ve formě rozdělení (matrice a výztuž), tak včetně obecných poznatků ohledně řezání kompozitních materiálů vodním paprskem.

Cílem experimentální části diplomové práce bylo zhodnocení kvality řezu kompozitního materiálu za pomoci optické analýzy na základě změny rychlosti pohybu řezné hlavy, rozdílného tlaku řezného média a řezné technologie (AWJ a WJ). Rychlost posuvu řezné hlavy patří k technologicky nejdůležitějším a nejsnáze regulovatelným parametrem, který výrazně ovlivňuje výslednou kvalitu řezu.

Veškeré vstupní hodnoty parametrů použité při experimentu byly konstantní, pouze rychlost posuvu řezné hlavy měla různé hodnoty, tj. 50, 250, 750 a 1000 mm/min. Pracovní tlaky vysokotlakého vodního paprsku byly 380 MPa a 200MPa.

Vstupním materiálem je polymerní kompozitní materiál s označením Deltherm 68.890, jehož nosič je skelné vlákno a pryskyřice je tvořená z epoxidu. Jedná se o tepelně izolační materiál. Materiál se vyznačuje značnou křehkostí, která je problematická v oblasti obrábění.

Pro experimentální část diplomové práce byly zhotoveny dva vzorky, které se od sebe liší tloušťkou materiálu. První deska měla tloušťku stěny 4 mm o rozměrech desky 210 mm x 290 mm (obr. 6.4). Na desky bylo zhotoveno celkově 16 řezů o různých parametrech. První skupina zhotovených řezů je rozdělena na skupinu řezů zhotovených za vysokého tlaku (380 MPa) – řezy s označením 1-8 . Druhá skupina byla zhotovena za nízkého tlaku (200 MPa) – řezy s označením 9-16. Každá ze skupin obsahuje čtveřici řezů, které byly zhotoveny jinou technologií. Řezy 1 - 4 a 9 – 12 byly zhotoveny technologií WJ (čistý vodní paprsek). Řezy 5 - 8 a 13 – 16 jsou zhotoveny technologií AWJ (abrazivní vodní paprsek).

V každé podskupině jsou obsaženy čtyři řezy o rozdílných rychlostech posuvu řezné hlavy. Pro druhou desku byl použit materiál tloušťky 20 mm a o rozměrech desky 150 x 290 mm (obr. 6.5). Na desku bylo zhotoveno také 16 řezů a to ve skupině pro vysoký a nízký tlak, každá skupina také obsahovala podskupiny s jinou technologií zhotovení. V každé podskupině byl každý řez zhotoven v rozdílných rychlostech posuvu řezné hlavy.

Z výsledných grafů (obr. 7.2 a 7.3) výsledky experimentu ukázaly, že šířka řezu je vyšší u technologie AWJ (při použití abraziva MESH 80) než u WJ, za to řezy zhotovené technologií WJ, které byly průchozí obsahovaly zvýšený rozptyl hodnot oproti technologií AWJ. U technologie AWJ nedocházelo k plastické destrukci na výstupní straně desky, k významnému zničení ve výstupní části řezu však došlo při použití technologie WJ (obr. 6.8b). Šířky řezu na výstupní straně desky byly menší než na vstupní straně desky (obr. 7.2), z toho vyplývá, že proud ztrácí svou kinetickou energii, tj. nedostatečná schopnost odstraňovat materiál ve spodní části řezu, který vede k úzkému otvoru zářezu.

Použití metody WJ pro kompozitní materiál je nevhodný. V experimentu bylo zjištěno, že ani jeden řez se neobešel bez okolní porušené oblasti (dezintegrované oblasti). Z výsledných grafů (obr. 7.2 a 7.3) vyšly nejlépe řezy, které byly řezány technologií AWJ. U materiálu o tloušťce 20 mm lze pozorovat, že čím je vyšší rychlost posuvu řezné hlavy, tím je menší šířka řezné spáry. Zároveň můžeme pozorovat, že čím je rychlost posuvu řezné hlavy nižší, tím je povrch řezu více homogenní (tento fakt potvrdila také metoda SEM) a zároveň má vyšší schopnost proříznutí celé šíře materiálu.

Z obrázků 6.1 a 6.2 je patrné, že nízký tlak (200MPa) byl ve většině případů nevhodný a to z důvodu nedostatečné řezné síly. Díky tomuto faktu vodní paprsek neměl dostatečnou energii pro rychlé vytvoření průchozího řezu (především za použití technologie WJ). V těchto případech vznikla nevyhovující dezintegrace materiálu v okolí řezu z důvodu nedostatečného odvodu pracovního média z prostoru řezu. Pouze u desky s tloušťkou 4 mm a za použití technologie AWJ měly řezy č. 13 a 14 dostatečnou kvalitu a povrch pro praktické využití.

Na základě optické analýzy pro desku o tloušťce 4mm vyšly nejlépe dva řezné parametry. Oba dva se týkaly technologie AWJ. První z nich má řez č. 8, který byl řezán za vysokého tlaku (380MPa) a rychlost řezné hlavy činila 1000 mm/min. Druhý parametr je při

nízkém tlaku (200 MPa) a rychlost posuvu řezné hlavy je odhadována přibližně na 400 mm/min (viz. popis obrázku 6.24). V praxi by byly doporučeny parametry pro vysoký tlak (380 MPa) a rychlost posuvu řezné hlavy 1000 mm/min., protože rychlost posuvu řezné hlavy je oproti druhému parametru více jak dvojnásobná, pro praktické využití má proto větší váhu než nižší tlak.

Pro materiál o tloušťce 20 mm ve výsledném hodnocení jsou vhodné pouze dva řezy, oba dva řezy byly zhotoveny technologií AWJ a za vysokého tlaku (380 MPa). První řez (č. 5) byl řezán rychlostí posuvu řezné hlavy 50 mm/min a měl o něco kvalitnější povrch řezu (obr. 6.32), a větší průměrnou šířku řezu 1993 μm (obr. 6.37). U druhého řezu č. 6 (obr. 6.33) byla rychlost posuvu řezné hlavy 250 mm/min a průměrná šířka řezu 1681 μm . Se zohledněním kvality povrchu šířky řezu a rychlosti posuvu nejlépe vyšel řez č. 6 a to díky rychlosti posuvu řezné hlavy, který je pětinasobný, což má v praxi při několika hodinovém každodenním provozu obrovský vliv. Nižší tlak (200 MPa) neměl tak velkou účinnost proříznout materiál v celé jeho tloušťce ani za pomoci technologie AWJ. Pro materiály o vyšších tloušťkách nastává velké riziko dezintegrace materiálu. Dezintegraci materiálu způsobuje nedostatečný odvod pracovního média pryč z materiálu, který má snahu proniknout mezi vrstvy vláken.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] HÍŘEŠ, Ondrej, Michal HATALA a Sergej HLOCH. *Delenie kovových materiálov okružnou pilou, vodným prúdom a plazmovým oblúkom*. Ostrava, 2007. ISBN 978-80-8073-769-6.
- [2] The History of Waterjet Technology. *PRECISION waterjet and laser* [online]. Placentia, California, 2016 [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: <http://www.h2ojet.com/news/the-history-of-waterjet-technology>
- [3] DVOŘÁKOVÁ, Jana a Jaromír DVOŘÁK. Frézování a gravírování nekonvenční technologií AWJ. *MM spektrum* [online]. 2007 [cit. 2019-03-03]. DOI: 070411. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/frezovani-a-gravirovani-nekonvencni-technologie-awj.html>
- [4] VALÍČEK, Jan a Sergej HLOCH. *Měření a řízení kvality povrchů vytvořených hydroabrazivním dělením*. Ostrava: Ámos, 2008. ISBN 978-80-254-3588-5.
- [5] MAŇKOVÁ, Ildikó a Sergej HLOCH. *Progresívne technológie: Advanced methods of material removal*. Košice: Vienala, 2000. ISBN 80-709-9430-4.
- [6] HUMÁR, Anton. *TECHNOLOGIE I: TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 3. část* [online]. Brno, 2005 [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf. Interaktivní multimediální text pro bakalářský a magisterský studijní program. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [7] Flow International Corporation. [online]. [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: <http://www.flowwaterjet.com/en/waterjet-technology/history.aspx>
- [8] Řezání vodním paprskem. In: *GUMEX* [online]. [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: <https://www.gumex.cz/sluzby/profilu-a-vyroba-tesneni-75/rezani-vodnim-paprskem-46>
- [9] SÍTEK, Libor, Josef FOLDYNA a Branislav ŠVEHLA. *Vodní paprsek ve strojírenství. Strojárstvo: strojírenství*. Roč. 8. 2004, 101 s. ISSN 1335-2938.
- [10] MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie: Advanced methods of material removal*. Košice: Vienala, 2000. ISBN 80-709-9430-4.
- [11] KRAJNÝ, Zdenko. *Vodný lúč v praxi - WJM*. Epos, 2001. ISBN 80-8057-091-4.
- [12] *FYZIKÁLNÍ (NEKONVENČNÍ) TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ* [online]. In: . 2008, s. 7 [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: <http://www.strojnylyceum.wz.cz/maturita/tep/tep5.pdf>

- [13] BARCAL, Jiří. *Nekonvenční metody obrábění*: Skriptum FSI ČVUT. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1989, 122 s.
- [14] Rudolf. *Nekonvenční metody obrábění*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 1999. ISBN 80-708-2518-9.
- [15] SHIMIZU, Seiji. *Tribology in Water Jet Processes* [online]. In: . 2011, s. 14 [cit. 2019-03-03]. DOI: 10.5772/15804. ISBN 978-953-307-206-7. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/books/new-tribological-ways/tribology-in-water-jet-processes>
- [16] Waterjet Cutting Technology. *KMT Waterjet* [online]. [cit. 2019-03-03].
- [17] ŘASA, Jaroslav, Vladimír GABRIEL a Přemysl POKORNÝ. *Strojírenská technologie 3*. Praha: Scientia, 2001. ISBN 80-718-3227-8.
- [18] Basic waterjet principles. *Waterjets* [online]. 2009 [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: <http://waterjets.org/how-abrasive-waterjets-work/>
- [19] KRAJNÝ, Z. *Vysokotlaký vodný lúč – WJM*. Bratislava: Uraca, Jún 2011, 172 s. ISBN 978-80-227-3535-3
- [20] SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění I*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009. ISBN 978-80-248-2107-8.
- [21] Stroje pro nekonvenční technologie obrábění. *MM spektrum*[online]. (2014) [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/content/file/CNC_ukazky_Cz/6.3.pdf
- [22] DVOŘÁKOVÁ, Jana a Jaromír DVOŘÁK. Technologie WJM/AWJ pro řezání pevných materiálů vodním paprskem II: Technika, technologie. *Glassrevue* [online]. 2018 [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: <http://www.glassrevue.com/news.asp@nid=6709&cid=6.html>
- [23] Technologie řezání vodním paprskem. KovoJuza [online]. 2010 [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: <http://www.kovojuz.cz/vodni-paprsek.html>
- [24] Vodní paprsek. *Jontech* [online]. 2015 [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: <http://jontech.cz/cs/technologie-a-sluzby/vodni-paprsek/>
- [25] Slaný, M. *Obrábění vodním paprskem*: Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2006. 66 s.
- [26] PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.

- [27] BOURA, Luděk. Řezání vodním paprskem: Trendy / Nekonenční technologie. *MM spektrum* [online]. 2008 [cit. 2019-03-03]. DOI: 080719. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/rezani-vodnim-paprskem.html>
- [28] Magnety pro každý den: Magnetická úprava vody – funguje na tvrdost nebo ne?. *Unimagnet* [online]. 09.02.2016 [cit. 2019-03-19]. Dostupné z: <https://www.unimagnet.cz/blog/magneticka-uprava-vody-funguje-na-tvrdost-nebo-ne-n61>
- [29] *Vysokotlaká horizontální plunžrová čerpadla: Sigma pumpy Hranice. SIGMA PUMPY HRANICE.*
- [30] Hypertherm hyprecision intensifier pumps. *WARDJet* [online]. [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: <https://wardjet.com/products/waterjet/pumps>
- [31] Flow International Corporation [online]. [vid. 2011-05-15]. *Flow International Corporation*. Dostupné z: <http://www.flowwaterjet.com/>
- [32] The Intensifier: Pump Technology. *Flow water jet* [online]. [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: <https://www.flowwaterjet.com/Pumps/60k-Intensifier>
- [33] KULEKCI, Mustafa Kemal. Processes and apparatus developments in industrial waterjet applications. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2002, vol. 42, issue 12, s. 1297-1306 [cit. 2019-03-03]. DOI: 10.1016/S0890-6955(02)00069-X. Dostupné z: <https://www-sciencedirect-com.infozdroje.czu.cz/science/article/pii/S089069550200069X>
- [34] PKIT s.r.o., Praha. [online], [vid. 2019-03-03]. *Tryskací materiály*. Dostupné z: <https://www.pkit.cz/cs/tryskaci-materialy/>.
- [35] PTV, spol. s.r.o. [online]. 2011 [cit. 2019-03-03]. Vysokotlaký vodní paprsek - abrazivo. Dostupné z WWW: . <http://www.ptv.cz/ptv/jnp/cz/produkty/abrazivo/index.html>
- [36] *Vlastnosti materiálu pro tepelnou izolaci* [online]. ISOMA [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: https://wense.blob.core.windows.net/media/isoma/vlastnosti-materialu/vlastnosti-materialu-pro-tepelnou-izolaci_v2.0.pdf
- [37] Plásticos Técnicos: Placas para Asilantes Térmicos. *Broncesval* [online]. 2015 [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: <http://www.broncesval.com/productos/ptecnicos/115-placas-para-asilantes-termicos>
- [38] Termoizolacja: Płyty do izolacji pras. *Mikanit* [online]. [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: <http://www.mikanit.com.pl/produkty/termoizolacja.html>

- [49] *Accustream: A-Series Intensifier Pumps* [online]. [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: <https://www.pdfFiller.com/jsfiller-desk16/?projectId=269004603&expId=4532&expBranch=3#7f8c2123d2504ae08a52d0b627790640>
- [40] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [41] AGARWAL, Bhagwan D. a Lawrence J. BROUTMAN. *Vláknové kompozity*. Přeložil Lubomír SODOMKA. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1987.
- [42] BENEŠ, Libor. *Technické materiály (nejen) pro dopravní techniku*. V ČR 1. vyd. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2010. ISBN 978-80-7395-248-8.
- [43] JANOVEC, Jiří, Jiří CEJP a Josef STEIDL. *Perspektivní materiály*. Vyd. 3., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04167-3.
- [44] STRONG, A. Brent, Catherine A. PLOSKONKA a Josef STEIDL. *Fundamentals of composites manufacturing: materials, methods, and applications*. Vyd. 3., přeprac. Dearborn, Mich.: Society of Manufacturing Engineers, Publications Development Dept., Reference Publications Division, c1989. ISBN 08-726-3358-6.
- [45] Laminace. In: *My Boat* [online]. 2016 [cit. 2019-03-18]. Dostupné z: <http://www.myboat.cz/homepage/show/148>
- [46] KOZÁKOVÁ, Romana. *Vyhodnocení měření SEM/EDS: Příloha 1* [online]. 2013, , 158-172 [cit. 2019-03-21]. Dostupné z: https://is.muni.cz/th/biu7r/Priloha_1_-_analyza_koralku.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Označení	Popis	Jednotka
AWJ	Abrasive Water Jet Machining - abrazivní vodní paprsek	[-]
WJM	Water Jet Machining - čistý vodní paprsek	[-]
CAD	Computer Aided Design - počítačem podporované navrhování - software (nebo obor) pro projektování či konstruování na počítači	[-]
CAM	Computer Aided Manufacturing – počítačem podporovaná výroba - software (nebo obor) pro řízení či automatizaci výroby, např. obráběcích strojů, robotů	[-]
CNC	Computer Numerical Control - počítačem řízené obrábění stroje	[-]
MESH	Jednotka zrnitosti	[-]
PAN	Polyakrylonitrilové vlákno	[-]
SEM	Scanning Electron Microscope - řádkovací elektronový mikroskop	[-]
WJM	Water Jet Machining - čistý vodní paprsek	[-]
P_1	teoretický vstupní tlak	[Pa]
P_2	reálný vstupní tlak	[Pa]
S_1	plocha velkého pístu	m^2
S_2	plocha malého pístu	m^2
P	výkon hydrogenerátoru	W
L	Šířka řezu	μm
μ_m	hodnota mechanické účinnosti = 0,95	[-]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: První komerčně prodávané zařízení využívající vodní paprsek (WJ).....	12
Obr. 2.1: Schéma vodního paprsku.....	14
Obr. 2.2: Schéma vodního paprsku.....	15
Obr. 2.3: Schématické rozdělení vodního paprsku.....	16
Obr. 2.4: Vzorové příklady použití technologie WJ.....	17
Obr. 2.5: Řezací hlava pro vodní paprsek (WJ).....	18
Obr. 2.6: Řezací hlava pro vodní paprsek (AWJ).....	19
Obr. 2.7: Vzorové příklady použití technologie AWJ.....	20
Obr. 3.1: Schéma vodního paprsku.....	24
Obr. 3.2: Řez plunžrového čerpadla.....	26
Obr. 3.3: Schéma multiplikátoru.....	27
Obr. 3.4: Multiplikátor.....	28
Obr. 3.5: Mísení abraziva s vysokotlakým paprskem AWJ.....	29
Obr. 3.6: Tvary vyráběných vodních dýz.....	30
Obr. 3.7: Druhy abrazivních materiálů dle firmy PKIT s.r.o.....	32
Obr. 4.1: Příklad použití kompozitního materiálu.....	33
Obr. 4.2: Řez skleněného vlákna.....	35
Obr. 4.3: Řez aramidového vlákna.....	35
Obr. 4.4: Řez uhlíkovým vlákna.....	36
Obr. 5.1: Kompozitní tepelně izolační materiály.....	38
Obr. 5.2: Obráběcí stroj CNC AWJ CT 0806.....	40
Obr. 5.3: Vysokotlaké čerpadlo AccuStream A-6030.....	40
Obr. 5.4: Schéma řezacího plánu desky o tloušťce 4mm.....	42
Obr. 5.5: Schéma řezacího plánu desky o tloušťce 20mm.....	42
Obr. 5.6: Měřicí zařízení SZP 11 – T - ZOOM.....	43
Obr. 5.7: Měření šířky drážky daného úseku.....	43
Obr. 5.8: Nastavení SEM mikroskopu.....	44
Obr. 6.1: Fotografie povrchu desky o tloušťce 4mm.....	45
Obr. 6.2: Fotografie povrchu desky o tloušťce 20mm.....	45
Obr. 6.3: Řez č. 1 kompozitní desky o tloušťce 4mm.....	46

Obr. 6.4: Řez č. 2 kompozitní desky o tloušťce 4mm	46
Obr. 6.5: Řez č. 3 kompozitní desky o tloušťce 4mm	47
Obr. 6.6: Řez č. 4 kompozitní desky o tloušťce 4mm	47
Obr. 6.7: Grafy řezů č. 1-4 metodou WJ	48
Obr. 6.8: Podřez u řezů č. 1-4 kompozitní desky (tl. 4mm)	49
Obr. 6.9: Řez č. 5 kompozitní desky o tloušťce 4 mm	49
Obr. 6.10: Řez č. 6 kompozitní desky o tloušťce 4 mm	50
Obr. 6.11: Řez č. 7 kompozitní desky o tloušťce 4 mm	50
Obr. 6.12: Řez č. 8 kompozitní desky o tloušťce 4 mm	51
Obr. 6.13: Grafy řezů č. 5-8 metodou AWJ.....	52
Obr. 6.14: Řez č. 9: vstupní strana kompozitní desky o tloušťce 4 mm.....	53
Obr. 6.15: Řez č. 10: vstupní strana kompozitní desky o tloušťce 4 mm.....	53
Obr. 6.16: Řez č. 11: vstupní strana kompozitní desky o tloušťce 4 mm.....	54
Obr. 6.17: Řez č. 12: vstupní strana kompozitní desky o tloušťce 4 mm.....	54
Obr. 6.18: Řezy č. 9 až 12 vstupní strany kompozitní desky o tloušťce 4 mm	55
Obr. 6.19: Graf řezů č. 9-12 metodou WJ	55
Obr. 6.20: Řez č. 13 kompozitní desky o tloušťce 4 mm	56
Obr. 6.21: Řez č. 14 kompozitní desky o tloušťce 4 mm	56
Obr. 6.22: Řez č. 15 kompozitní desky o tloušťce 4 mm	57
Obr. 6.23: Řez č. 16 kompozitní desky o tloušťce 4 mm	57
Obr. 6.24: Řezy č. 13 až 15 výstupní strany kompozitní desky o tloušťce 4 mm	58
Obr. 6.25: Grafy řezů č. 5-8 metodou AWJ.....	59
Obr. 6.26: Řez č. 1 kompozitní desky o tloušťce 20mm	60
Obr. 6.27: Řez č. 2 kompozitní desky o tloušťce 20mm	60
Obr. 6.28: Řez č. 3 kompozitní desky o tloušťce 20mm	61
Obr. 6.29: Řez č. 4 kompozitní desky o tloušťce 20mm	61
Obr. 6.30: Graf řezů č. 1-4 metodou WJ. vstupní strana	62
Obr. 6.31: Řezy č. 1-4 na vstupní straně kompozitní desky (tl. 20mm).....	63
Obr. 6.32: Řez č. 5 kompozitní desky o tloušťce 20 mm	63
Obr. 6.33: Řez č. 6 kompozitní desky o tloušťce 20 mm	64
Obr. 6.34: Řez č. 7 kompozitní desky o tloušťce 20 mm	64
Obr. 6.35: Řez č. 8 kompozitní desky o tloušťce 20 mm	65

Obr. 6.36: Řezy č. 5-8 na výstupní straně kompozitní desky o tloušťce 20 mm.....	65
Obr. 6.37: Grafy řezů č. 5-8 metodou AWJ.....	66
Obr. 6.38: Řez č. 9 vstupní stran kompozitní desky o tloušťce 20 mm.....	67
Obr. 6.39: Řez č. 10: vstupní strana kompozitní desky o tloušťce 20 mm.....	67
Obr. 6.40: Řez č. 11: vstupní strana kompozitní desky o tloušťce 20 mm.....	68
Obr. 6.41: Řez č. 12 oblast „c“ z vstupní strany kompozitní desky o tloušťce 20 mm	68
Obr. 6.42: Grafy řezů č. 9-12 metodou WJ.	69
Obr. 6.43: Řezy č. 9 až 12 vstupní strany kompozitní desky o tloušťce 20 mm	69
Obr. 6.44: Řez č. 13 kompozitní desky o tloušťce 20 mm	70
Obr. 6.45: Řez č. 14 kompozitní desky o tloušťce 20 mm	70
Obr. 6.46: Řez č. 15 kompozitní desky o tloušťce 20 mm	71
Obr. 6.47: Řez č. 16 kompozitní desky o tloušťce 20 mm	71
Obr. 6.48: Grafy řezů č. 5-8 metodou AWJ.....	72
Obr. 6.49: Řez č. 13 výstupní strany kompozitní desky o tloušťce 20 mm.....	73
Obr. 6.50: Řezy č. 13-16 kompozitní desky o tloušťce 20 mm	73
Obr. 7.1: Graf statistického porovnání homogenity souboru pomocí Anova F testu	74
Obr. 7.2: Grafy porovnávající šířky řezů u obou tlouštěk za vysokého tlaku	75
Obr. 7.3: Grafy porovnávající šířky řezů u obou tlouštěk za nízkého tlaku	76
Obr. 7.4: Snímek řezu č. 5 u kompozitní desky o tloušťce 20 mm	70
Obr. 7.5: Snímek řezu č. 6 u kompozitní desky o tloušťce 20 mm	80
Obr. 7.6: Snímek řezu č. 7 u kompozitní desky o tloušťce 20 mm	81

SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1: Aplikace vodního paprsku v průmyslu.....	22
Tab. 3.1: Určení tvrdosti vody	25
Tab. 3.2: Složení abrazivního materiálu GMA australského původu.....	32
Tab. 5.1: Vlastnosti kompozitního materiálu Deltherm 68.890	39