

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra materiálu a strojírenské technologie



Diplomová práce

**Obrábění materiálů s povrchovou úpravou vysokotlakým
paprskem**

Bc. Jan Šulc

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Jan Šulc

Technika a technologie v dopravě a spojích
Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

Obrábění materiálů s povrchovou úpravou vysokotlakým paprskem

Název anglicky

Machining by high-pressure water jet of materials with surface treatment

Cíle práce

Cílem diplomové práce je shromáždit a analyzovat aktuální poznatky o problematice technologie WJ a AWJ a následně těchto poznatků využít při plánování vlastního experimentu v oblasti obrábění materiálů s povrchovou úpravou vysokotlakým paprskem. 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

AWJ, kvalita povrchu, optimalizace obrábění, povrchová úprava materiálů, testy, WJ

Doporučené zdroje informací

- BURAGOHAİN, M. K.: Composite structures: design, mechanics, analysis, manufacturing, and testing. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017.
- Cartier, M.: Handbook of Surface Treatments and Coatings London: Professional Engineering, 2003.
- 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.
- GAMBLIN, R.: Machine tools: specification, purchase, and installation. New York: McGraw-Hill Education, 2014.
- 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.
- MOMBER, A. W., KOVACEVIC, R.: Modeling of Abrasive Water-Jet Cutting Processes. Principles of Abrasive Water Jet Machining. London: Springer, 1998.
- Tracton, A. A.: Coatings Technology Handbook. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2006.
- Wolf, R. A.: Plastic Surface Modification: Surface Treatment and Adhesion München; Cincinnati: Hanser, 2010.

Předběžný termín obhajoby

2020/2021 LS – TF

Vedoucí práce

prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Elektronicky schváleno dne 21. 1. 2020

prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 19. 2. 2020

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 14. 05. 2021

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Obrábění materiálů s povrchovou úpravou vysokotlakým paprskem" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 14. 5. 2021

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu diplomové práce panu prof. Ing. Miroslavu Müllerovi, Ph.D., za odborné vedení práce, ochotu, vstřícnost při konzultacích a cenné rady. Rád bych také ocenil jeho věcnou, rychlou a efektivní komunikaci. Dále bych chtěl poděkovat panu Milanu Klímovi za pomoc a ochotu při přípravě a měření vzorků pro experimentální část diplomové práce.

Obrábění materiálů s povrchovou úpravou vysokotlakým paprskem

Abstrakt

Předmětem diplomové práce je dělení polymerních materiálů s povrchovou úpravou pomocí technologie vodního paprsku. Na začátku rešeršní části je popsána podstata dělení materiálů touto technologií a rozdělení technologie na abrazivní a neabrazivní typ paprsku. Následující kapitola pojednává o mechanismu úběru obráběného materiálu při působení vodního paprsku. Dále se práce zabývá povrchovými úpravami polymerních materiálů s důrazem na organické povlaky z nátěrových hmot. Experimentální část je věnována posouzení vlivu řezných parametrů vodního paprsku na dělený materiál a jeho povrchovou úpravu. Předmětem hodnocení byla šířka řezné spáry, velikost úhlu zkosení řezné spáry a vliv vodního paprsku na povrchovou úpravu v závislosti na rychlosti posuvu řezné hlavy a typu paprsku. Pro experiment byly použity tři druhy polymerních materiálů v kombinaci se dvěma druhy organických nátěrových hmot. Výsledky měření stejných materiálů s lišící se povrchovou úpravou byly vzájemně porovnávány.

Klíčová slova: vodní paprsek, dělení materiálů, povrchová úprava materiálů, optimalizace obrábění

Machining by high-pressure water jet of materials with surface treatment

Abstract

The main subject of the diploma thesis is the cutting of polymeric materials with surface treatment using water jet technology. The essence of the cutting of materials by this technology and the division into abrasive and non-abrasive of water beam are described at the beginning of the thesis. The following chapter deals with the mechanism of removal of machining material under the effect of a water jet. The next part deals with the surface treatment of polymeric materials with emphasis on organic layers of paints. The experimental part is devoted to the assessment of the influence of the cutting parameters of the water jet on the divided material and its surface treatment. The subject of the evaluation was the kerf width, kerf angle and the influence of the water jet on the surface treatment depending at a different velocity of the cutting head movement and the type of jet. Three types of polymeric materials were created for the experiment in combination with two types of organic paints. The results of measurements of the same materials with different surface treatment were compared with each other.

Keywords: water jet, material cutting, surface treatment, machining optimization

Obsah

1	ÚVOD	1
2	TECHNOLOGIE ŘEZÁNÍ VODNÍM PAPSKEM	2
2.1	Historie	3
2.2	Podstata metody	4
2.3	Metody řezání vodním paprskem	5
2.3.1	Metoda WJM	5
2.3.2	Abrazivní metody	6
2.3.3	Používaná abraziva	9
2.4	Druhy vodních paprsků	10
2.4.1	Kontinuální vodní paprsek.....	11
2.4.2	Kavitační vodní paprsek	11
2.4.3	Pulzující vodní paprsek.....	11
2.5	Výhody a nevýhody technologie řezání vodním paprskem.....	13
2.6	Možnosti využití vodního paprsku v průmyslu.....	13
3	DELAMINACE	14
3.1	Makromechanismus úběru materiálu	14
3.1.1	Rýhy na řezaném povrchu	15
3.1.2	Vliv rychlosti posuvu na profil řezu	17
3.1.3	Tlumení paprsku při úběru materiálu	17
3.2	Mikromechanismus úběru materiálu.....	17
4	POVRCHOVÉ ÚPRAVY	20
4.1	Vývoj povrchových úprav	20
4.2	Organické povlaky z nátěrových hmot	21
4.2.1	Složení nátěrových hmot	21
4.2.2	Polyuretanové laky	22
4.2.3	Akrylátové laky	23
4.3	Povrchové úpravy plastů	23
4.3.1	Předúpravy plastových povrchů.....	24
4.3.2	Lakování plastů	26
4.3.3	Pokovování plastů	26
5	CÍL PRÁCE	28
6	METODIKA PRÁCE	29
6.1	Charakteristika vzorků.....	29
6.2	Povrchová úprava vzorků	30

6.3	Řezání vzorků technologií vodního paprsku.....	32
6.3.1	Technologické parametry zvolené při dělení vodním paprskem	33
6.4	Měření šířky řezné spáry	33
6.4.1	Přístroj a software pro měření řezné spáry	34
6.4.2	Postup měření šířky řezné spáry	35
6.4.3	Stanovení úhlu zkosení řezné spáry	36
6.4.4	Statistické testování výsledků.....	38
7	VYHODNOCENÍ REALIZOVANÝCH EXPERIMENTŮ	39
7.1	Vliv obráběcích parametrů vodního paprsku na šířku řezné spáry.....	39
7.1.1	Materiál PVC-U + nátěr Mobihel Chromind 2K	39
7.1.2	Materiál PVC-U + nátěr Poluran 790	41
7.1.3	Porovnání šířky řezné spáry materiálu PVC-U s rozdílnou povrchovou úpravou.....	44
7.1.4	Materiál PP + nátěr Mobihel Chromind 2K.....	45
7.1.5	Materiál PP + nátěr Poluran 790.....	47
7.1.6	Porovnání šířky řezné spáry materiálu PP s rozdílnou povrchovou úpravou	49
7.1.7	Materiál POM-H + nátěr Mobihel Chromind 2K.....	50
7.1.8	Výsledky statistického testování.....	52
7.2	Vliv obráběcích parametrů vodního paprsku na úhel zkosení řezné spáry.....	53
7.2.1	Materiál PVC-U + nátěr Mobihel Chromind 2K i Poluran 790	53
7.2.2	Materiál PP + nátěr Mobihel Chromind 2K i Poluran 790.....	54
7.2.3	Materiál POM-H + nátěr Mobihel Chromind 2K.....	55
7.3	Vliv obráběcích parametrů vodního paprsku na povrchovou úpravu.....	57
7.3.1	Materiál PVC-U + nátěr Mobihel Chromind 2K	57
7.3.2	Materiál PVC-U + nátěr Poluran 790	58
7.3.3	Materiál PP + nátěr Mobihel Chromind 2K.....	60
7.3.4	Materiál PP + nátěr Poluran 790.....	61
7.3.5	Materiál POM-H + nátěr Mobihel Chromind 2K.....	62
8	ZÁVĚR.....	65
9	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	67
10	SEZNAM OBRÁZKŮ	70
11	SEZNAM TABULEK.....	71
12	PŘÍLOHY	72

1 Úvod

V technické praxi se nejčastěji setkáváme s výrobním postupem, ve kterém se povrchová úprava výrobku nachází až na samotném konci řetězce výrobních operací. Figuruje zde jako dokončovací operace, které předcházejí nejrůznější technologie zpracování materiálu, s cílem vytvořit požadovaný tvar a funkčnost výrobku. Úkolem povrchové úpravy na konci výrobního řetězce je nejčastěji prodloužit životnost výrobku, dodat mu požadovaný vzhled a tím zvýšit jeho prodejní cenu, případně mu dodat vlastnost, kterou prozatím nemá a je důležitá k jeho budoucí funkci.

V případě, že však tradiční postup výrobního řetězce pozměníme a po nanesení povrchové úpravy bude ještě následovat dělení, případně obrábění povrchově upraveného výrobku, je pro nás důležité vědět, jak se v závislosti na použité technologii obrábění zachová již nanesená povrchová úprava. Zda bude i nadále poskytovat výrobku stejnou ochranu proti korozi, výrazně se nepoškodí její celistvost, případně zda nedojde k porušení některých jejích dalších funkcí.

V automobilovém průmyslu, ale i v jiných odvětvích, zaznamenávají čím dál větší rozvoj povrchově upravené polymerní materiály, které v čím dál větší míře nahrazují těžké a nákladné kovy. Navíc jim povrchová úprava dodává dokonalejší vzhled a jiné užité vlastnosti. Takto ošetřený plastový výrobek často působí na zákazníka dojmem vyšší kvality a celkově lepších vlastností. Pokud by ve výrobním procesu došlo na situaci, že by povrchově upravený polymerní výrobek bylo třeba dělit, jeví se jako vhodná technologie vysokorychlostní vodní paprsek. Jeho výhodou je vytvoření tzv. studeného řezu, který tepelně neovlivňuje dělený materiál vlivem tření rezného nástroje o povrch řezaného materiálu jako u jiných metod dělení materiálů.

Diplomová práce se bude zabývat dělením polymerních materiálů s povrchovou úpravou organickými nátěrovými hmotami vysokorychlostním vodním paprskem. V teoretické části jsou shrnuty poznatky o technologii dělení materiálů vodním paprskem. Experimentální část se zabývá vlivem rezných parametrů vodního paprsku na polymerní materiál a jeho povrchovou úpravu.

2 Technologie řezání vodním paprskem

Voda svým prouděním formuje po tisíciletí reliéf zemského povrchu. Tento fakt byl lidstvu dlouhou dobu známý, avšak v technické praxi se začal uplatňovat až v 19. století. Od té doby se voda díky své dostupnosti začala prosazovat v průmyslu jako nástroj využívaný k opracování nejrůznějších materiálů. V průběhu dalšího vývoje a používání se zjistilo, že přivedením vody pod vysokým tlakem do trysky s malým otvorem se zvýší erozní působení vody a dosáhne se vyšší erozní účinnosti při odstraňování materiálu. V dnešní době jsou součásti vyráběné nebo opracované vodním paprskem nedílnou součástí nejrůznějších odvětví průmyslu, počínaje strojírenstvím a konče kosmickým průmyslem. Tento široký rozsah použitelnosti technologie vodního paprsku je především dán univerzálností a technologickými možnostmi vyplývajícími z této technologie [1].

Proces ubírání materiálu za pomoci vodního paprsku je považován za jeden z nejuniverzálnějších a nejrychleji se rozvíjejících procesů, které se používají ve výrobních aplikacích na celém světě. Vodní paprsek doplňuje nebo nahrazuje další technologie dělení materiálu jako jsou frézování, elektrojiskrové obrábění nebo řezání materiálu laserem, případně plazmou. Neexistují prakticky žádná omezení toho, co může vodní paprsek řezat. Při řezání touto technologií se nevyužívají žádné škodlivé plyny nebo kapaliny a ani nedochází k vytváření nebezpečných materiálů nebo par. Rovněž nedochází k tepelnému ovlivnění řezaného materiálu a ke vzniku, případně k jinému rozložení vnitřních pnutí v materiálu. Jedná se o velmi produktivní a univerzální proces řezání za studena [2].

Řezání vodním paprskem řadíme do kategorie nekonvenčních metod dělení materiálu. Zahrnuje v sobě moderní poznatky z hlediska automatizace, ekonomiky, ochrany životního prostředí a energetické účinnosti. V blízké budoucnosti se dá očekávat expanze této technologie zejména v odvětvích, která si žádají dělení materiálů s vynikajícími vlastnostmi, jež však v průběhu dělení nesmí být znehodnoceny [3]. Příklady využití vodního paprsku jsou zobrazeny na obrázku 1.

Obr. 1 Příklady využití vodního paprsku [2]



2.1 Historie

Využití základních principů řezání vodním paprskem má své kořeny již v poměrně daleké minulosti. Prvními průkopníky byli kalifornští zlatokopové, kteří okolo roku 1870 využívali vodní paprsek k odstranění nánosů písku a vrstev kamení. Jednalo se však pouze o nízkotlaké systémy [4].

Ve dvacátých letech 20. století se již vodní trysky využívaly při denní stavební činnosti k odstraňování písku a horniny [4]. Dále se služeb vodního paprsku využívalo při dělení měkkých materiálů a papíru, kdy vodní paprsek dosahoval relativně nízkých tlaků. Zatímco rané vodní paprsky mohly snadno řezat měkké materiály, nebyly účinné při řezání materiálů tvrdších. Schopnosti řezat kovy a tvrdší materiály bylo dosaženo přidáním abraziva do vodního paprsku v řezací trysce po vytvoření proudu paprsku. Pouhé přidání abraziva do proudu nízkotlakého paprsku však nebylo životaschopným řešením bez dalších vylepšení. Řezání tvrdších materiálů vyžadovalo dvě hlavní inovace. Bylo třeba zajistit vysoký tlak vodního paprsku pomocí ultra vysokotlakého čerpadla a bylo třeba správně formovat proud vody pomocí speciálních trysek [5].

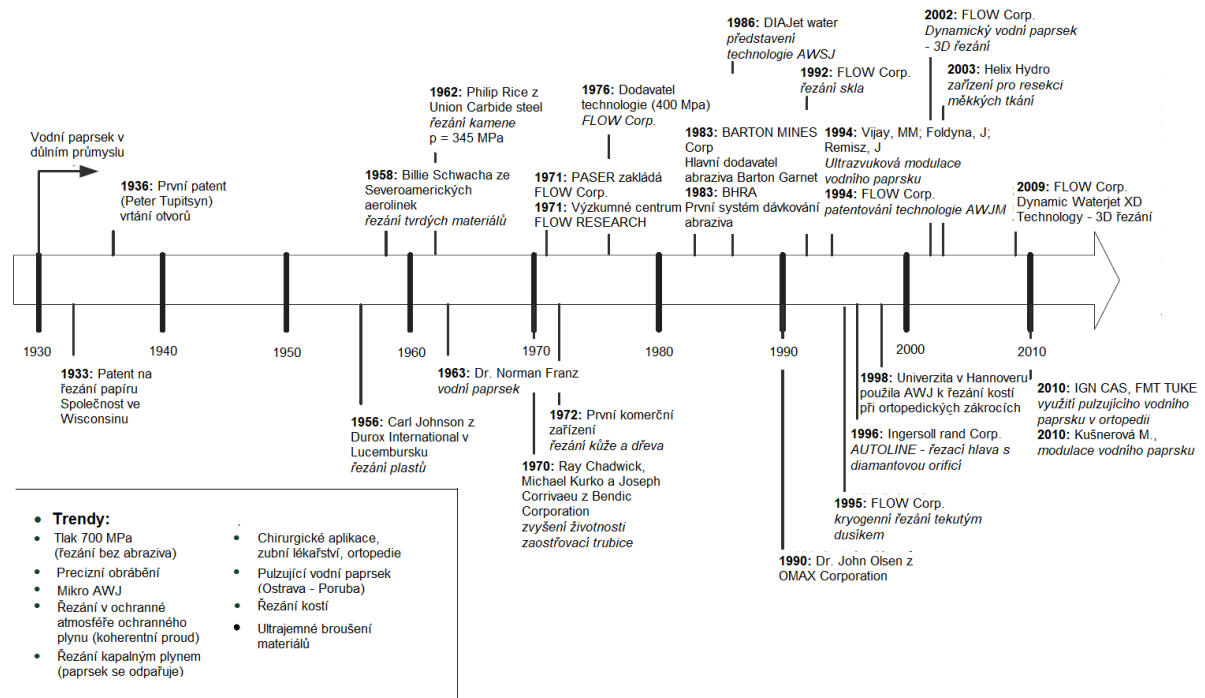
První osobou, která studovala použití velmi vysokého tlaku vody jako řezného nástroje, byl lesní inženýr Dr. Norman Franz v polovině dvacátého století. Dr. Franz využíval vysoký tlak vodního paprsku k řezání a obrábění dřeva. Podmínka ultra vysokého tlaku je definována tlakem větším než 30 000 liber na čtvereční palec (cca 210 MPa). Proto je Dr. Franz považován za otce vodního paprsku [6].

V sedmdesátých letech technologie řezání vodním paprskem opět postoupila. Dr. Mohamed Hashish vytvořil techniku přidávání abraziva k vodnímu proudu, což umožnilo užití vodního paprsku i pro řezání materiálů s vyšší pevností a větší tloušťkou [4]. V roce 1983 zaznamenal vývoj vodního paprsku další významný posun. Firma Flow International uvedla na trh zařízení, které dokázalo řezat materiál o tloušťce až 76 mm. Jeho primární využití však bylo v automobilovém průmyslu k řezání skel [2].

Koncem minulého století dosahoval vodní paprsek tlaku až 670 MPa. V současnosti již moderní stroje umožňují tvarové řezání, protože jsou vybaveny naklápěcím systémem řezné hlavy, čímž lze získat tzv. 3D řez. Hlavní výhodou naklápění je však eliminace úkosu, který vzniká při kolmém řezání. Díky tomu lze dnes na strojích pro tvarové řezání vodním paprskem dosáhnout téměř dokonale kolmého řezu [4].

Vývoj technologie vodního paprsku je zobrazen na obrázku 2.

Obr. 2 Vývoj technologie vodního paprsku [7]



2.2 Podstata metody

Princip obrábění kapalinovým paprskem spočívá v generování vysokého tlaku kapaliny (nejčastěji vody), která při protékání tryskou malého průřezu získává velmi vysokou kinetickou energii. Tím vzniká flexibilní nástroj, který je schopen obrábět téměř všechny technické materiály [8]. Díky kinetické energii vysokotlakého, vysokorychlostního vodního paprsku dochází k oddělování materiálu. V případě abrazivního vodního paprsku se ke kinetické energii kapaliny přidává ještě kinetická energie abrazivních částic [9]. Dochází k hydrodynamickému nebo hydroabrazivnímu dezintegračnímu procesu, který je způsobený silovým, napětovým a deformačním účinkem dělicího nástroje na materiál obrobku. Nástrojem je zde vysokorychlostní proud vody (v případě technologie WJM), nebo proud směsi vody a abraziva (v případě technologie AWJ) [8]. Během používání ale nedochází k jeho degradaci jako u klasických technologií dělení materiálu. Opotřebovává se však zaostřovací trubice vlivem nárazů abraziva. Rychlost proudění paprsku se pohybuje v rozmezí $600\text{-}900 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Výsledkem dělicího procesu je dělicí řez [9].

Při namáhání děleného materiálu dochází na interaktivní ploše k hydrodynamickému nebo hydroabrazivnímu odštěpování stavebních složek materiálu včetně jejich případné destrukce na kontaktu. Charakter nárazu jednotlivých částic je pružně-plastický. Pokud v nárazu převládne složka plastická, může dojít k zarytí a zakotvení abrazivního zrna do materiálu. Dělicího účinku na celé ploše dělicího řezu je pak dosahováno kumulací účinků

jednotlivých částic, které působí současně v efektivním množství s efektivní rychlostí dopadu. Velikost a tvar odebíraného materiálu závisí na počtu současně působících aktivních hran a stěn abrazivních částic a na trajektorii jejich pohybu [8].

Na kvalitu řezu působí následující faktory:

- výtokový průměr trysky (0,75-2,50 mm)
- tlak vody (AWJ: 60-400 MPa, WJM: až 690 MPa)
- rychlost posuvu řezné hlavy
- rychlost proudění
- vzdálenost ústí trysky od povrchu obrobku
- úhel sklonu paprsku
- druh abraziva
- aditiva obsažená ve vodě [9].

Zařízení pro řezání vodním paprskem se skládá z několika částí. Hlavní část tvoří hydraulická jednotka, která obsahuje čerpadlo a multiplikátor. V této části dochází ke zvýšení tlaku ve vodě. Další části zařízení tvoří filtry, ventily, rozvodné potrubí, řezací hlava a zařízení pro její pohyb v osách X, Y a Z, opěrný rošt, lapač nečistot, systém úpravy a recyklace vody a řídicí NC nebo CNC systém [9].

2.3 Metody řezání vodním paprskem

Řezání vodním paprskem lze rozdělit do dvou hlavních skupin:

- WJM (water jet machining) – řezání čistým vodním paprskem.
- AWJ (abrasive water jet) – řezání abrazivním vodním paprskem (vodní paprsek s přísadou abraziva).

2.3.1 Metoda WJM

Při využití čistého vodního paprsku dochází k oddělování materiálu pouze vlivem kinetické energie vysokotlakého, vysokorychlostního paprsku [9]. Dochází k hydrodynamickému obrábění, které je využitelné spíše pro řezání měkkých, tenkých, méně houževnatých a nekovových materiálů jako jsou plasty, dřevo, papír. Díky čistotě řezu lze tuto technologii využít i pro dělení v potravinářském průmyslu. Nástrojem je vysokorychlostní proud vody, který způsobuje úběr materiálu silovým, napěťovým a deformačním účinkem [8].

Základem řezacího systému je hydraulická jednotka s vysokotlakým čerpadlem o příkonu 11-75 kW a průtokem vody 1,2-7,6 l/min, které prostřednictvím multiplikátoru (násobiče tlaku) generuje tlak vody. Pracovní tlak vody dosahuje u řezání čistým vodním paprskem hodnoty až 690 MPa. Voda je pod tímto tlakem dovedena až k řezací hlavě umístěné na portálu řezacího

stolu, kde je přímo zaostřena usměrňovací komorou do clony trysky (štěrbina vyrobená ze safíru nebo diamantu o rozměrech cca 0,075 mm). Takto usměrněný paprsek pokračuje do vodní trysky. Vytvořený paprsek poté proudí z trysky přímo na materiál obrobku. Pohyb řezací hlavy s tryskou je řízen moderní CNC technikou. Po provedení řezu se směs vody a úlomků řezaného materiálu zachycuje v lapači [10].

Přestože oblast vysokorychlostních abrazivních paprsků zaznamenala v posledních letech nesporný technologický pokrok, existuje ve světě neustálý tlak na další vývoj technologií, které využívají pouze čisté vodní paprsky. Dochází k jejich zdokonalování tak, aby se ještě lépe přizpůsobily stále náročnějším ekologickým požadavkům, více se zvyšovala jejich výkonnost a současně bylo jejich využití ekonomicky výhodnější. Jako jedna z cest se nabízí použití ultravysokých tlaků ke generování vodních paprsků. V současnosti dovedou komerčně dostupná vysokotlaká zařízení pro řezání vodním paprskem generovat tlak až 700 MPa. Naráží však na extrémní namáhání jednotlivých částí vysokotlakých čerpadel, což má za následek snížení jejich životnosti [11].

2.3.2 Abrazivní metody

Řezání abrazivním vodním paprskem patří mezi nejpokročilejší moderní metody obrábění materiálů ve zpracovatelském průmyslu. První komerční systém řezání vodním paprskem byl k dispozici v roce 1983 [12]. Technologie abrazivního vodního paprsku (AWJ) se vyvinula z metody řezání čistým vodním paprskem. Myšlenka přidávání abrazivních částic do proudu čisté vody se zrodila za účelem dělení tvrdších materiálů jako je ocel, beton a další. Fenomén rozpadu je založen na erozi materiálu abrazivními částicemi, které jsou zrychlené za pomoci vysokorychlostního vodního paprsku. Při dopadu paprsku na povrch obrobku dochází k přenosu vysoké energie na relativně malou plochu. Paprsek způsobuje prudké změny napětí na dopadové ploše, což vede ke vzniku eroze, stříhu a oddělení materiálu [13]. Služeb abrazivního vodního paprsku se hojně využívá při obrábění oceli, titanu, mosazi, hliníku, kamene, ale i při řezání různých druhů kompozitů a skla (s výjimkou skla kaleného) [12].

Existuje několik proměnných, které ovlivňují výkon abrazivního paprsku. Hlavními kritérii jsou tlak vody, průtok, velikost trysky, průtok abrazivního materiálu, odstup trysky od materiálu a rychlost posuvu řezné hlavy. Tyto parametry ovlivňují kvalitu řezu, šířku řezné spáry, rychlost úběru materiálu a zkosení hrany. Pro nastavení ideálních parametrů obrábění je důležité si definovat požadovanou kvalitu řezu [14].

Řezání abrazivním vodním paprskem se vyznačuje vysokou flexibilitou a všestranností, malými řeznými silami a tím pádem i minimálním silovým namáháním obrobku a neexistujícím

tepelným ovlivněním materiálu. Umožňuje řezání složitých tvarů a provoz v extrémních podmínkách s rizikem požáru nebo výbuchu [12].

V průběhu let byly vyvinuty dva základní systémy pro generování abrazivního vodního paprsku:

- systém AWIJ (abrasive water injection jet)
- systém AWSJ (abrasive water suspension jet).

Systém AWIJ

Jednou z možností, jak vytvořit abrazivní vodní paprsek je technologie AWIJ (obecně AWJ). Hlavními částmi této technologie jsou vysokotlaké vodní čerpadlo, vysokotlaké vedení kapaliny a řezací hlava. Řezací hlava se skládá z vodní trysky (orifice), směšovací komory a zaostřovací trubice. Vodní tryska má průměr v rozmezí 0,1 až 0,4 mm a vytváří proud čisté vody, který se pohybuje velmi vysokou rychlostí v závislosti na úrovni vstupního tlaku. Vzniklý vodní paprsek následně pokračuje do směšovací komory, ve které vlivem tzv. venturiho efektu vytváří podtlak. Abrazivní částice jsou společně se vzduchem vlivem podtlaku vtahovány do směšovací komory otvorem v její plášti. V komoře dochází k mísení abrazivních částic, vzduchu a vysokorychlostního vodního paprsku, který částice urychluje. Konečný tvar a zrychlení abrazivního vodního paprsku je dán vnitřní geometrií zaostřovací trubice. Systém dodávky abraziva se skládá z násypky abraziva a pneumaticky ovládaného ventilu, který řídí hmotnostní průtok abraziva [13].

Systém AWSJ

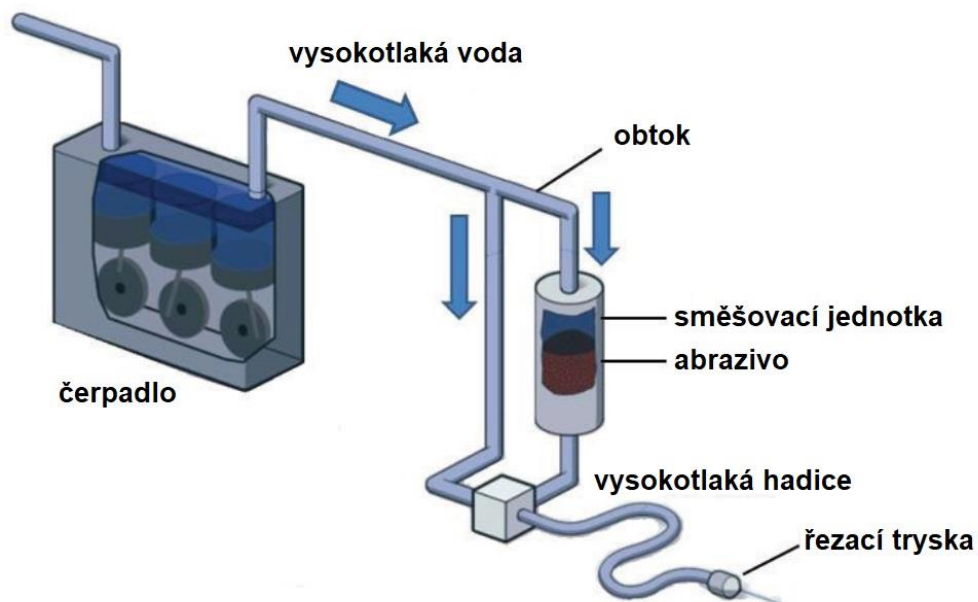
Abrazivní vodní paprsek lze však vytvořit i druhým způsobem tak, že se abrazivní částice smíchají s vodou ještě předtím, než vodní paprsek opustí orifici. Suspenze vody a abraziva se vytvoří při pracovním tlaku ve specializované nádrži [7]. Tato metoda byla vyvinuta v roce 1984 a od metody AWIJ se liší absencí vzduchu v řezném paprsku. Přeměna vysokotlaké suspenze vody na vysokorychlostní paprsek nastane v momentě, kdy voda projde řezací tryskou. To umožňuje získání vodního paprsku s lepší koherentní strukturou, stabilitou a výrazně vyšším řezným výkonem [13]. Hlavní výhodou metody AWSJ je využití výrazně nižšího pracovního tlaku při dosažení stejné účinnosti řezání jako u AWIJ. Paprsek se skládá pouze ze dvou složek (vody a abraziva) a díky tomu je vhodný pro řezání výbušnin. I přes své výhody se však abrazivní vodní suspenze nerozšířila jako technologie pro široké průmyslové použití zejména kvůli dlouhým spínacím časům, kdy se paprsek nemůže rychle zastavit a zase spustit a také z důvodu vyššího abrazivního opotřebení některých komponent zařízení [7].

S vývojem mikroelektroniky však metoda AWSJ nachází uplatnění v oblasti mikroobrábění křehkých i tvárných materiálů. Bylo totiž dokázáno, že při absenci vzduchu

v paprsku vzniká hladší povrch a užší řezná spára. V kombinaci s nízkým pracovním tlakem (<20 MPa) výzkum ukazuje, že AWSJ je životaschopná technologie pro generování mikroprvků z křehkých i tvárných materiálů. Své uplatnění nalezne také při demontážních a demoličních pracích, kde jsou třeba dlouhé řezy [7].

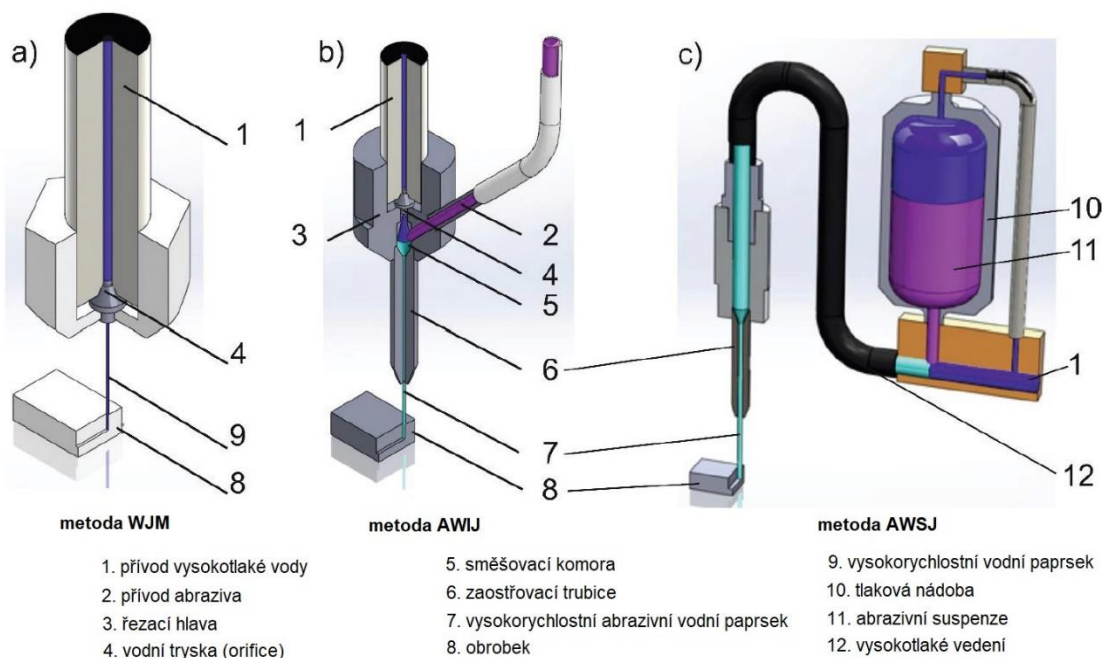
Hlavními součástmi zařízení jsou vysokotlaké čerpadlo, směšovací jednotka pro dodávku abrazivního materiálu, vysokotlaké hadice a řezací tryska o průměru 0,5 až 1,3 mm. Hodnota tlaku vody se pohybuje do 250 MPa. V průběhu let byly vyvinuty tři různé principy generace AWSJ – přímé čerpání, nepřímé čerpání a princip obtoku. Komerční systémy většinou využívají obtokový princip. Vysokotlaká voda je dodávána z čerpadla do míchací jednotky. Před míchací jednotkou je proud vody rozdělen. Část proudu vody pokračuje obtokovým potrubím do míchací jednotky a druhá část pokračuje druhým potrubím přímo k výstupu ze směšovací jednotky. Ve směšovací jednotce se část proudu vody smísí s abrazivem a na výstupu ze směšovací jednotky se oba proudy opět setkají. Množství abraziva v obtokovém potrubí je řízeno škrtícím ventilem. Vzniklá směs je poté dodávána hadicí přímo do řezací hlavy [13]. Schéma zapojení obtokového obvodu pro generování abrazivní vodní suspenze je zobrazeno na obrázku 3.

Obr. 3 Obtokový systém pro generování AWSJ [13]



Řezací hlavy pro metodu WJM i pro abrazivní metody jsou zobrazeny na obrázku 4.

Obr. 4 Řezací hlavy pro vytvoření vysokorychlostního vodního paprsku [15]



2.3.3 Používaná abraziva

Abraziva pro řezání abrazivním vodním paprskem lze rozdělit do dvou hlavních skupin – přírodní abraziva a průmyslově vyráběná abraziva. Přírodní abraziva se vyrábějí z minerálů přírodního původu bez zvláštního chemického nebo fyzikálního zpracování. Vyráběná abraziva se vyrábějí buď tepelnou nebo chemickou reakcí z minerálních surovin. Do vyráběných abraziv se také řadí syntetické materiály a vedlejší produkty nebo odpad z výroby. Hlavním cílem těžby a výroby abrazivních materiálů je vznik abraziv konzistentní kvality za rozumnou cenu, jejichž použití nezpůsobuje žádná zdravotní nebo ekologická rizika. Využití minerálů nebo syntetických materiálů jako abraziva pro abrazivní vodní paprsek je ovlivněno především jejich fyzikálními a technologickými vlastnostmi, vlivy na životní prostředí, nákladovou efektivitou těžby a zpracování a také cenou v okamžiku využití [16].

Přírodní abraziva se těží buď jako minerály z hornin nebo jako těžké minerály z písků. Do konečné podoby se minerály upravují technologickými procesy, které zahrnují převážně drcení, oddělování a třídění surovin. Mezi přírodní abraziva řadíme materiály jako granát, diamant, korund, hematit, olivín nebo křemen. Na kvalitu minerálních abraziv má největší vliv jejich geologická historie. Technologické procesy při zpracování minerálů mohou ovlivnit pouze několik málo parametrů [16].

Průmyslově vyráběná abraziva jsou většinou druhotné suroviny nebo průmyslové odpady. Do této skupiny řadíme materiály jako sklo, struska nebo porcelán [16].

2.4 Druhy vodních paprsků

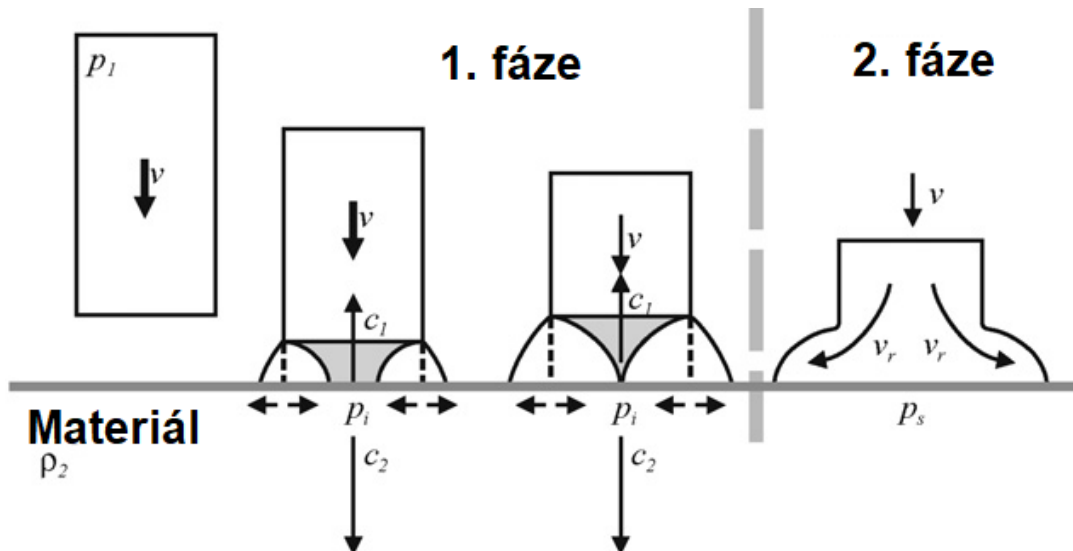
Při srážce kapaliny pohybující se vysokou rychlostí s pevným tělesem dochází ke vzniku krátkodobých, přechodových jevů. Vše je provázeno výrazným nárůstem tlaku v místě dopadu kapaliny na povrch, což způsobuje poškození jak na povrchu, tak i uvnitř struktury materiálu vystaveného působení dopadající kapaliny [17].

Dopad kapaliny na pevný povrch probíhá ve dvou fázích. Během první fáze se kapalina chová jako stlačitelná a díky tzv. hydraulickému rázu (water hammer) generuje impaktní tlak p_i . Impaktní tlak způsobuje velkou část poškození vlivem nárazu kapaliny na pevný povrch. Jakmile odezní impaktní tlak, začíná druhá fáze dopadu kapaliny. V momentě, kdy dojde k překročení meze tlakové deformace kapaliny, začíná kapalina proudit radiálně kolmo k ose paprsku směrem ven podél dopadové plochy. Rychlost radiálního toku v_r může dosahovat až pětinasobku dopadové rychlosti kapaliny v . V důsledku toho působí na materiál nejen síly normálové, ale i smykové. Během druhé fáze dopadu se kapalina chová jako nestlačitelná a tlak v ose paprsku poklesne na tzv. stagnační tlak p_s , který je mnohem nižší, ale trvá relativně dlouhou dobu [17].

Smykové síly způsobené radiálním tokem vytvářejí v materiálu lokální trhliny a podepisují se na rychlejším dělení materiálu. Účinek smykových sil může být umocněn povrchem řezaného materiálu [17].

Celý efekt dopadu vysokorychlostního paprsku na povrch pevného tělesa je zobrazen na obrázku 5.

Obr. 5 Dopad paprsku na povrch tělesa [17]



Podle možností strojního zařízení a jeho konstrukce je možné rozlišit tři nejčastěji využívané typy vodních paprsků:

- kontinuální paprsek
- kavitační paprsek
- pulzující paprsek [10].

Paprsky se od sebe liší svými hydrodynamickými vlastnostmi.

2.4.1 Kontinuální vodní paprsek

Tento druh vodního paprsku se vyznačuje stálou energetickou hladinou paprsku po celou dobu trvání procesu. Jedná se o nejvíce rozšířenou metodu, kterou lze využít při řezání prakticky všech materiálů. Nevýhodou je vytváření povrchu s horší kvalitou [10].

2.4.2 Kavitační vodní paprsek

Kavitační paprsek pracuje na principu lokálního porušení materiálu vlivem destrukční síly kavitačních bublin. Jedná se tedy o kontinuální paprsek s obsahem bublinek. Zástupcem takového paprsku je vodní paprsek s abrazivem, který má jiné chování než ostatní vodní paprsky. Tato odlišnost je způsobována proudem kavitačních bublin, které mají původ v turbulenci tekutiny poblíž řezaného povrchu. K turbulenci dochází vlivem rozdělení abrazivního vodního paprsku na dvě rozdílné oblasti:

- Oblast na povrchu proudu o vysokém tlaku, kde rotují částice abraziva a tvoří erozní řeznou frontu.
- Vnitřní oblast toku, kde je vysoká rychlost proudění tekutiny (odlišná od rychlosti na povrchu proudu) [10].

2.4.3 Pulzující vodní paprsek

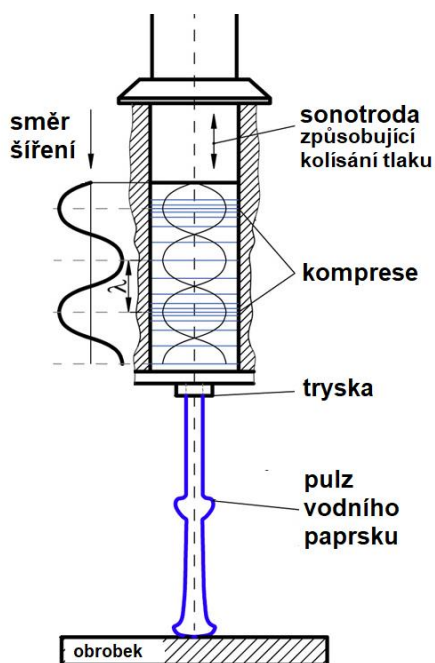
V dnešní době je využití čistého i abrazivního vodního paprsku hojně rozšířeno v průmyslu pro řezání různých materiálů. Tyto technologie však využívají velmi vysokých tlaků a narážejí na technologické i ekonomické limity. Současným trendem je eroze materiálu při nižších tlacích s využitím pulzujícího vodního paprsku, který se rovněž hodí při aplikacích v různých odvětvích průmyslu [18].

Pulzující vodní paprsek je hybridní modifikací kontinuálního vodního paprsku a ultrazvukové technologie. Paprsek vlivem krátkodobých a opakovaných impulzů zapříčiňuje vznik tlakových špiček v řezaném materiálu, které příznivě působí na rychlost rozšiřování řezné mezery. Pulzy v proudu vody jsou produkovány periodickým pohybem sonotrody při frekvenci 20 nebo 40 kHz (viz. obrázek 6). Kolísání tlaku v kapalině se vytvoří v momentě, kdy akustická vlna prochází vysokotlakou akustickou komorou a vystupuje z trysky, přičemž transformuje kontinuální proud vody na pulzující paprsek kapaliny. Paprsek se při výstupu z trysky chová jako kontinuální, ale díky tlakovým pulzům vytéká z trysky proměnnou rychlostí. V určité

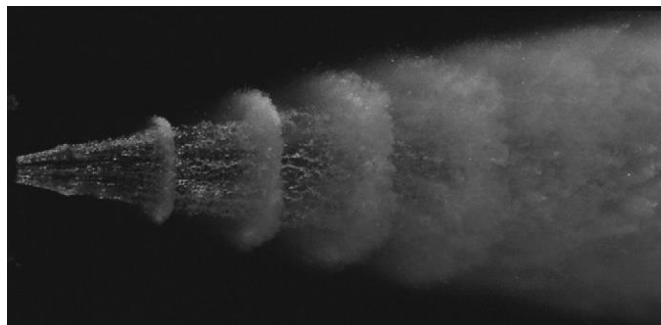
vzdálenosti od výstupu z trysky rychlejší části paprsku dostihnou částice pomalejší. Tím se původně kontinuální paprsek rozčlení na jednotlivé pulzy (shluky vody). Vzdálenost, ve které dochází ke vzniku pulzů v paprsku závisí na přírodním tlaku a frekvenci sonotrody [19]. Vlivem dopadajících pulzů s vysokou kinetickou energií dochází na dopadové ploše ke generování impaktního tlaku. Vlivem cyklického zatěžování dopadové plochy a působení radiálního vysokorychlostního toku kapaliny dochází také k únavovému a smykovému namáhání materiálu. Tyto faktory nadále zvyšují účinnost pulzujícího kapalinového paprsku v porovnání s paprskem kontinuálním [18].

Transformace spojitého proudu na pulzní proud lze dosáhnout několika metodami. Jednou z možností je využití vnitřního mechanického modulátoru. K opakující se modulaci toku je využito mechanické zařízení, které je umístěné na trysce. Nevýhodou tohoto řešení je krátká životnost rotujících částí modulátoru. Další možností může být využití samorezonující trysky, která dokáže přeměnit tok kapaliny na shluk vodních kapiček. Fluktuace v toku jsou vytvářeny v důsledku vnitřního tvaru trysky, ve kterém se voda odráží a putuje zpět směrem ke vstupu, kde se generují stacionární vlny. Pokud se tato zpětnovazební tlaková oscilace shoduje s přirozenou frekvencí komory trysky, nepřetržitý paprsek se transformuje na paprsek pulzní. Tato metoda postrádá množství pulzací potřebných pro efektivní dezintegraci. Třetí možností je indukovat tlakové kolísání pomocí vibrací sonotrody do proudu tlakové vody, jak je uvedeno výše. Akustický systém se skládá z ultrazvukového generátoru, elektrického vodiče, měniče a sonotrody [19].

Obr. 6 Vznik pulzního vodního paprsku pomocí sonotrody [19]



Obr. 7 Pulzující vodní paprsek [17]



2.5 Výhody a nevýhody technologie řezání vodním paprskem

Výhody:

- téměř žádné tepelné ovlivnění obrobku
- vysoká univerzálnost obrábění
- vysoká flexibilita
- malé řezné síly působící na obrobek
- nedochází k produkci prašných částic a toxických výparů
- jednoduché upínání obrobku
- nedochází ke vzniku zbytkového napětí ani mikrotrhlin
- malé ztráty materiálu v důsledku úzkého řezu
- vysoká přesnost vyřezávaných dílů (až $\pm 0,04$ mm)
- možnost řezání pod hladinou vody [20] [9].

Nevýhody:

- malá řezná rychlost při obrábění tvrdých materiálů
- mokrá a relativně hlučný způsob dělení
- nutnost ošetření materiálů podléhajících korozi
- zhoršená kvalita řezu u silnějších materiálů – vznik striací
- zaoblení vnitřních rohů, případně vznik efektu kuželu
- při dělení materiálu je nutné dosáhnout průstřelu materiálu (tzv. náběh) [10] [21].

2.6 Možnosti využití vodního paprsku v průmyslu

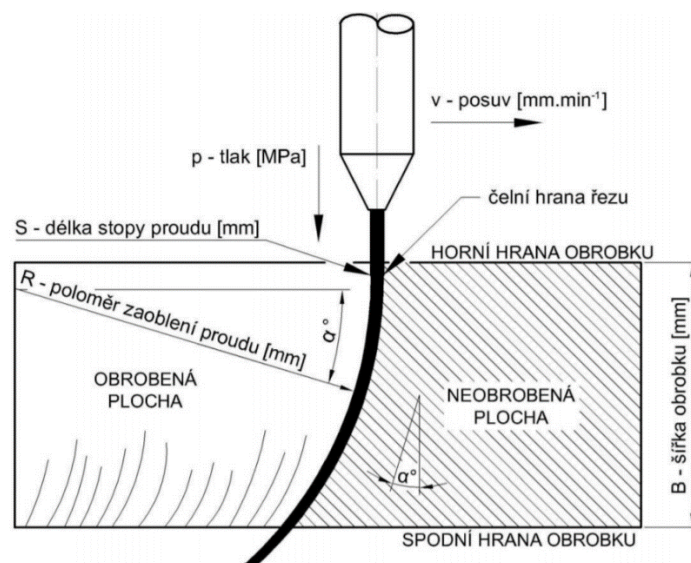
- strojírenství – řezání titanu, wolframu, uranu a velmi tvrdých, těžkoobrobitelných materiálů (slinuté karbidy, superslitiny na bázi Ni nebo Co) a výroba tvarově složitých součástí (lopatky, díly turbín a kompresorů)
- elektrotechnický a elektronický průmysl – řezání keramiky, skla, feritů, permanentních magnetů, desek tištěných spojů
- chemický průmysl – dělení výbušných látek (dynamit, tuhá paliva raketových motorů)
- potravinářský průmysl – dělení potravin v syrovém a zmraženém stavu
- sklářský průmysl – řezání, vrtání a matování skel, tvarové řezy
- stavební průmysl – dělení plastů (polyuretany, polystyrény), čedičových vat, betonu, keramiky
- jaderná energetika – dekontaminace a odstraňování ochranných železobetonových vrstev v zařízeních pro jaderné elektrárny, čištění a odstraňování usazenin [9].

3 Delaminace

Technologický proces dělení hydroabrazivní erozí se uskutečňuje na výrobním zařízení pomocí vysokorychlostního hydroabrazivního proudu. Narozdíl od klasických technologií (např. soustružnického nože) však nedochází k degradaci jeho vlastností v čase používání. Avšak při vytváření paprsku dochází k opotřebování zejména zaostřovací trubice v důsledku nárazů abraziva na její vnitřní stěnu [1]. Dělení abrazivním vodním proudem spočívá v odebrání materiálu mechanickým účinkem dopadu úzkého abrazivního vodního proudu s vysokou rychlostí a kinetickou energií na jednotku plochy. Kinetická energie se přeměňuje na energii tlakovou a způsobuje vznik vysokých napětí v místě dopadu paprsku na obráběný materiál. Pokud vyvolané napětí překročí maximální smykové napětí materiálu, dojde k uvolnění drobných třísek materiálu a odhalí se čerstvý povrch. Takto proud vody proniká do obrobku, postupně ztrácí svoji kinetickou energii a vychyluje se. Vychylování a zároveň zpomalování paprsku v řezu je důsledkem tření mezi povrchem vodního paprsku a povrchem řezaného materiálu [3]. Proces erozivního opotřebení je velmi silně závislý na pevnostních charakteristikách materiálu a je úzce spjatý s efektem vklínování, při kterém voda v povrchu řezaného materiálu otevírá trhliny a zrychluje tak jejich šíření [1].

Na obrázku 8 je zobrazena dráha vodního paprsku a jeho vychýlení. Paprsek se v každém bodě materiálu pohybuje po zaoblené dráze, jejíž poloměr se mění s délkou oblouku.

Obr. 8 Schéma procesu dělení vodním paprskem [1]



3.1 Makromechanismus úběru materiálu

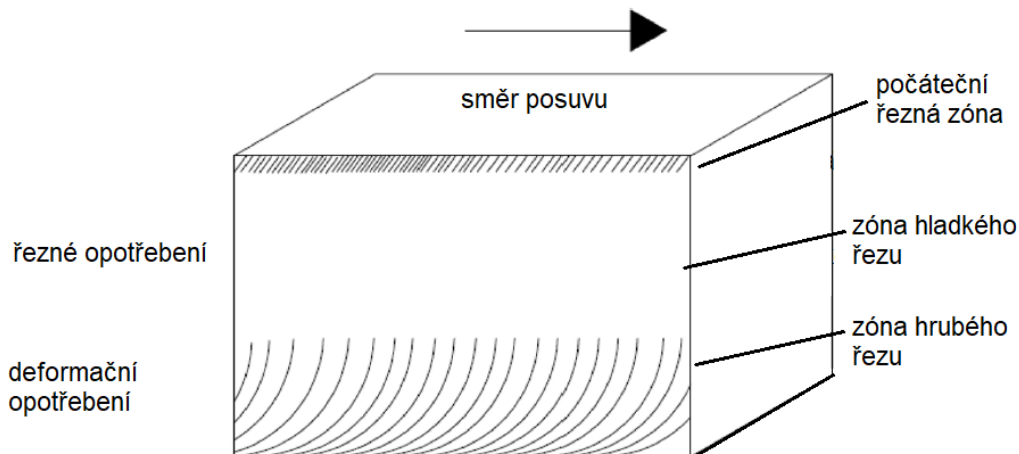
Mezi hlavní rysy makroskopického způsobu úběru materiálu patří topografie a tvar povrchu, k jejichž vytvoření dochází působením čela vysokorychlostního hydroabrazivního

proudu, přičemž dochází k jeho zakřivení v průběhu pronikání do materiálu [1]. Za největší problém při obrábění abrazivním vodním paprskem lze považovat nestejnou kvalitu obrobeneho povrchu. Tato nestejnoroďost se projevuje různými parametry kvality řezu. Mezi tyto parametry patří drsnost povrchu, odchylka obrobeneho povrchu od svislé roviny řezu a vzhled zakřivených čar na obrobeneho povrchu (vytváření striací). Všechny tyto jevy významně ovlivňují využití této technologie [3].

Povrch vytvořený prostřednictvím vodního paprsku lze rozdělit na tři odlišné zóny. Jmenovitě se jedná o počáteční řeznou zónu, zónu hladkého řezu a zónu hrubého řezu. Kvalita řezu ukazuje, že abrazivní mechanismus úběru materiálu je kombinací abraze a plastické deformace abrazivních částic. Řezací mechanismus v jednotlivých zónách lze považovat za kombinaci řezného, deformačního a erozivního opotřebení v závislosti na úhlu dopadu částic. Od shora směrem ke spodní části řezaného povrchu roste stupeň plastické deformace materiálu [3].

Jednotlivé zóny řezaného povrchu jsou zobrazeny na obrázku 9.

Obr. 9 Zóny řezaného povrchu [22]



3.1.1 Rýhy na řezaném povrchu

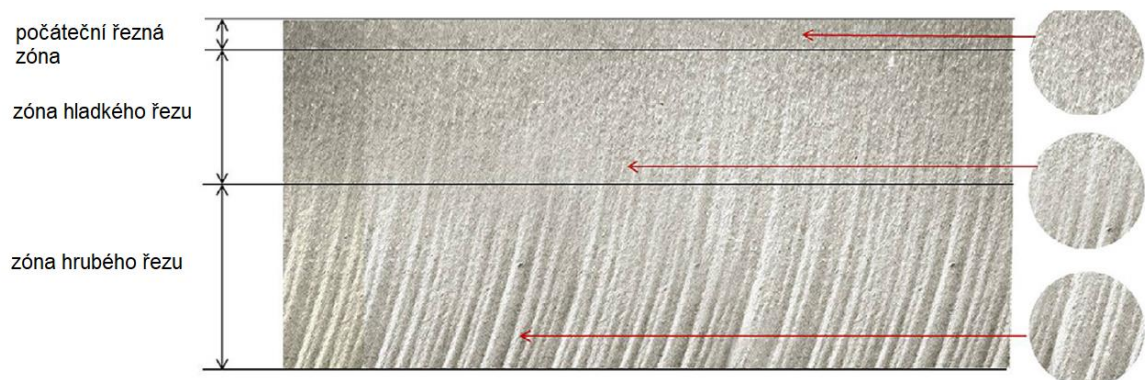
Rýhy na řezané ploše jsou charakteristickým znakem dělení materiálu proudovými technologiemi. Zjednodušeně se povrch řezu vytvořený abrazivním vodním paprskem skládá z horní hladké zóny (horní erozní zóna), na které se rýhy nenacházejí a základem povrchové nerovnosti je drsnost a spodní hrubé zóny, kde dominují zvlněné rýhy. Vhodného povrchu je možné dosáhnout pouze za splnění podmínky, že tloušťka obrobku je menší než tloušťka horní erozní zóny [1]. Mechanismus vytváření rýh není doposud přesně objasněn, avšak předpokládá se, že tvorba rýh je způsobena zvlněným rozdělením kinetické energie částic. Vliv na vlnité rozdělení kinetické energie abrazivních částic mají následující faktory:

- proměnlivost procesních faktorů např. rychlost posuvu, tlak a hmotnostní tok abraziva
- vibrace obráběného materiálu a řezací hlavice v průběhu dělení
- vibrace způsobené nosičem abrazivní hlavice [22].

Hodnota úběru materiálu je podmíněná kinetickou energií částic. Během řezání v horní zóně řezaného povrchu má většina částic vyšší kinetickou energii, než je požadovaná destrukční energie materiálu obrobku, takže lze proříznout celý řezaný materiál a získat hladký povrch. Distribuce kinetické energie částice v proudu však není jednotná a v příčném průřezu proudu má vlnitý profil [3]. V horní erozní zóně má většina částic vyšší kinetickou energii, než je potřebná destrukční energie obrobku, tím pádem dojde k rozříznutí celé řezané plochy a je získán hladký povrch. Se zvyšující se hloubkou řezu však klesá počet částic, které mají vyšší kinetickou energii, než je požadovaná destrukční energie materiálu. To má za následek snížení účinného průměru paprsku a zvýšení zvlněného profilu kinetické energie částice. Shluk částic v čele proudu pokračuje v úběru materiálu, zatímco shluk slabších částic na konci proudu již není schopný úběru materiálu svojí vlastní energií, a tak sleduje dráhu částic s vyšší energií. To má za následek vznik ostrých výběžků a žlábků na povrchu obrobku, které jsou všeobecně nazývané jako rýhování nebo striace [1]. Na obrázku 10 lze vidět vznik rýhování na řezaném povrchu v závislosti na klesající hodnotě kinetické energie částic.

Úhel zakřivení rýhování závisí na poměru mezi rychlostí a velikostí hodnoty vertikálního průniku vodního paprsku. Se zvyšující se hloubkou řezu se zmenšuje síla paprsku a tím se zmenšuje i hodnota průniku. Rychlost posuvu však zůstává konstantní. Poměr mezi rychlostí posuvu a hodnotou penetrace paprsku se zvětšuje a tím se zvětšuje úhel zakřivení rýhy v závislosti na zvyšující se hloubce řezu [22].

Obr. 10 Řezaný povrch hořčikové slitiny [22]



3.1.2 Vliv rychlosti posuvu na profil řezu

Při průniku vodního paprsku řazaným materiálem může profil řezu obsahovat četné tvarové chyby v rovině kolmé k řezané ploše, které vznikají vlivem nevhodné pojezdové rychlosti. Při použití rychlosti posuvu mnohem nižší, než je ta, která zaručuje hladký povrch řezu, se vytvoří zářez ve tvaru obráceného písmene V. V případě, že je však rychlost pojezdu vysoká, dojde k vytvoření řezu ve tvaru písmene V. Při správné volbě rychlosti pojezdu jsou stěny řezu rovnoběžné, což znamená, že nedochází ke zúžení profilu řezu, a povrchy jsou hladké bez zvlnění [23]. Příklady tvarů řezů jsou zobrazeny na obrázku 11.

Obr. 11 Tvary průřezů v závislosti na rychlosti posuvu řezací hlavy [23]



3.1.3 Tlumení paprsku při úběru materiálu

Voda, která je nedílnou složkou AWJ, přispívá k dělicí schopnosti abrazivní částice v několika směrech:

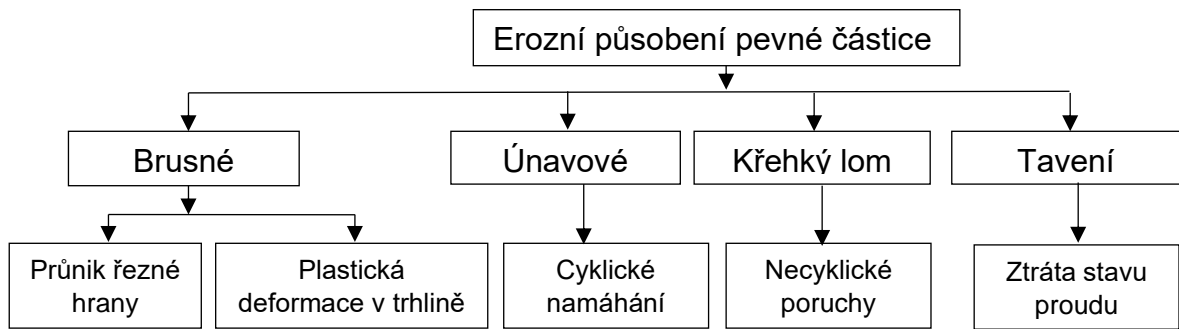
- Akceleruje abrazivní částice. V momentě, kdy částice vstupují do směšovací komory, jim je udělena vysoká kinetická energie a hybnost.
- Smáčí řezaný povrch obrobku a odvádí použité abrazivo a mikročástice obrobku.
- Působí jako otvírací klín a napomáhá zvýšení rychlosti šíření trhlin v erozním procesu [1].

V určitém bodě se vytváří vrstva, která se skládá z vody, částic materiálu a použitého abraziva. Tato vrstva se staví do cesty působícím abrazivním částicím, snižuje jejich rychlost a tím pádem i kinetickou energii a hybnost. Funguje tedy jako tlumič abrazivních částic. Odhaduje se, že toto tlumení může redukovat rychlost abrazivních částic až o jednu třetinu. Vrstva ovlivňuje rychlost částice i po jejím odražení od materiálu obrobku a tím redukuje i její následnou schopnost dále erodovat materiál [1].

3.2 Mikromechanismus úběru materiálu

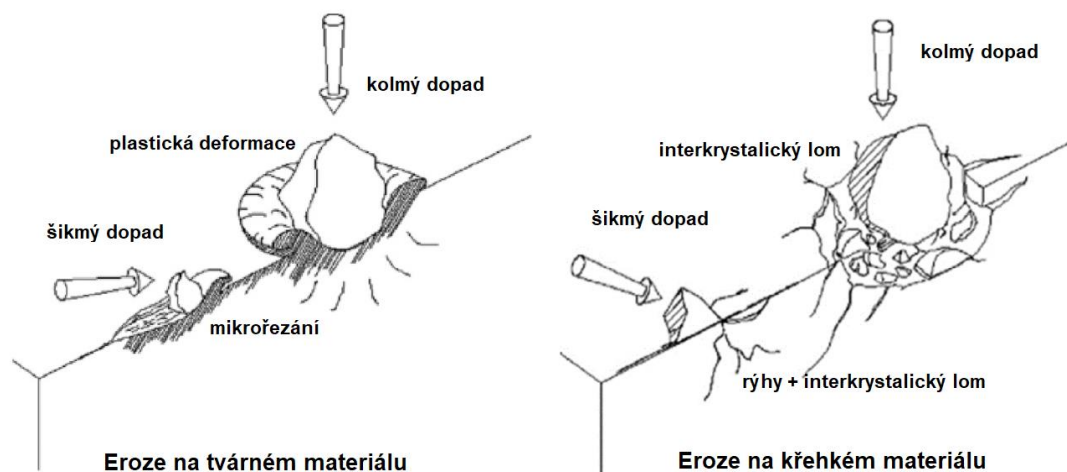
Hlavním mechanismem v procesu odstraňování materiálu abrazivním vodním paprskem je dopad pevných částic, které vysokorychlostní vodní paprsek unáší a dopravuje při vysokých rychlostech na cílový materiál obrobku [3]. Na obrázku 12 je zobrazena hierarchie odstraňování materiálu obrobku působením pevné částice.

Obr. 12 Odstraňování materiálu obrobku erozním působením pevné částice [1]



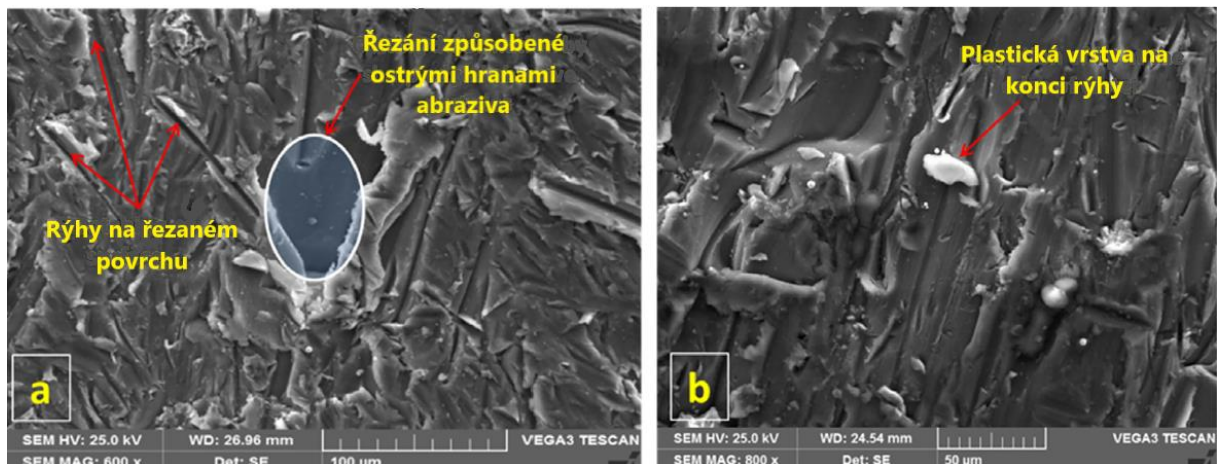
Mechanismy úběru materiálu jsou hlavně dělení, únava, vytváření křehkých lomů a tavení. Tyto mechanismy však nepracují samostatně, ale současně. Přítomnost jednotlivých mechanismů separace částic závisí na mnoha faktorech, jako je vliv úhlu dopadu paprsku, kinetická energie částice, tvar částice, materiálové vlastnosti obrobku a okolní podmínky. S ohledem na mechanické vlastnosti a chování abrazivní částice při dopadu lze materiál obrobku rozdělit do dvou skupin. První skupinou jsou tvárné materiály, které se vyznačují deformačními vlastnostmi. Druhou skupinou jsou materiály křehké. U tvárných materiálů je proces separace materiálu rozdělen do dvou mechanismů, a to na mikrořezání a dělení materiálu plastickou deformací. Při sledování procesu řezání křehkých materiálů vedla řada výzkumů k identifikaci mechanismu oddělování materiálu spočívajícího v kombinaci křehkého lomu a plastické deformace. Při nízkých úhlech dopadu částice jsou viditelné drobné rýhy a do určité míry dochází k interkrystalickému lomu. Naproti tomu interkrystalické lomy jsou převládajícím mechanismem odstraňování materiálu při dopadu částice pod velkým úhlem. I zde se nachází stopy plastické deformace, avšak v mnohem menší míře než při nízkých úhlech dopadu [3]. Mechanismus dopadu abrazivní částice na tvárné i křehké materiály při nízkých i vysokých úhlech dopadu je zobrazen na obrázku 13.

Obr. 13 Interakce abrazivní částice s tvárným nebo křehkým materiálem obrobku [22]



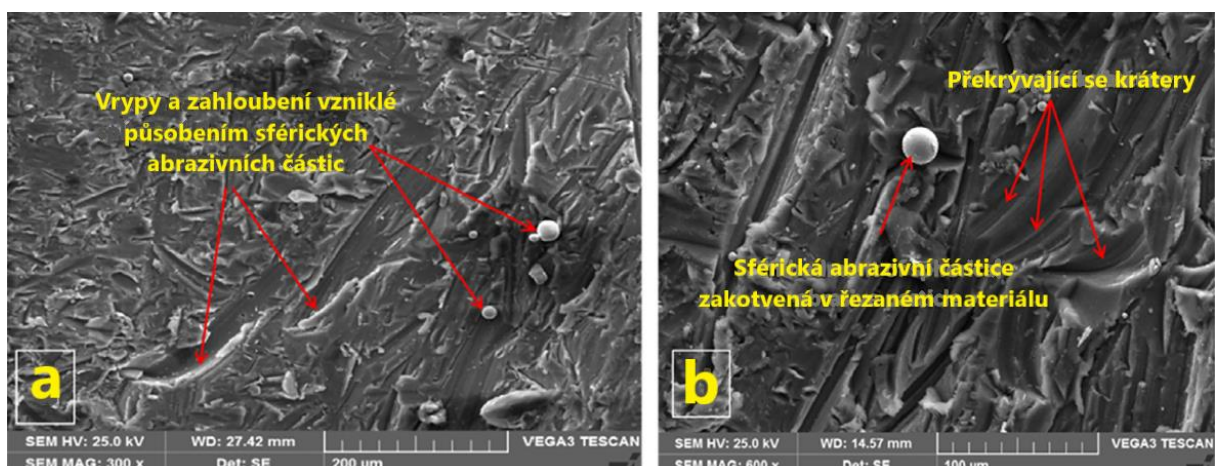
Na obrázku 14 je vyobrazen mikromechanismus úběru materiálu na reálném tvárném materiálu. Snímky byly pořízeny pomocí elektronové mikroskopie. Na snímku 14 (a) jsou vidět rýhy vzniklé řezáním ostrých hran abrazivních částic do materiálu. Rýhy jsou vytvářeny nárazem hrubých abrazivních částic do materiálu obrobku a jsou náhodně orientovány kvůli rozptylu brusiva ve vodním paprsku. Na snímku 14 (b) je vidět plastická vrstva, která vzniká efektem plastického vytlačení materiálu. Plastická vrstva se často vytváří na konci rýhy v důsledku neúplného odstranění tvárného řezaného materiálu. Plastické vytlačení je způsobeno nárazem osamoceného brusného zrna do obráběného materiálu.

Obr. 14 Mechanismus úběru tvárného materiálu při obrábění metodou AWJ [22]



Pokud při obrábění metodou AWJ použijeme abrazivní částice sférického tvaru, můžeme na obrobeném povrchu pozorovat vrypy a zahloubení oblého tvaru způsobené vlivem abrazivního opotřebení. Vzhled povrchu po působení sférických abrazivních částic je zobrazen na obrázku 15.

Obr. 15 Působení sférických abrazivních částic na povrch tvárného materiálu [22]



4 Povrchové úpravy

Povrchové úpravy patří k důležitým strojírenským technologiím. Jejich význam spočívá v ošetření materiálů za účelem dosažení požadovaných vlastností a stavů, které tyto materiály nemají a jsou potřebné pro jejich optimální a dlouhodobou funkci. Mezi tyto vlastnosti můžeme zařadit ochranu před mechanickým poškozením, před povětrnostními vlivy a dále dosažení technických vlastností, kterými jsou odolnost proti korozi, zvýšené teplotě, chemikáliím a otěru. Ochrana proti korozi patří k nejdůležitějším úkolům oboru povrchových úprav. V neposlední řadě je úkolem tohoto oboru zlepšit vizuální vzhled součástí z důvodu neustále rostoucích požadavků na design výrobku. Povrchová úprava proto musí zajistit jednak splnění funkčních parametrů a zároveň musí splňovat také estetické požadavky [24].

S rostoucím uplatňováním nové techniky a technologie vzniká rozpor mezi nároky na nové výrobky a dostupnými zdroji materiálu i energie. V této souvislosti moderní technologie úprav povrchu hrají významnou roli při úspoře nákladů. Hodnota kvalitní povrchové ochrany strojírenského výrobku představuje 5 až 20 % celkových nákladů na jeho výrobu. Ekonomické důsledky nekvalitní povrchové úpravy pak ohrožují celkovou hodnotu výrobku [24].

4.1 Vývoj povrchových úprav

Cíle povrchových úprav jsou v souladu s požadavky z výroby a udržitelného rozvoje strojírenství i ostatních výrobních oborů. Zaváděním nových technologií a provozů i rekonstrukcemi a certifikacemi stávajících pracovišť povrchových úprav, postupně dochází ke značným kvalitativním změnám oboru povrchových úprav, které nabývají širšího rozsahu a významně zasahují do všech oborů lidské činnosti [25].

Dlouhodobé cíle povrchových úprav:

- Zvyšování provozní spolehlivosti a životnosti povrchových úprav.
- Zvyšování technických parametrů povrchových úprav.
- Snižování výrobních nákladů, hlavně úsporami energií a materiálů.
- Zavádění automatizace a robotizace do výroby.
- Omezení znečištění životního prostředí [26].

Nejde již jen o ochranu povrchů, ale o nové technologie, materiály a vlastnosti povrchů, které pro svůj další rozvoj vyžaduje strojírenství, elektrotechnika, stavebnictví, energetika, ale i zcela nové obory mikrotechniky, biomedicíny, nanotechnologií a elektroniky. Aplikací povrchových úprav dochází k efektivnějšímu využívání materiálů, snižování energetické náročnosti a snižování celkových nákladů. Výrazný rozvoj zaznamenávají úpravy povrchů na principu plazmy, vakua, laseru a nanomateriálů [25].

Pozadu nezůstávají ani technologie funkčních povlaků a vrstev. Objevují se povlaky se zcela novými vlastnostmi, s vysokými parametry kvality, dlouhou životností, ořezuvzdorné povlaky, povlaky samomazné s tichým chodem a bezúdržbovým provozem, žáruvzdorné povlaky odolávající extrémním teplotám při vysokém stupni bezpečnosti, povlaky zabraňující vzniku zápalné jiskry, povrchy s elektrickými a magnetickými parametry pro zpracování a uchování informací apod. [25].

4.2 Organické povlaky z nátěrových hmot

Jedním ze způsobů, jak ochránit povrch materiálu a tím zvýšit jeho životnost, je ochrana organickými povlaky na bázi nátěrových hmot. Ochrana materiálu nátěrem je nejběžnější a ekonomicky nejvhodnější způsob ochrany výrobků před působením vnějších vlivů [24]. Ochranný účinek organických povlaků je založen především na bariérovém principu. V některých případech je bariérový účinek omezený vlivem malé tloušťky ochranné vrstvy, a proto je doplňován inhibičním působením látek obsažených v povlaku [26].

Organické nátěrové hmoty patří mezi nejstarší, nejběžnější a stále nejekonomičtější prostředky ve všech průmyslových oborech. Tvoří 80 až 90 % všech povlaků, což je způsobeno poměrně vysokým ochranným účinkem nátěrových systémů, ale i snadností a dostupností způsobů vytváření těchto povlaků. Aplikace nevyžaduje složitá a komplikovaná zařízení, není omezená tvarem a velikostí výrobku. Nátěry jsou poměrně dobře opravitelné. Hlavním důvodem použití nátěrových hmot je ochranný účinek, důležité jsou však i další specifické účely jako dekorativní, signální, maskovací, fungicidní, elektrovedivý a jiné [26].

Nátěr lze definovat jako souvislý povlak požadovaných vlastností, který vznikne nanesením a zaschnutím jedné nebo několika nátěrových vrstev na upravovaném povrchu. Podle počtu nanesených vrstev se rozeznávají nátěry jedno a vícevrstevné, které se dělí do skupin podle vlastností a účelu, vzhledu a pořadí v nátěrovém systému [27].

Nátěrovými hmotami rozumíme výrobky k provádění nátěrů. Jde o organické látky, které jsou nanášeny v tekutém nebo těstovitém stavu a na povrchu předmětu vytvoří souvislý film požadovaných vlastností. Vedle nátěrových hmot se pro zhotovení organických povlaků používají i práškové makromolekulární látky. V souvislosti s tím se používají termíny jako práškové nátěrové hmoty a práškové plasty [26].

4.2.1 Složení nátěrových hmot

Organické povlaky jsou komplexní směsi, které lze rozdělit na čtyři hlavní kategorie: filmotvorné složky, pigmenty, plnidla a těkavé složky.

Filmotvorné složky

Filmotvorné složky jsou převážně netěkavé organické látky, které mohou po zaschnutí vytvářet tuhý souvislý film různé tloušťky. Vlastnosti filmotvorných látek mají rozhodující vliv na ochrannou účinnost a životnost nátěrů. Jejich chemické složení určuje, zda nátěr bude odolávat kyselinám, hydroxidům nebo povětrnostním vlivům a dále určuje chemickou a fyzikální přilnavost nátěru. Mezi filmotvorné látky zařazujeme například vysýchavé oleje, přírodní pryskyřice, deriváty celulózy a další. Do filmotvorných látek zařazujeme též **změkčovadla**. Jedná se o látky, které samotné nezasychají a nevytváří tuhý film. Jejich funkcí je upravit příliš vysokou křehkost a tvrdost tak, aby nátěry získaly požadovanou vláčnost a pružnost [26].

Pigmenty

Pigmenty jsou jemně rozptýlené nerozpustné pevné částice, jejichž rozměry se pohybují v řádech mikrometrů až nanometrů. Jsou dispergovány v nátěrové hmotě a jejich primárním účelem je zajistit neprůhlednost a zbarvení nátěrového filmu. Nejčastěji jde o oxidy nebo soli kovů. Pigmenty mohou navíc poskytovat další funkce, například inhibiční pigmenty zlepšují vlastnosti povlaků chránících proti korozi. Pigmenty také hrají hlavní roli v aplikačních vlastnostech a mechanickém chování povlaků. Při volbě pigmentů se vychází ze znalostí korozního prostředí, vlastností pigmentů a požadované životnosti nátěrů [27].

Plnidla

Plnidla jsou obvykle jemně rozemleté minerální látky nerozpustné v pojivech, které vhodně upravují technologické vlastnosti nátěrových hmot (např. zabraňují smrštění filmu po zaschnutí). Jako plnidla se často používají křída, těživec mastek a další [26].

Rozpouštědla

Jde o těkavé látky, v nichž jsou filmotvorné látky rozpuštěny. Hrají hlavní roli při míchání a nanášení povlaků. Jejich cílem je upravit viskozitu (konzistenci) nátěrové hmoty. Díky jejich přítomnosti je nanášený materiál dostatečně tekutý pro aplikaci. Během aplikace i po ní dochází k jejich odpařování, protože je nežádoucí, aby zbytky těkavých složek zůstaly v nátěrovém povlaku. Jejich přítomnost v nátěrech značně zhoršuje jejich odolnost zejména proti kapalnému agresivnímu prostředí. Nejběžnějšími rozpouštědly jsou lehký benzín, toluen, benzen atd. [27].

4.2.2 Polyuretanové laky

Polyuretanové nátěry jsou polymerní látky, které vznikají polyadiční reakcí vícefunkčních izokyanátů s látkami obsahujícími aktivní vodík. Mohou být jednosložkové nebo dvousložkové [27].

Vytvrzení jednosložkových polyuretanových nátěrů probíhá za působení vzdušné vlhkosti. Volné izokyanátové skupiny reagují s molekulami vody, které jsou obsaženy ve vzduchu a tím se nátěr vytvrdí [27].

Dvousložkové polyuretanové nátěry se připravují smícháním dvou složek, které spolu začnou reagovat. První složkou jsou izokyanáty, které obsahují aktivní skupinu $-N=C=O$. Druhá složka (tvrdidlo) obsahuje aktivní vodík. Po smíchání obou složek dochází k vzájemné reakci s aktivní skupinou ze složky první. Vzájemná reakce vede k tvorbě chemicky zesíťovaného nátěrového filmu [27]. Polyuretanové nátěry se vyznačují dobrou adhezí k základnímu materiálu, dobrou odolností vůči vodě, trvalou elasticitou, vysokou odolností vůči oděru, odolností proti rozpouštědlům a dobrými elektroizolačními vlastnostmi. Lze je využít nejen jako laky, ale i jako lepidla, elastomery nebo lehčené hmoty [28].

4.2.3 Akrylátové laky

Akrylátové laky patří do skupiny syntetických nátěrových hmot. Vynikají svojí mimořádnou odolností proti povětrnostním vlivům, výborným leskem, dobrými mechanickými vlastnostmi a chemickou odolností. Díky tomu jsou využívány k povrchovým úpravám v automobilovém průmyslu.

Akrylátové nátěry jsou disperze polyakrylátových polymerů, které jsou založené na reakci kyseliny akrylové a jejich derivátů. Velmi často se využívají jako pojiva vodou ředitelných nátěrových hmot. U vodou ředitelných nátěrových hmot se místo organických rozpouštědel používá voda. Díky tomu se řadí mezi moderní a ekologické nátěrové hmoty, jelikož mají snížený obsah těkavých organických látek, což způsobuje menší hořlavost a menší zátěž pro životní prostředí. Akrylátové laky navíc nereagují s pigmenty, což umožňuje jejich snadné rozptýlení a změnu zabarvení nátěrového filmu. Tvrdost nátěrového filmu, propustnost pro vodu a fyzikálně-mechanické vlastnosti závisí na použití různých typů kopolymerů kyseliny akrylové a methakrylové [27].

4.3 Povrchové úpravy plastů

Povrchové úpravy plastových součástí se těší čím dál větší oblibě v mnoha odvětvích, která zpracovávají polymerní látky. Plastové výrobky vynikají svojí nízkou hmotností, houževnatostí, dostatečnou pevností a také zpravidla nepřilíš vysokou cenou. Pokud se navíc ošetří povrchovou úpravou, dojde ke zdokonalení vzhledu a jiných užitečných vlastností. Takto ošetřený plast často působí na zákazníka lépe, jelikož v něm vzbuzuje dojem vyšší kvality a celkově lepších vlastností. Význam a použití plastů v praxi se stále zvyšuje. Těžké a nákladné kovy jsou jimi nahrazeny téměř všude, kde je to možné. S pokračujícím vývojem se však

ukázala potřeba kombinovat to nejlepší ze všech dostupných materiálů, ať už uvažujeme anorganické či organické látky nebo kovy [29].

V praxi nachází největší uplatnění termoplasty, např. akrylnitril-butadien-styren (ABS), polyamid (PA), polymethylmetakrylát (PMMA), polyetylen (PE), polypropylen (PP), polystyren (PS) a polyvinylchlorid (PVC) [30].

4.3.1 Předúpravy plastových povrchů

Pro dosažení dlouhé životnosti výrobku je nutná dobrá přilnavost mezi povlakem nebo nátěrem a polymerní látkou. Jednou z podmínek pro dobrou přilnavost povlaku je smáčivost povrchu, která je dána rozdílem mezi povrchovým napětím tekutého povlaku a povrchovou energií pevné plastické hmoty. Plasty jsou ze své podstaty hydrofobní materiály s nízkou povrchovou energií, a proto dobře nepřilnou k ostatním materiálům, které s nimi přicházejí do styku. Z tohoto důvodu musí být dodržena podmínka, že povrchové napětí povlaku musí být nižší než kritické povrchové napětí plastového materiálu [29].

Jednotlivé polymery vykazují různou hodnotu kritického povrchového napětí. V případě, kdy má plast kritické povrchové napětí příliš nízké pro dosažení požadované smáčivosti a přilnavosti, je nutné jej zvýšit prostřednictvím vhodných předúprav. Obecně modifikace povrchu spočívá v zavedení funkčních skupin s vysokou vazebnou schopností na povrch plastu, aby se vytvořily interakce a vazby s jinými funkčními skupinami. Rozlišujeme následující metody:

- omývání, čištění a leptání
- broušení
- nastříkávání
- úprava plamenem
- korónový výboj
- úprava plazmou [31].

Omývání, čištění a leptání

K odstranění povrchových nečistot před vlastním povlakováním se využívá omývání vodou se zásaditými čistícími prostředky pro odstranění běžných nečistot. Naopak pro vodou nerozpustná znečištění (látky sloužící k uvolnění plastového výrobku z odlévací formy) se využívá roztoku uhlovodíkových rozpouštědel [29].

Jako velmi efektivní metoda čištění povrchu se jeví odmašťování výpary. Objekt se umístí do uzavřeného prostoru s parami, ty následně kondenzují na chladnějším povrchu plastu a při stékání odplavují rozpuštěné nečistoty. K zastavení procesu dojde poté, co teplota povrchu

plastu dosáhne teploty bodu varu rozpouštědla. Rozpouštědlo se dostane na povrch zcela čisté, což je hlavní výhoda této metody [29].

Leptání povrchů spočívá v působení roztoků reaktivních chemických sloučenin, zpravidla oxidačních činidel, na plastový povrch. Jejich působením dochází ke změně chemické struktury povrchu, ke zdrsnění a vytvoření dutinek, čímž vznikne základ pro následné vrstvy. Pro různé plasty se používají různé mořící lázně, např. kys. fluorovodíková nebo směs kys. sírové a oxidu chromového. Výsledkem je zlepšení přilnavosti a smáčivosti [30].

Broušení

Vlivem broušení, případně pískování povrchu plastu dochází k odstranění hrubých nečistot a zároveň k narušení a zdrsnění povrchu, což přispívá ke zlepšení přilnavosti [26].

Nastříkávání

Proces nastříkávání spočívá v nanášení tenké vrstvy polymeru rozdílného složení oproti základnímu materiálu. Polymer se nanáší jako mezivrstva mezi plastový povrch a barvu, případně jiný povlak a zlepšuje adhezi a smáčivost následné vrstvy [31].

Úprava plamenem

Úprava povrchu plamenem společně s korónovým výbojem patří k nejpoužívanějším technikám pro aktivaci povrchu plastu v průmyslových procesech. Zpracování povrchu plamenem se používá hlavně pro úpravu polyolefinových materiálů, které tvoří části karoserie automobilů. Nejčastěji používanými plyny při zpracování plamenem jsou propan, zemní plyn a butan. Tyto plyny nejčastěji hoří s atmosférickým kyslíkem za vzniku vody a oxidu uhličitého. K aktivaci povrchu dochází působením oxidačního plamenu o teplotě v rozmezí 1090 až 2760 °C, který je v kontaktu s ošetřovanou plochou pouze na zlomek sekundy. Tím je dosaženo potřebné oxidace, aniž by došlo k poškození povrchu nebo k případným nežádoucím změnám [31].

Korónový výboj

Úprava korónou je nejběžněji používanou metodou aktivace povrchu v průmyslu zpracovávajícím plastové fólie. Zařízení, které produkuje korónové výboje, se skládá z generátoru, transformátoru a výbojové hlavy. Úkolem generátoru je zvýšit frekvenci střídavého proudu z 60 Hz na hodnoty frekvence 25 až 30 kHz. Transformátor slouží ke zvýšení napětí na 15 až 30 kV, které jsou nutné k vytvoření korónového výboje, který se skládá z velkého množství rovnoměrně rozptýlených miniaturních jisker. Výbojovou hlavu tvoří kondenzátor, který se skládá ze dvou desek (elektrod), mezi kterými je umístěn plastový materiál. V závislosti na konstrukci se uspořádání jednotlivých částí hlavy liší. Nejčastějším konstrukčním řešením je válec pokrytý dielektrikem a nekryté elektrody [31].

Vlivem působení elektronů, protonů, excitovaných atomů a iontů, které jsou obsaženy v korónovém výboji, dochází k rozrušování uhlíkových a uhlovodíkových vazeb na plastovém povrchu. To má za následek rychlé vytváření vazeb nových. Dochází k reakci radikálů s kyslíkem a dusíkem obsaženým ve vzduchu a k utváření polárních skupin na povrchu [31].

Úprava plazmou

Úprava povrchů nízkoteplotní plazmou je všestranná technika, která se stále více používá k aktivaci povrchu plastů. Při ošetření povrchu plazmou dochází k upravení pouze tenké vrstvy na povrchu materiálu. Ošetření plazmou má několik významných výhod ve srovnání s tradičními technikami mokré chemie. Plazmovým zpracováním je upravena pouze tenká povrchová vrstva. Díky tomu je dosaženo požadovaných vlastností povrchu a zároveň nedojde k ovlivnění celého materiálu. Po úpravě povrchu plazmou je dosaženo lepších charakteristik povrchu ve srovnání s úpravou povrchu „mokrou chemickou cestou.“ Navíc je plazmové zpracování suchou a ekologickou technikou, která nevyžaduje velkou zásobu vody, ohřev ani sušení [31].

Plazma je ionizovaný plyn, který je elektricky neutrální a obsahuje značný počet elektricky nabitých částic jako jsou elektrony, ionty, atomy, radikály, excitované stavy a fotony různých vlnových délek. Při úpravě plazmou dojde k rozrušení mikroskopické struktury povrchu, k očištění od oxidů a organických látek a následně plazma způsobí zesílení struktury a aktivuje povrch díky reakci plynů plazmy s plastem [31].

4.3.2 Lakování plastů

Při lakování plastů dochází k vytvoření tenkého organického povlaku na povrchu plastového dílu. Po následném zaschnutí vytváří nanosená hmota pevnou povrchovou vrstvu tzv. film. Zasychání může probíhat dvěma způsoby. Při zasychání fyzikální cestou dojde k odpaření rozpouštědla a tím je lak vytvrzen (jednosložkové laky). Naopak při vytvrzování chemickou cestou (např. polymerací) dojde vlivem reakce báze s tvrdidlem k vytváření řetězců a k následnému vytvrzení nanosené hmoty. Oba způsoby vytvrzování se často kombinují [32].

K lakování polymerů se v současné době nejvíce používají vodou ředitelné laky, u kterých je však potřeba vyšší teploty k odpaření vody v porovnání s organickými rozpouštědly. Je tedy třeba dodatečné energie ve formě ohřívání v odvětrávacích zónách, aby došlo k odpaření vody z nanoseného filmu laku [32].

4.3.3 Pokovování plastů

Při pokovování je na povrchu plastu nanášena vrstva kovu za účelem kombinace výhod plastů a kovů. Při tomto procesu dojde ke změnám mnoha vlastností plastového dílu. Zlepší se

mechanické vlastnosti, zmenší se propustnost kapalin a plynů, zvětší se odolnost proti chemikáliím, zlepši se tvarová stálost při působení zvýšené teploty a omezí se stárnutí plastu. Pokovení plastů nachází své uplatnění v automobilovém průmyslu, v elektronice a elektrotechnice, v nábytkářském průmyslu, ve šperkařství a hodinářství i v dalších oborech [30].

Chemické pokovování

Při tomto procesu dochází k vyloučení tenké vrstvy kovu (nejčastěji mědi nebo niklu) z roztoku soli daného kovu. Do roztoku se obvykle přidávají redukční činidla, která usnadňují chemickou reakci mezi povrchem a ionty kovu. Výhodou chemického pokovení je vytvoření vrstvy o stejné tloušťce (v rozmezí 40 nm až několik μm). Takto vytvořená vrstva je buď konečnou vrstvou nebo může být použita jako podklad pro galvanické pokovování [30].

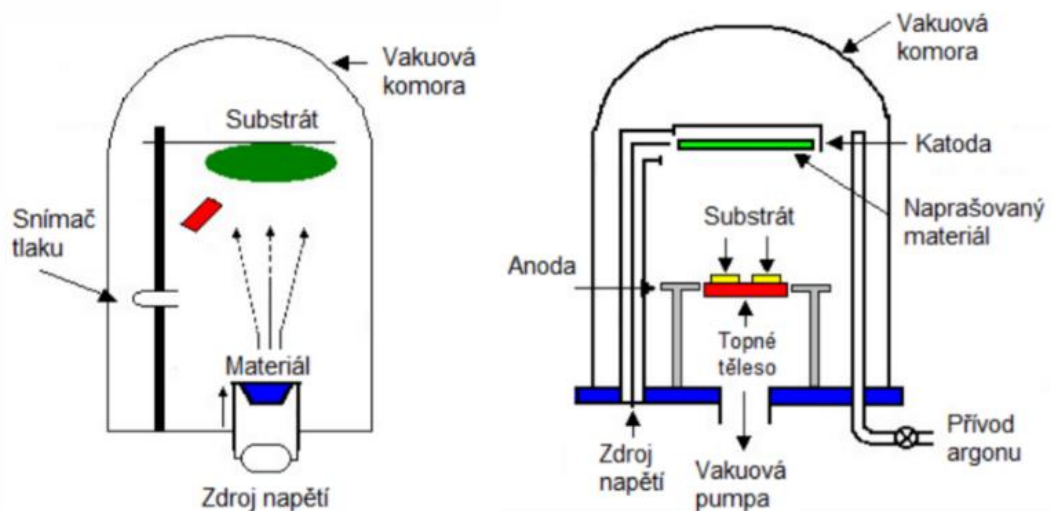
Galvanické pokovování

Galvanické pokovení probíhá za přítomnosti stejnosměrného proudu. Vrstva může být tvořena pouze jedním kovem nebo několika různými vrstvami. Tloušťka vrstvy se pohybuje kolem 25–35 μm . Nevýhodou procesu je vznik vrstvy o nestejné tloušťce (větší nárůst vrstvy na hranách). Galvanicky se nanášejí vrstvy chromu, niklu, zlata nebo mědi [30].

Fyzikální pokovování

Při fyzikálním pokovování se požadovaný kov napařuje nebo napařuje na plast. Napařování probíhá za tlaků 10^{-3} Pa a za teplot, při kterých dochází k natavení požadovaného kovu. Napařování probíhá v reaktivní atmosféře za tlaků 0,1-10 Pa. Nejčastějším kovem, který se na kov napařuje nebo napařuje, je hliník. Princip napařování a napařování kovů na plast je zobrazen na obrázku 16. Výhodou procesu je sloučení aktivace a metalizace do jednoho kroku. Nevýhodou jsou vysoké investice a časová náročnost procesu (nutnost vytvoření vakua) [30].

Obr. 16 Napařování (vlevo) a napařování (vpravo) kovů na plast [30]



5 Cíl práce

Cílem diplomové práce je shromáždit a analyzovat aktuální poznatky o problematice technologie řezání materiálů čistým a abrazivním vodním vysokotlakým paprskem z literárních a internetových pramenů. Následně těchto poznatků využít při tvorbě vlastního experimentu spočívajícího v dělení polymerních materiálů s povrchovou úpravou vysokotlakým paprskem.

Cílem experimentální části je zajistit vzorky polymerních materiálů a následně na jejich povrchu vytvořit povrchovou úpravu z různých druhů organických nátěrových hmot. Na takto připravených zkušebních vzorcích následně pomocí CNC řezacího stroje vytvořit zkušební řezné spáry s proměnlivým nastavením posuvu řezné hlavy a typu vodního paprsku. Takto vytvořené zkušební spáry zkoumat pod stereoskopickým mikroskopem s cílem stanovit šířku řezné spáry, úhel zkosení řezné spáry a vliv proměnlivých parametrů vodního paprsku na nanesenou povrchovou úpravu.

6 Metodika práce

Tato kapitola se zabývá materiály, vytvářením povrchové úpravy a experimentálními metodami, které byly použity k dosažení stanovených cílů. Je zde uveden popis přípravy vzorků, popis zkušebního zařízení a nastavení jeho parametrů. Dále je zde uvedena metodika zkoušek vlastností řezaného materiálu a vyhodnocení naměřených dat. Provedené experimenty byly zaměřeny na obrábění plastových materiálů s povrchovou úpravou metodou čistého vodního paprsku a abrazivního vodního paprsku s cílem zhodnotit kvalitu plochy řezu a chování povrchové úpravy.

Pro vlastní experimentální část bylo použito pět vzorků ze tří druhů materiálů, na kterých byly nanесeny vrstvy akrylátového nebo polyuretanového laku. Zkoumané materiály byly nejdříve opracovány na zkušební vzorky o rozměrech 210 x 150 x 4 mm. Následně došlo k mechanické předúpravě jejich povrchu, aktivaci a nanесení dvou druhů organických nátěrových hmot.

6.1 Charakteristika vzorků

Pro experimentální část byly zvoleny následující zkušební materiály:

- neměkčený polyvinylchlorid (PVC-U) – tloušťka 4 mm
- polypropylen (PP) – tloušťka 4 mm
- polyoxymethylen (POM-H) – tloušťka 4 mm.

Neměkčený polyvinylchlorid (PVC-U)

Polyvinylchlorid se vyrábí polymerací vinylchloridu a od většiny běžných plastů se liší obsahem chlóru. V našem případě jde o neměkčený termoplast, který vyniká svojí mechanickou odolností, inertností, nenasákavostí, tvarovou stálostí, nízkou hořlavostí a chemickou i povětrnostní odolností. Jeho hustota je 1440 kg/m³ a teplota tání je 75 °C. Materiál je vhodný pro řezání, třískové obrábění, svařování i lepení. Napětí na mezi kluzu dosahuje hodnoty 55 MPa, modul pružnosti v tahu dosahuje hodnoty 3200 MPa [33].

Polypropylen (PP)

Polypropylen je termoplastický polymer ze skupiny polyolefinů. Vzniká polymerací propenu. Tento termoplast s hustotou 900 kg/m³ a teplotou tání nad 160 °C vyniká mechanickou, dielektrickou a chemickou odolností. Jeho nevýhodou je křehnutí na světle. Je dobře opracovatelný na obráběcích strojích za pomoci čistých a ostrých nástrojů, nejlépe z rychlořezné oceli. Polypropylen je rovněž dobře tvarovatelný, svařovatelný i lepitelný plast.

Jeho napětí na mezi kluzu dosahuje hodnoty 33 MPa, modul pružnosti v tahu nabývá hodnoty 1450 MPa [33].

Polyoxymethylen (POM-H)

Polyoxymethylen H, známý také jako ertacetal H, je homopolymer polyacetálů, jeho základní struktura vzniká polymerací formaldehydu. Tento polymer je vysoce krystalický a houževnatý. I v nevyztuženém stavu patří mezi plasty s největší tuhostí a pevností. Jeho hustota je 1420 kg/m³ a teplota tání je 175 °C. Vyniká vysokou mechanickou pevností, tuhostí, odolností proti otěru a tečení a nízkou tepelnou roztažností. Ertacetal se velmi dobře obrábí na mechanických soustruzích a je vhodný pro výrobu přesných mechanických součástí. Napětí na mezi kluzu dosahuje hodnoty 75 MPa, modul pružnosti v tahu nabývá hodnoty 3200 MPa [33].

6.2 Povrchová úprava vzorků

Vzorky polymerů byly nejdříve nařezány pásovou pilou z tabule na požadované rozměry (210 x 150 mm). Následně byl povrch vzorků obroušen excentrickou bruskou s brusnými kotouči o hrubosti P400 a P800. Krok broušení byl proveden za účelem odstranění hrubých nečistot a zároveň k narušení a zdrsnění povrchu materiálu, což přispívá ke zlepšení přilnavosti následných vrstev. Poté byl povrch očištěn čističem silikonů, který má za úkol odstranit z povrchu mastnotu a jiné chemikálie, které by bránily nanesení a zakotvení dalších vrstev. V dalším kroku byl na povrch vzorků nanesen základ na plasty. Úkolem základu na plasty je naleptat povrch plastu a vytvořit mezivrstvu, která zlepší adhezi a smáčivost následně nanášených nátěrů. Po odvětrání základu na plasty bylo přikročeno k nanesení samotného organického povlaku. Povlaky byly nanесeny technologií pneumatického stříkání. Po nanesení dvou vrstev, které po sobě následovaly v rozmezí 15 minut, následovalo vytvrzení nátěru při teplotě 20 °C po dobu 24 hodin. Pro nástřik byly zvoleny dva druhy nátěrových hmot.

Polyuretanový nátěr Poluran 790, odstín RAL 9006

Jedná se o vysoce lesklý polyuretanový vrchní email s vysokým obsahem sušiny na bázi hydroxyakrylátů a alifatických isokyanátů. Komponenty báze a tužidla byly smíchány v poměru 3:1 a naředěny 10 % ředidla podle doporučení výrobce nátěru. Následně byl zhotoven nástřik ve dvou vrstvách pomocí HVLP stříkací pistole při teplotě 20 °C.

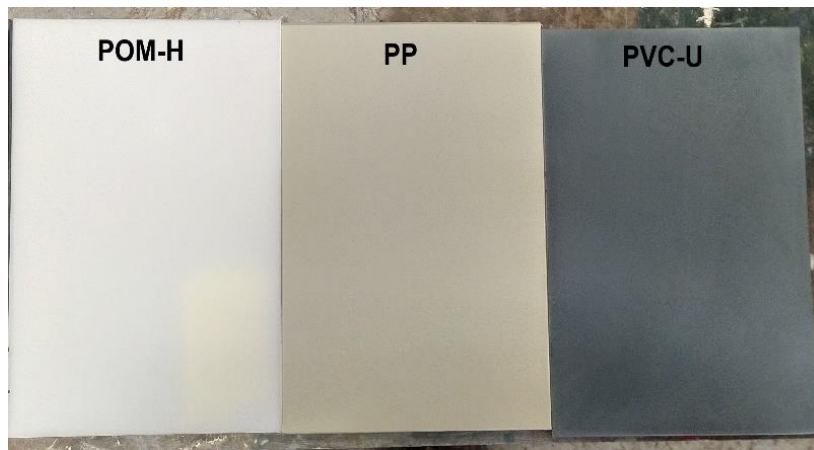
Akrylátový nátěr Mobihel Chromind 2K, odstín RAL 9005

Jedná se o vysoce lesklý akrylátový autolak vyrobený z akrylátových živic, pigmentů, rozpouštědel a pomocných látek. Výrobky se vyznačují vysokou chemickou a mechanickou odolností. Báze a tužidlo byly smíchány v poměru 2:1 a naředěny 10 % akrylátového ředidla

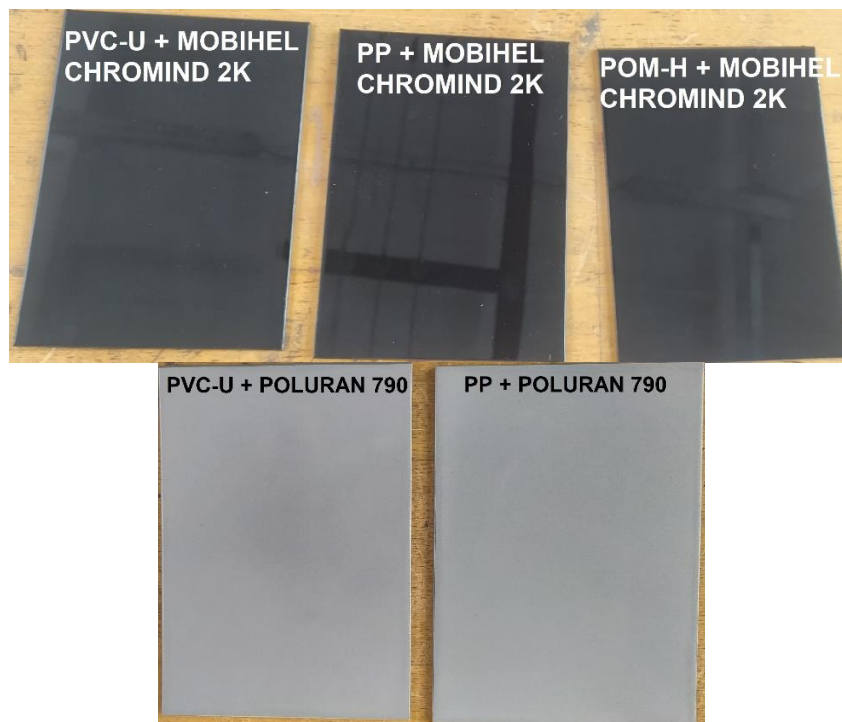
podle doporučení výrobce nátěru. Následně byl zhotoven nástřik ve dvou vrstvách pomocí HVLP stříkací pistole při teplotě 20 °C.

Vzorky před povrchovou úpravou jsou zobrazeny na obrázku 17. Vzorky po povrchové úpravě jsou zobrazeny na obrázku 18. Na první vzorek materiálu PVC-U byl nanesen nátěr Poluran 790 v odstínu RAL 9006, Na druhý vzorek materiálu PVC-U byl nanesen nátěr Mobihel Chromind 2K v odstínu RAL 9005. Na první vzorek materiálu PP byl nanesen nátěr Poluran 790 v odstínu RAL 9006, na druhý vzorek materiálu PP byl nanesen nátěr Mobihel Chromind 2K v odstínu RAL 9005. Na zkušební materiál POM-H byl nanesen pouze akrylátový nátěr Mobihel Chromind 2K RAL 9005, protože nátěr Poluran 790 v odstínu 9006 nevytvářel se základním materiálem dostatečný barevný kontrast.

Obr. 17 Vzorky plastů před povrchovou úpravou [Zdroj: vlastní]



Obr. 18 Vzorky plastů po povrchové úpravě organickými nátěry [Zdroj: vlastní]



6.3 Řezání vzorků technologií vodního paprsku

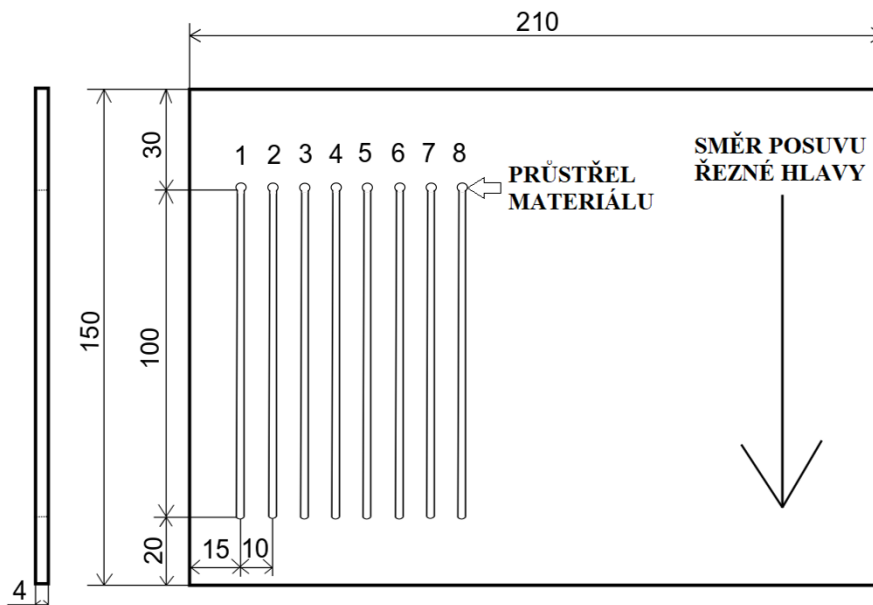
Dalším krokem bylo nařezání povrchově upravených vzorků plastů vodním paprskem. Dělení materiálu probíhalo na zařízení AWAC CNC AWJ CT 0806 (obrázek 19). Na každém zkušebním vzorku bylo provedeno 8 řezů. Byly využity dva typy vodního paprsku. Jedním z nich byl čistý vodní paprsek WJM (bez přidaného abraziva), druhým byl abrazivní vodní paprsek AWJ. Jako abrazivo přidané do vodního paprsku byl použit australský granát GARNET MESH 80, který je doporučený výrobcem zařízení. Do vodního paprsku bylo abrazivo dávkováno zařízením Bimba Flat s intenzitou $439 \pm 70 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$.

Obr. 19 Zařízení pro dělení vodním paprskem AWAC CNC AWJ CT 0806 [Zdroj: vlastní]



Zkušební vzorky byly zhotoveny podle nákresu na obrázku číslo 20.

Obr. 20 Rozměry zkušební vzorku [Zdroj: vlastní]



6.3.1 Technologické parametry zvolené při dělení vodním paprskem

Na experiment byl použit CNC stroj firmy AWAC spol, s.r.o., který je ve vlastnictví katedry Materiálu a strojírenské technologie na Technické fakultě ČZU. Parametry a podmínky experimentu byly stanoveny vedoucím diplomové práce. Proměnné technologické parametry u jednotlivých řezů jsou uvedeny v tabulce 1. Tyto hodnoty byly použity pro všechny vzorky.

Tab. 1 Technologické parametry jednotlivých řezů

Číslo řezu	1	2	3	4	5	6	7	8
Posuv řezné hlavy [mm.min ⁻¹]	50	50	250	250	750	750	1000	1000
Typ paprsku	WJM	AWJ	WJM	AWJ	WJM	AWJ	WJM	AWJ

Následující parametry byly konstantní:

- pracovní tlak vody: 380 MPa
- průměr trysky: 0,8 mm
- vzdálenost trysky nad řezaným materiálem: 3 mm
- úhel trysky nad řezaným materiálem: 90°
- hmotnostní tok abraziva: 439 ± 70 g.min⁻¹
- druh a velikost abraziva: Granát, MESH 80

6.4 Měření šířky řezné spáry

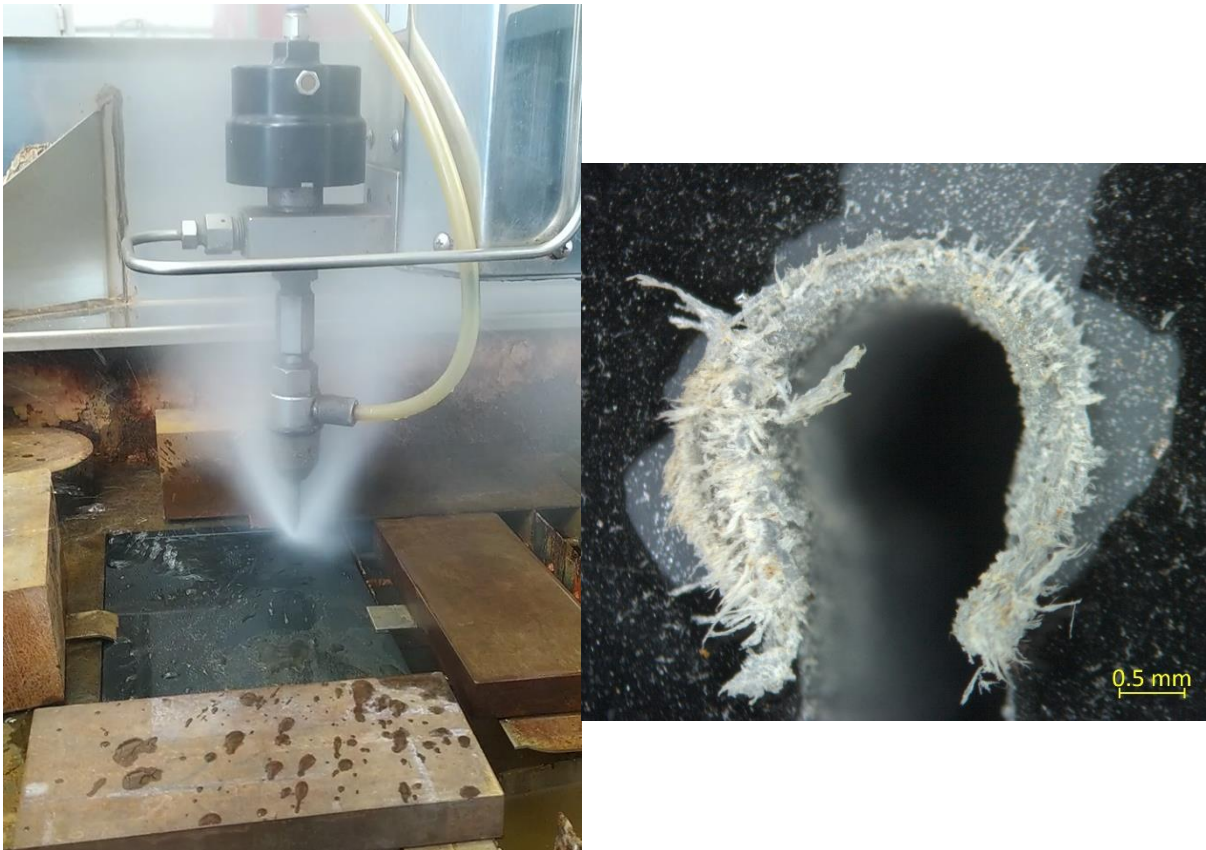
Hodnocení řezné spáry bylo provedeno na vstupu a výstupu vodního paprsku, tzn. na horní a spodní straně materiálu. Měřená oblast vzorku se nacházela přibližně 10 mm od začátku řezu (průstřelu) a 10 mm od konce řezné spáry. Důvodem posunutí začátku a konce měření byla snaha o eliminaci zkreslených výsledků, které by mohly být způsobeny náběhem a doběhem posuvu řezné hlavy, tzn. okamžiku, než řezná hlava dosáhne požadované řezné rychlosti.

Průstřel materiálu

Průstřel materiálu lze charakterizovat jako prvotní fázi, kterou začíná dělení materiálu vodním paprskem. Jedná se o dobu, kdy vodní paprsek působí vysokým tlakem do jednoho bodu materiálu a nedochází k posuvu řezné hlavy. Působením paprsku dochází k delaminaci a pronikání paprsku materiálem, dokud paprsek neprojde skrz řezaný materiál. Teprve poté dojde ke spuštění posuvu řezné hlavy a vytvoření řezné spáry. V našem případě byl posuv řezné hlavy spouštěn po průstřelu manuálně. Při vytváření průstřelu proniká paprsek materiálem, přičemž dochází k odrazu části paprsku zpět a k dalšímu úběru materiálu v okolí paprsku. Při delším

působení paprsku do jednoho místa zároveň dochází k ovlivnění okolí místa řezu vlivem rozptýlených částic kapaliny a abraziva. Plášť tvořený směsí kapek vody a abraziva tvoří obal vodního proudu a působí na okolí místa řezu. Z těchto důvodů se průstřel materiálu vyznačuje větší řeznou spárkou než zbytek řezu, kdy je aktivovaný posuv řezné hlavy. V místě průstřelu také často došlo k oddělení vrstvy povrchové úpravy vlivem vyvolaného napětí od paprsku. Vytváření průstřelu při řezání na CNC řzacím stroji a vzhled průstřelu pod stereoskopickým mikroskopem je zobrazen na obrázku 21.

Obr. 21 Průstřel materiálu [Zdroj: vlastní]



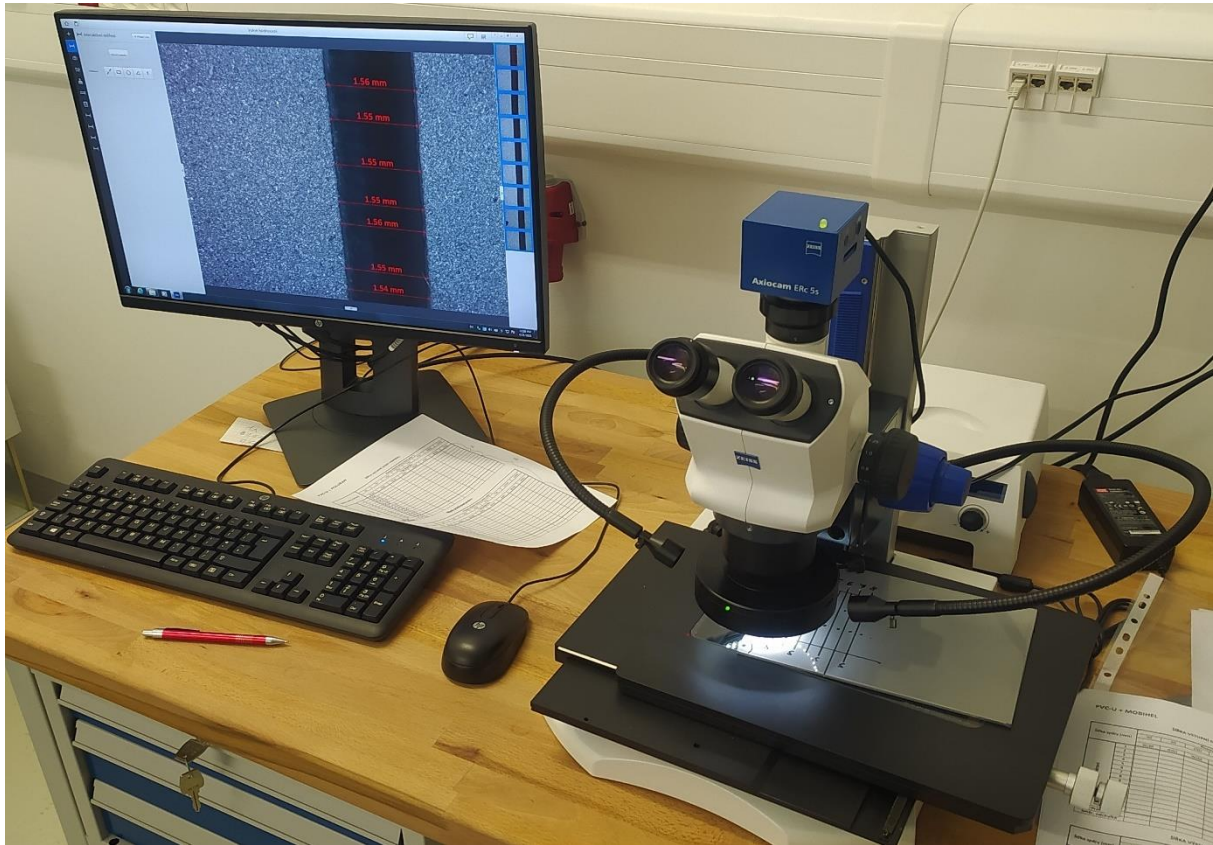
6.4.1 Přístroj a software pro měření řezné spáry

Měření závislosti šířky řezné spáry na rychlosti posuvu řezné hlavy a typu paprsku probíhalo na stereoskopickém mikroskopu Zeiss Stemi 508 (obrázek 22) v laboratořích Technické fakulty. Mikroskop disponuje možností připojení digitální kamery Axiocam, která umožňuje zkoumaný objekt sledovat, vyfotit a pořízený záznam digitálně přenést do sledovacího zařízení v podobě počítače.

Samotné měření pak probíhalo na obrazovce počítače s podporou vyhodnocovacího softwaru od společnosti Zeiss. K měření nasnímané řezné spáry se využívaly softwarové měřicí nástroje, se kterými je možné měřit vzdálenosti, velikosti úhlů nebo celé obvody. Program také umožňuje snímek upravovat nastávaním jasu, sytosti, barev atd. dle požadavků obsluhy za

účelem dosažení optimálních výsledků. Před samotným měřením je nutné mikroskop zkalibrovat pomocí měření etalonového vzorku. Tím je zajištěno, že úsečky vynášené na obrázku za účelem zjištění šířky spáry, jsou ve správném měřítku.

Obr. 22 Stereoskopický mikroskop Zeiss Stemi 508 s kamerou Axiocam [Zdroj: vlastní]



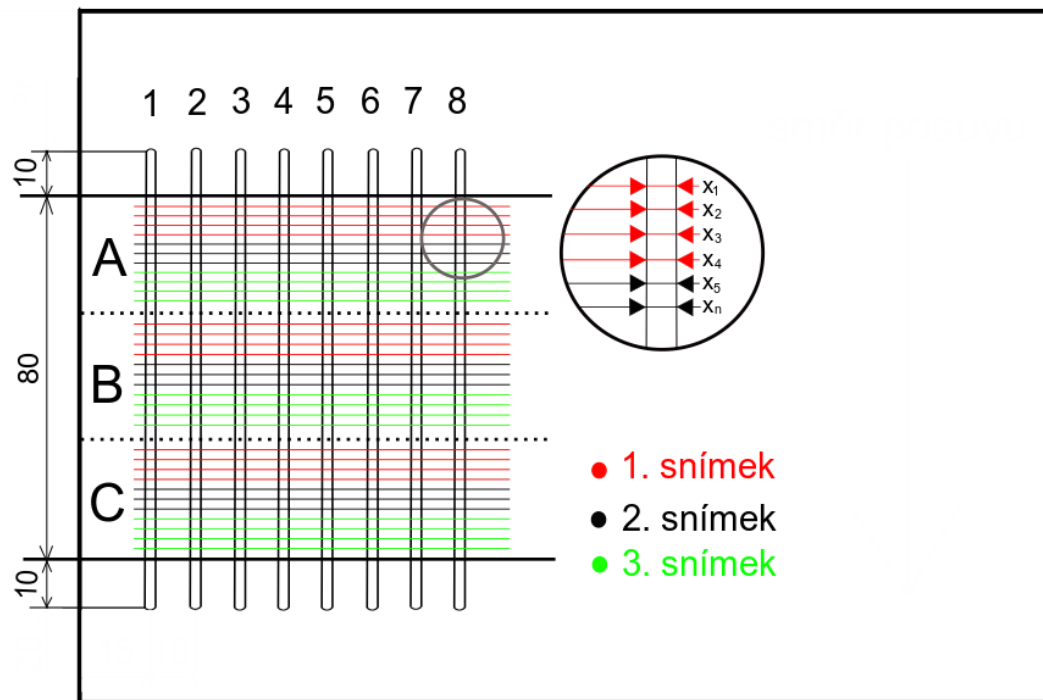
6.4.2 Postup měření šířky řezné spáry

První část experimentu spočívala v měření šířky řezné spáry na vyhotovených zkušebních vzorcích, na nichž byly strojem AWAC nařezány spáry. Pro řezání byl využit konstantní tlak vody o velikosti 380 MPa, vodní paprsek typu WJM nebo AWJ a proměnné rychlosti posuvu řezné hlavy. Kombinace různých typů paprsku a různých rychlostí posuvu vytvářely v materiálu rozdílné šířky spár, jež byly zkoumány. Konkrétní řezné podmínky pro jednotlivé spáry jsou uvedeny v tabulce 1. Měření nejprve probíhalo na straně vstupu vodního paprsku do materiálu a následně na straně výstupu paprsku z materiálu.

Na každém vzorku byla vytyčená pracovní oblast rozdělena na tři části — A, B a C. Vzorky byly následně vkládány pod zkalibrovaný stereoskopický mikroskop pro pečlivý rozbor. Pro každou spáru byly v každé části, A, B i C, vytvořeny tři snímky, celkem tedy 9 snímků pro každou spáru. Na každém snímku byly změřeny 3 až 4 hodnoty. Celkem bylo změřeno 11 hodnot v každé části, tedy 33 hodnot pro jednu měřenou spáru. Pro celý vzorek na straně vstupu

paprsku do materiálu bylo vytvořeno 72 snímků a naměřeno 264 hodnot. Postup měření šířky řezné spáry je zobrazen na obrázku 23.

Obr. 23 Postup měření šířky řezné spáry [Zdroj: vlastní]

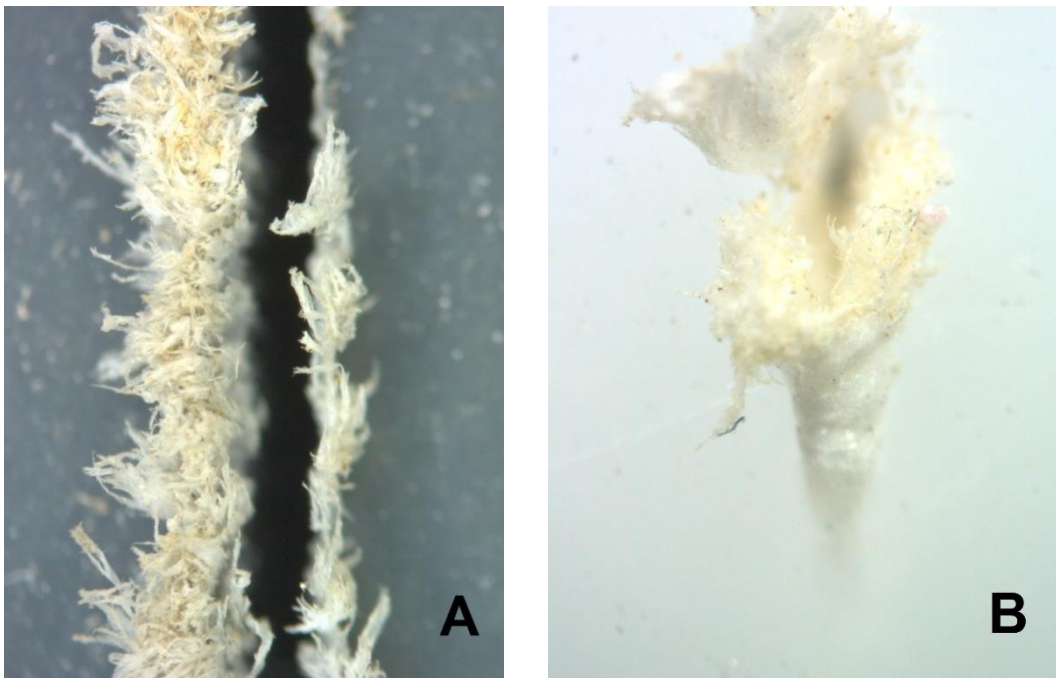


Tímto způsobem byly změřeny všechny spáry na všech vzorcích, celkem tedy 40 spár na straně vstupu paprsku do materiálu a 18 spár na straně výstupu paprsku z materiálu. Naměřené hodnoty byly zaneseny do tabulek a zpracovány pomocí programu Statistica 14. Následně byly hodnoty vyneseny do grafů, které graficky znázorňují závislost šířky spáry na řezných parametrech.

6.4.3 Stanovení úhlu zkosení řezné spáry

Ve druhé části experimentu byl vypočten úhel zkosení řezné spáry na základě naměřených hodnot šířky řezné spáry na vstupu a výstupu paprsku z materiálu pro každou konkrétní spáru. Zde je důležité poznamenat, že na straně výstupu paprsku z obrobku byly změřeny pouze některé spáry, a to ze dvou důvodů. Prvním důvodem bylo, že některé spáry na straně výstupu paprsku z materiálu vykazovaly výrazně nepravidelný tvar, který byl způsobený otřepy řezaného materiálu podél hran spáry (obrázek 24 A). Druhým důvodem bylo neproniknutí paprsku skrz materiál a z toho plynoucí neprořezání materiálu po celé jeho délce a hloubce (obrázek 24 B). Celkově bylo na straně výstupu paprsku z materiálu změřeno 18 spár. V tabulce 2 jsou graficky znázorněny měřené a neměřené spáry na straně výstupu paprsku u jednotlivých zkoumaných vzorků s uvedeným důvodem nemožnosti jejich změření.

Obr. 24 Strana výstupu paprsku z materiálu: **A:** Nepravidelný tvar řezné spáry, **B:** Neprořezání spáry po celé délce [Zdroj: vlastní]



Tab. 2 Měřené a neměřené spáry na straně výstupu paprsku z materiálu

Označení vzorku	Posuv řezné hlavy [$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$]							
	50	50	250	250	750	750	1000	1000
	Typ paprsku							
	WJM	AWJ	WJM	AWJ	WJM	AWJ	WJM	AWJ
PVC-U + Mobihel Chromind 2K	■	■	■	■	■	■	■	■
PVC-U + Poluran 790	■	■	■	■	■	■	■	■
PP + Mobihel Chromind 2K	■	■	■	■	■	■	■	■
PP + Poluran 790	■	■	■	■	■	■	■	■
POM-H + Mobihel Chromind 2K	■	■	■	■	■	■	■	■

Legenda:



měřené spáry



neměřené spáry z důvodu nepravidelného tvaru řezné spáry



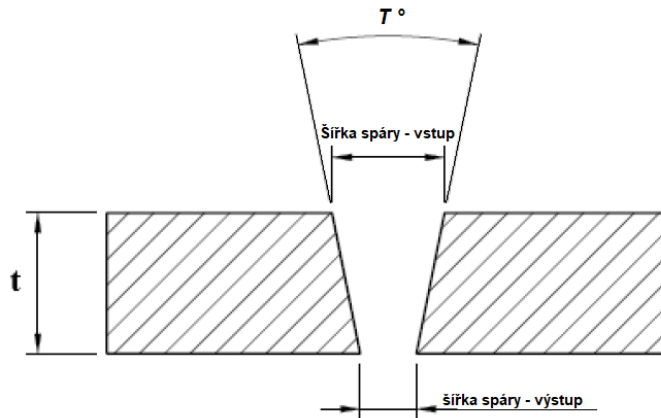
neměřené spáry z důvodu neprořezání materiálu

Při pronikání paprsku do nitra obrobku dochází ke ztrátám kinetické energie paprsku vlivem tření o dělený povrch součásti. Důsledkem ztráty kinetické energie při průchodu vodního paprsku je nedostatečné odstranění materiálu a s tím spojená změna šířky řezné spáry a změna úkosu.

Pro výpočet velikosti úhlu zkosení řezné spáry se využívají naměřené hodnoty z předešlého měření — šířka řezné spáry na vstupu paprsku do materiálu a výstupu paprsku z materiálu. Úhel

zkosení „ T° “ řezné spáry materiálu byl vypočten podle rovnice (1). Tloušťka všech testovaných materiálů „ t “ byla konstantní, tj. 4 mm [34].

Obr. 25 Úkos řezné spáry [Zdroj: vlastní]



$$T^\circ = \arctg \left(\frac{\text{šířka spáry}_{\text{vstup}} - \text{šířka spáry}_{\text{výstup}}}{2.t} \right) \quad (1)$$

6.4.4 Statistické testování výsledků

Všechna naměřená data byla statisticky testována pomocí programu STATISTICA 14 metodou ANOVA (Analysis of Variance) F-test na hladině významnosti α 0,05, tj. stanovená testovaná hypotéza H_0 prezentuje statisticky nevýznamný rozdíl mezi všemi naměřenými daty ($p > 0,05$) a alternativní hypotéza H_1 prezentuje zamítnutí hypotézy H_0 tzn., že existuje statisticky významný rozdíl mezi všemi naměřenými daty ($p < 0,05$). Hodnota p potom vyjadřuje nejmenší hladinu významnosti testu, na které zamítáme hypotézu. Součástí vyhodnocení pomocí tohoto programu je i grafická prezentace výsledků [35].

7 Vyhodnocení realizovaných experimentů

V následující kapitole jsou uvedeny výsledky experimentů, které byly prováděny v rámci řešení diplomové práce. Jsou zde uvedeny výsledky vlivu rychlosti posuvu řezné hlavy a typu vodního paprsku na šířku řezné spáry. V druhé části je uveden vliv obráběcích parametrů vodního paprsku na úhel zkosení řezné spáry. Třetí část se zabývá vlivem řezných parametrů vodního paprsku na povrchovou úpravu jednotlivých vzorků.

7.1 Vliv obráběcích parametrů vodního paprsku na šířku řezné spáry

Cíl této části experimentu byl zaměřen na obrábění polymerních materiálů s povrchovou úpravou nekonvenční technologií vodního paprsku, resp. na nalezení vhodného nastavení parametrů na základě typu paprsku a rychlosti posuvu řezné hlavy a na hodnocení kvality z hlediska vytvořené řezné spáry na vstupu a výstupu paprsku z obráběného materiálu.

U vyhodnocených výsledků se dá očekávat, že při nízké řezné rychlosti bude mít vodní paprsek více kinetické energie a řezná spára bude širší než při vyšších řezných rychlostech, kdy se bude kinetická energie paprsku snižovat a bude docházet ke zúžení šířky řezné spáry. Toto tvrzení by se mělo více projevovat na straně výstupu paprsku z materiálu, kde by rozdíly měly být patrnější než na straně vstupu paprsku do materiálu.

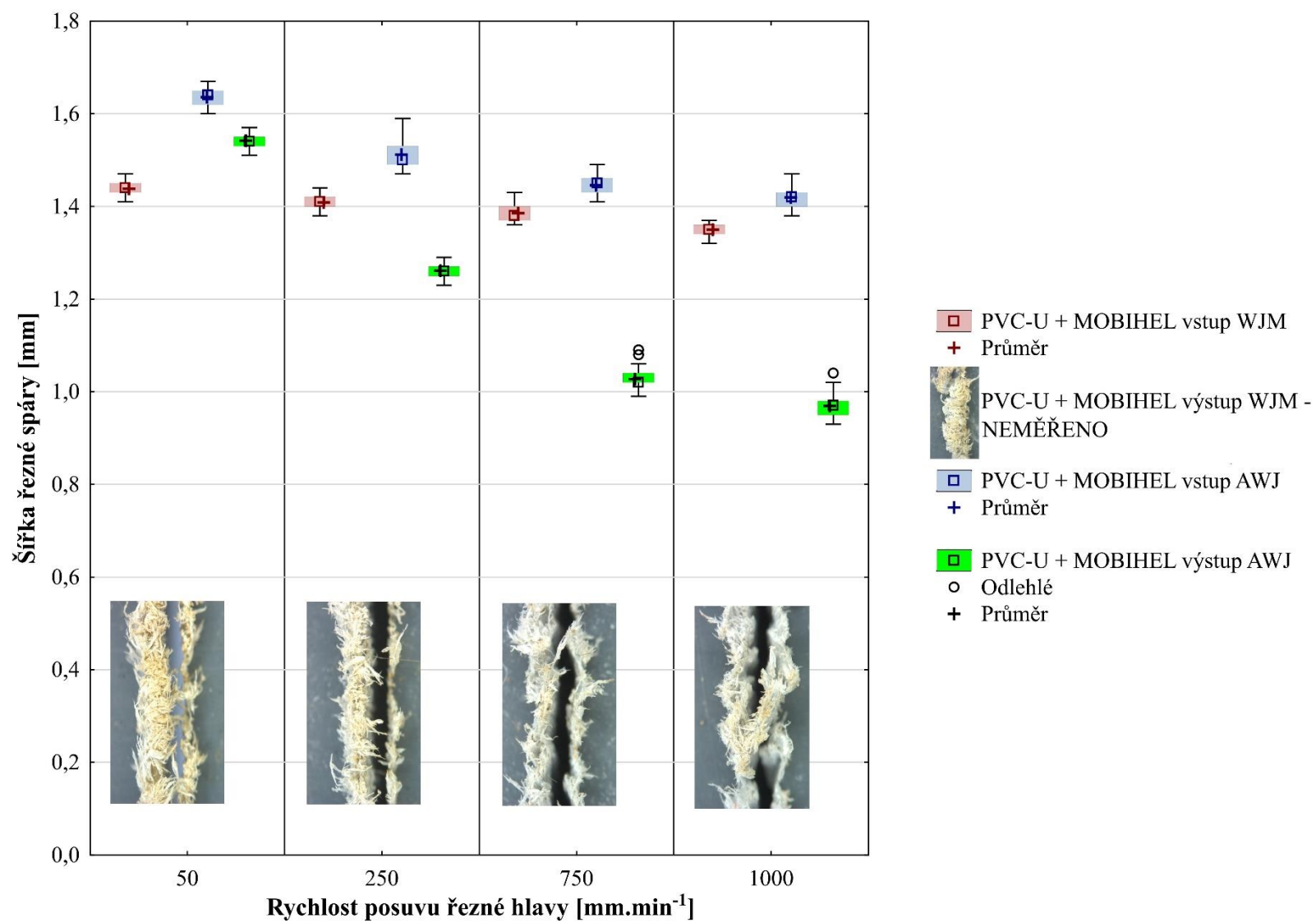
7.1.1 Materiál PVC-U + nátěr Mobihel Chromind 2K

Na obrázku 26 jsou prezentovány výsledky změřené šířky řezné spáry na vstupu paprsku a výstupu paprsku z materiálu PVC-U s povrchovou úpravou akrylátovým lakem.

Při použití technologie WJM (vodní paprsek bez přidaného abraziva) vykazuje šířka řezné spáry na straně vstupu paprsku pozvolna klesající trend s rostoucí rychlostí posuvu řezné hlavy. Rozdíl mezi průměrnou hodnotou šířky řezné spáry na straně vstupu paprsku do materiálu při rychlostech posuvu $50 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ a $1000 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ je pouze 0,09 mm. Šířku řezné spáry na straně výstupu vodního paprsku z materiálu bez abraziva nebylo možné změřit, protože tato strana obrobku vykazovala výrazně nepravidelný tvar, který byl způsobený otřepy řezaného materiálu podél řezané spáry.

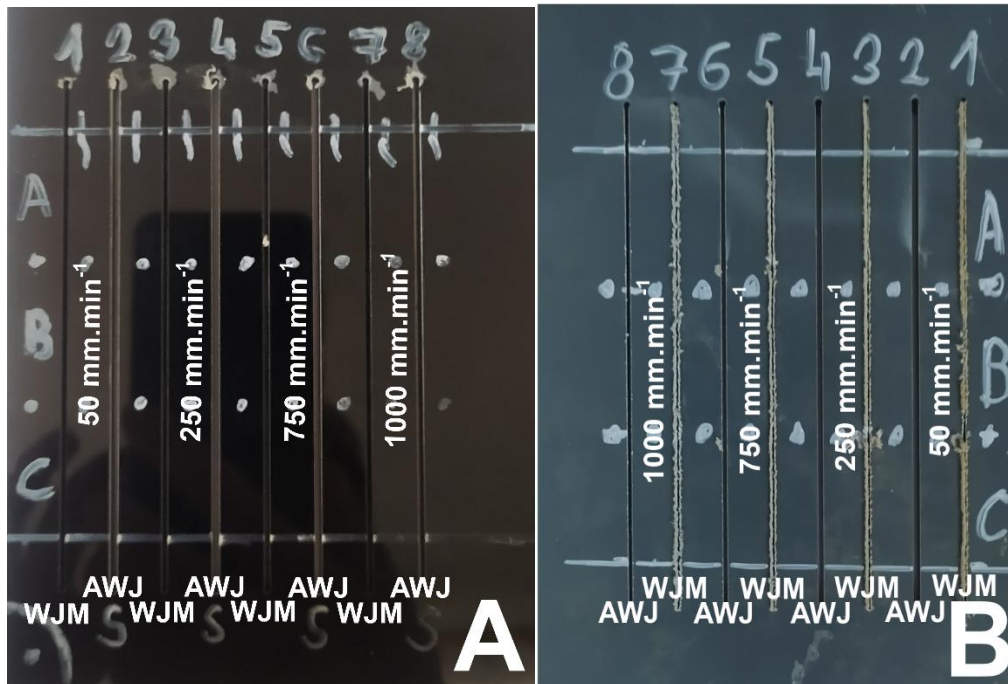
Technologie AWJ (vodní paprsek s abrazivem) potvrzuje predikci vyslovenou v kapitole 7.1, která naznačuje klesající hodnotu šířky řezné spáry se zvyšující se rychlostí posuvu řezné hlavy. Rozdíl průměrné hodnoty šířky řezné spáry mezi rychlostmi posuvu $50 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ a $1000 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ na vstupu abrazivního vodního paprsku do materiálu dosahuje hodnoty 0,22 mm. Na straně výstupu AWJ z materiálu je rozdíl mezi šířkami řezné spáry při různých rychlostech posuvu ještě patrnější. Rozdíl průměrné hodnoty šířky řezné spáry na straně výstupu paprsku z materiálu při rychlostech posuvu $50 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ a $1000 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ dosahuje hodnoty 0,57 mm.

Obr. 26 Závislost šířky řezné spáry na rychlosti posuvu řezné hlavy a typu vodního paprsku (mat. PVC-U + Mobihel Chromind 2K)



Na obrázku 27 jsou zobrazeny strany vstupu a výstupu WJM a AWJ v materiálu PVC-U + Mobihel Chromind 2K.

Obr. 27 Řezné spáry v materiálu PVC-U + Mobihel Chromind 2K: A: vstup WJM a AWJ do materiálu, B: výstup WJM a AWJ z materiálu [Zdroj: vlastní]



7.1.2 Materiál PVC-U + nátěr Poluran 790

Na obrázku 29 jsou zobrazeny výsledky změřené šířky řezné spáry na vstupu a výstupu vodního paprsku u materiálu PVC-U s povrchovou úpravou polyuretanovým lakem.

V tomto případě se jedná o stejný polymerní materiál jako v předchozí kapitole s tím rozdílem, že na jeho povrch byl nanesen jiný druh organického nátěru.

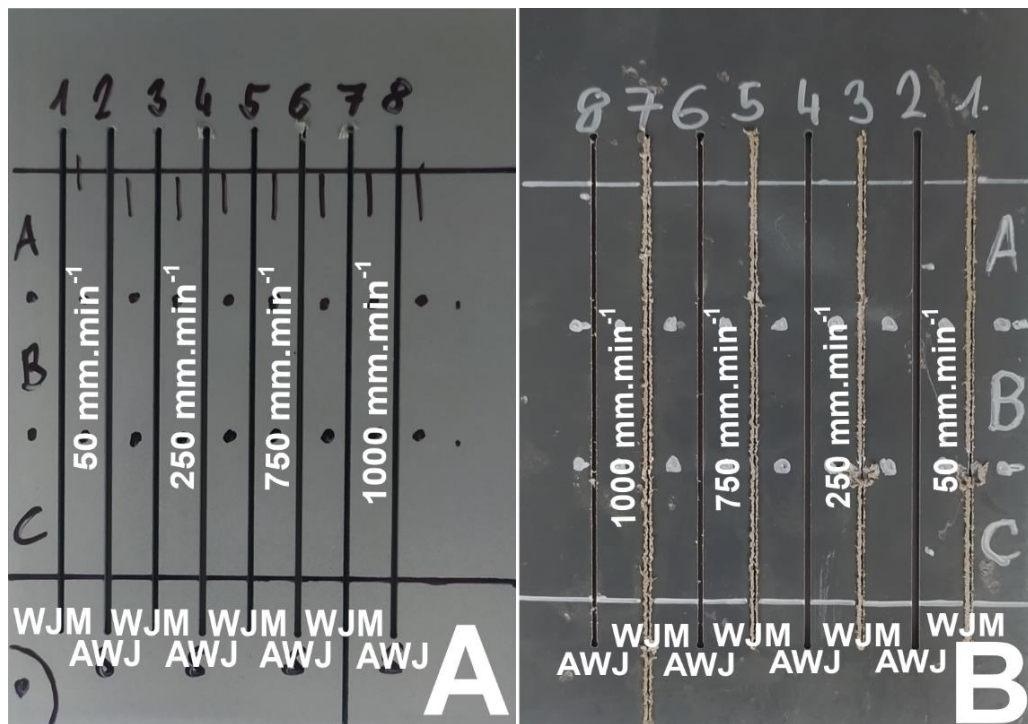
Při řezání čistým vodním paprskem bez přidaného abraziva vykazuje šířka řezné spáry na straně vstupu paprsku do materiálu klesající trend s postupně rostoucí rychlostí posuvu řezné hlavy. Rozdíl mezi průměrnou hodnotou šířky řezné spáry na straně vstupu paprsku do materiálu při řezání metodou WJM a rychlostech posuvu $50 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ a $1000 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ je $0,14 \text{ mm}$. Šířku řezné spáry na straně výstupu WJM z materiálu opět nebylo možné změřit, protože zmíněná strana obrobku vykazovala výrazně nepravidelný tvar, který byl způsobený silnou vrstvou otřepů řezaného materiálu podél hrany řezané spáry.

Při použití paprsku typu AWJ opět platí tvrzení z kapitoly 7.1, že s rostoucí rychlostí posuvu řezné hlavy se snižuje šířka řezné spáry. Rozdíl průměrné hodnoty šířky řezné spáry mezi rychlostmi posuvu $50 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ a $1000 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ na vstupu abrazivního vodního paprsku do materiálu dosahuje hodnoty $0,15 \text{ mm}$. Na straně výstupu AWJ z materiálu je klesající trend šířky řezné spáry ještě patrnější, a to hlavně mezi rychlostmi posuvu $50 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ a 750

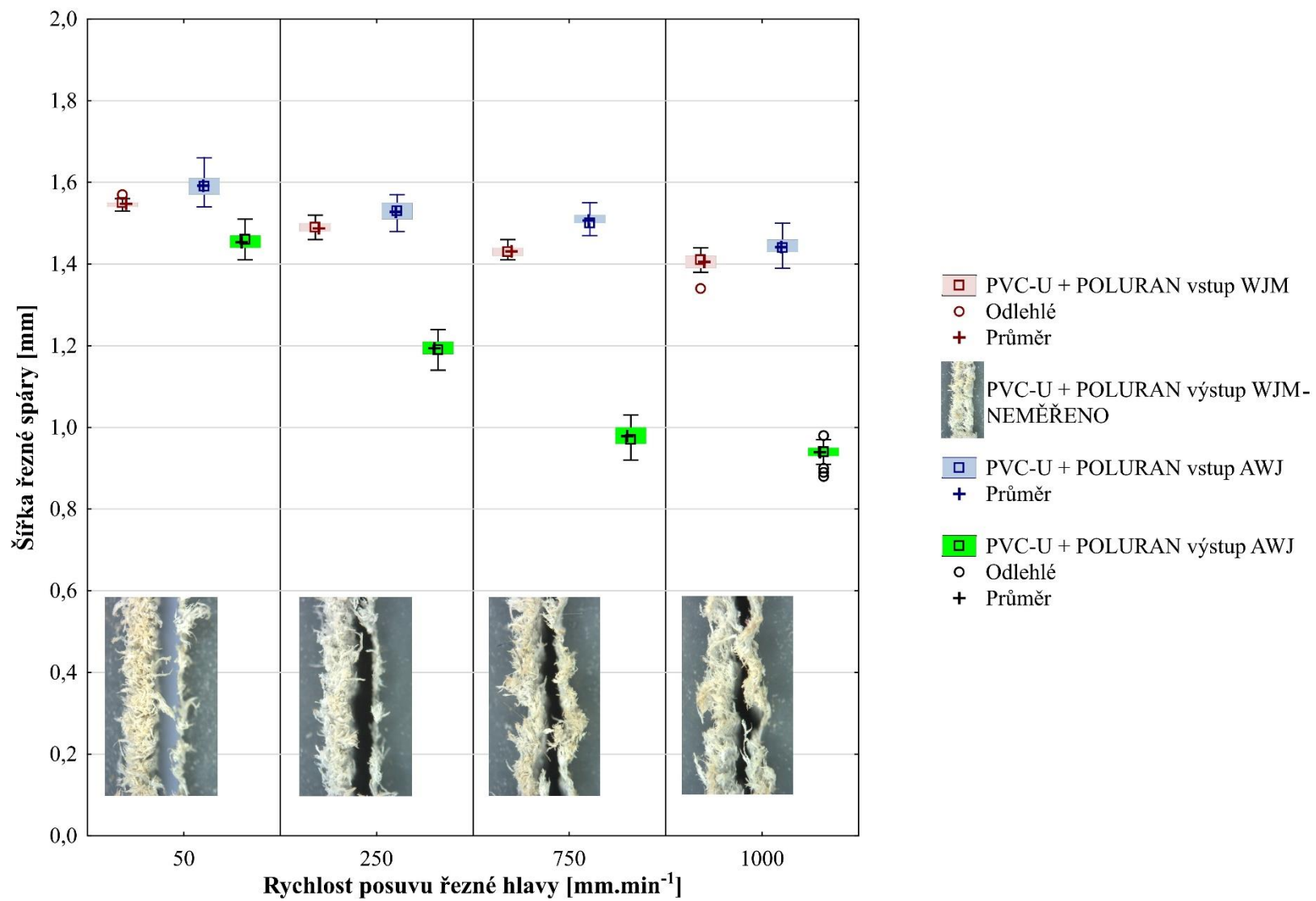
mm.min⁻¹. Mezi hodnotami šířky řezné spáry při rychlostech posuvu 750 mm.min⁻¹ a 1000 mm.min⁻¹ již takové rozdíly nejsou. Rozdíl průměrné hodnoty šířky řezné spáry na straně výstupu paprsku z materiálu při rychlostech posuvu 50 mm.min⁻¹ a 1000 mm.min⁻¹ dosahuje hodnoty 0,51 mm.

Na obrázku 28 jsou zobrazeny strany vstupu a výstupu WJM a AWJ v materiálu PVC-U + Poluran 790.

Obr. 28 Řezné spáry v materiálu PVC-U + Poluran 790: A: vstup WJM a AWJ do materiálu, B: výstup WJM a AWJ z materiálu [Zdroj: vlastní]



Obr. 29 Závislost šířky řezné spáry na rychlosti posuvu řezné hlavy a typu vodního paprsku (mat. PVC-U + Poluran 790)

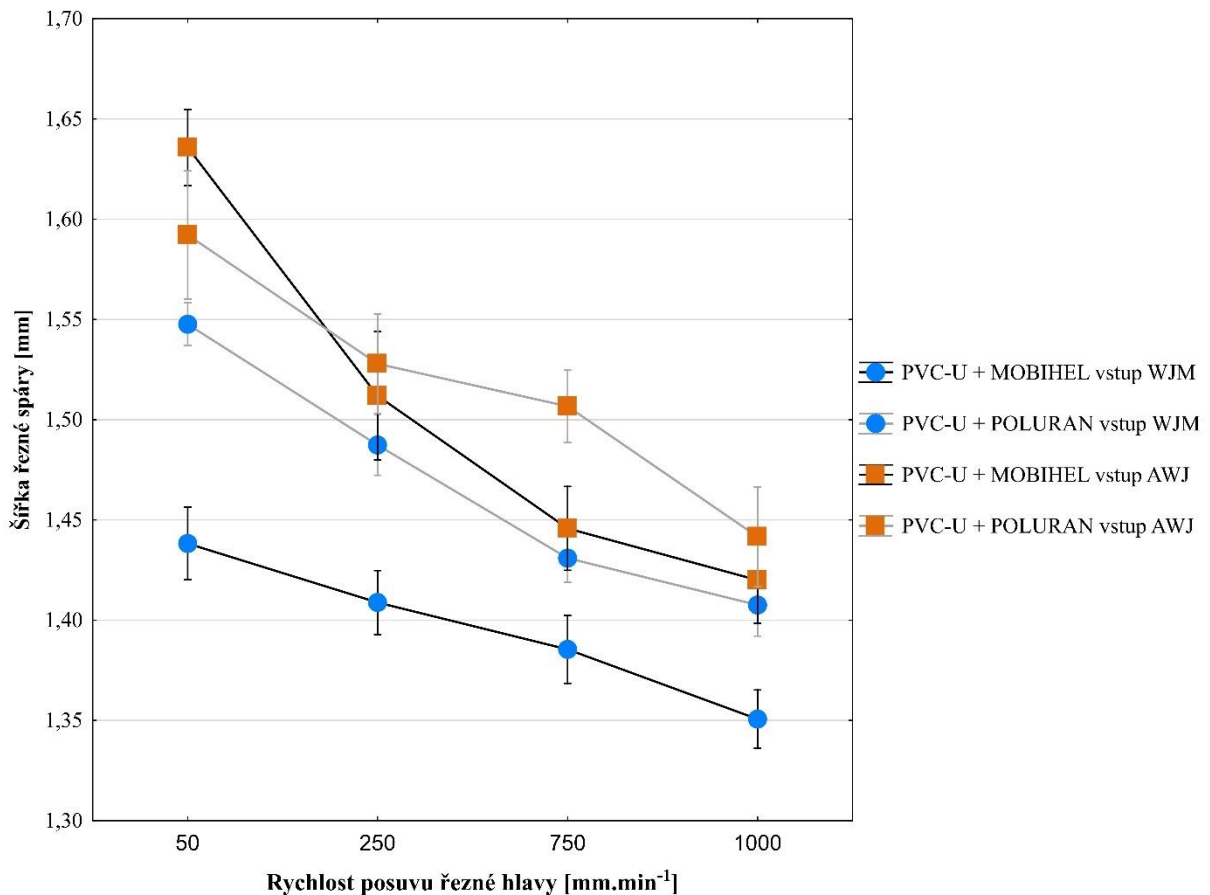


7.1.3 Porovnání šířky řezné spáry materiálu PVC-U s rozdílnou povrchovou úpravou

Obrázek 30 zobrazuje graf průměru z více proměnných, který porovnává hodnoty šířky řezných spár v závislosti na rychlostech posuvu řezné hlavy u materiálů PVC-U s povrchovou úpravou Mobihel Chromind 2K (černá křivka) a PVC-U s povrchovou úpravou Poluran 790 (šedá křivka), na straně vstupu vodního paprsku do materiálu. Z porovnání řezných spár vytvořených metodou WJM (modré značky) je patrné, že u materiálu PVC-U + Mobihel dosahuje šířka řezné spáry při všech rychlostech posuvu řezné hlavy nižších hodnot než šířka řezné spáry u materiálu PVC-U + Poluran.

Při použití technologie AWJ (oranžové značky) dosahuje šířka řezné spáry u materiálu PVC-U + Mobihel také nižších hodnot než už materiálu PVC-U + Poluran. Výjimka nastává při rychlosti posuvu řezné hlavy $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, kdy je šířka spáry u materiálu PVC-U + Mobihel vyšší.

Obr. 30 Porovnání šířky řezných spár na straně vstupu paprsku do materiálu PVC-U s rozdílnou povrchovou úpravou



7.1.4 Materiál PP + nátěr Mobihel Chromind 2K

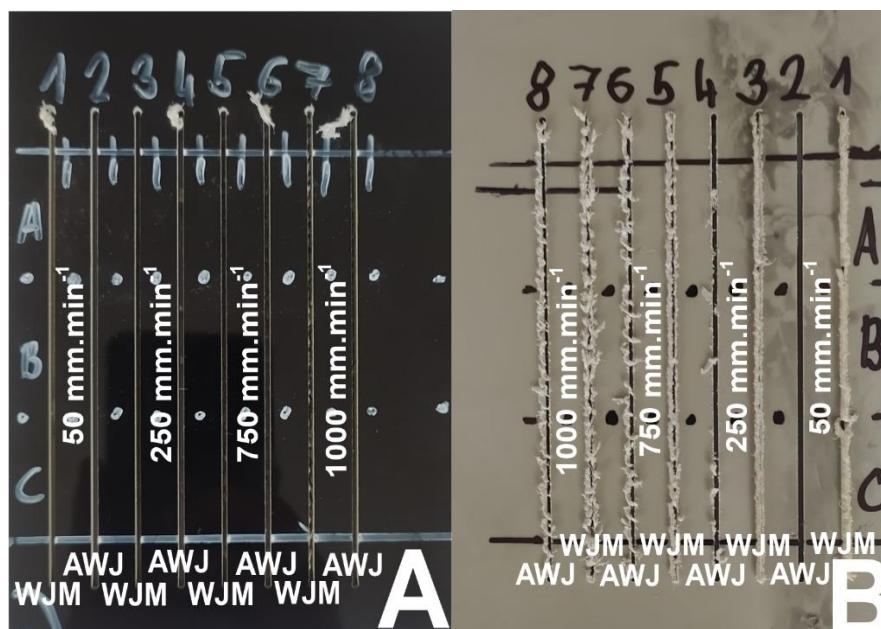
Výsledky změřené šířky řezné spáry na vstupu a výstupu vodního paprsku z materiálu PP s povrchovou úpravou akrylátovým lakem jsou prezentovány na obrázku 32.

Řezy vytvořené technologií WJM vykazují na straně vstupu paprsku do materiálu pozvolna klesající trend v závislosti na rostoucí rychlosti posuvu řezné hlavy. Průměrná hodnota šířky řezné spáry při rychlostech posuvu $750 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ a $1000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ je navíc stejná a to 1,33 mm. Rozdíl mezi průměrnou hodnotou šířky řezné spáry na straně vstupu paprsku do materiálu při krajních rychlostech posuvu je pouze 0,07 mm. Šířka řezné spáry vytvořená technologií WJM na straně výstupu paprsku nebyla změřena, protože tato strana obrobku vykazovala výrazně nepravidelný tvar, který byl způsobený otřepy řezaného materiálu podél řezané spáry.

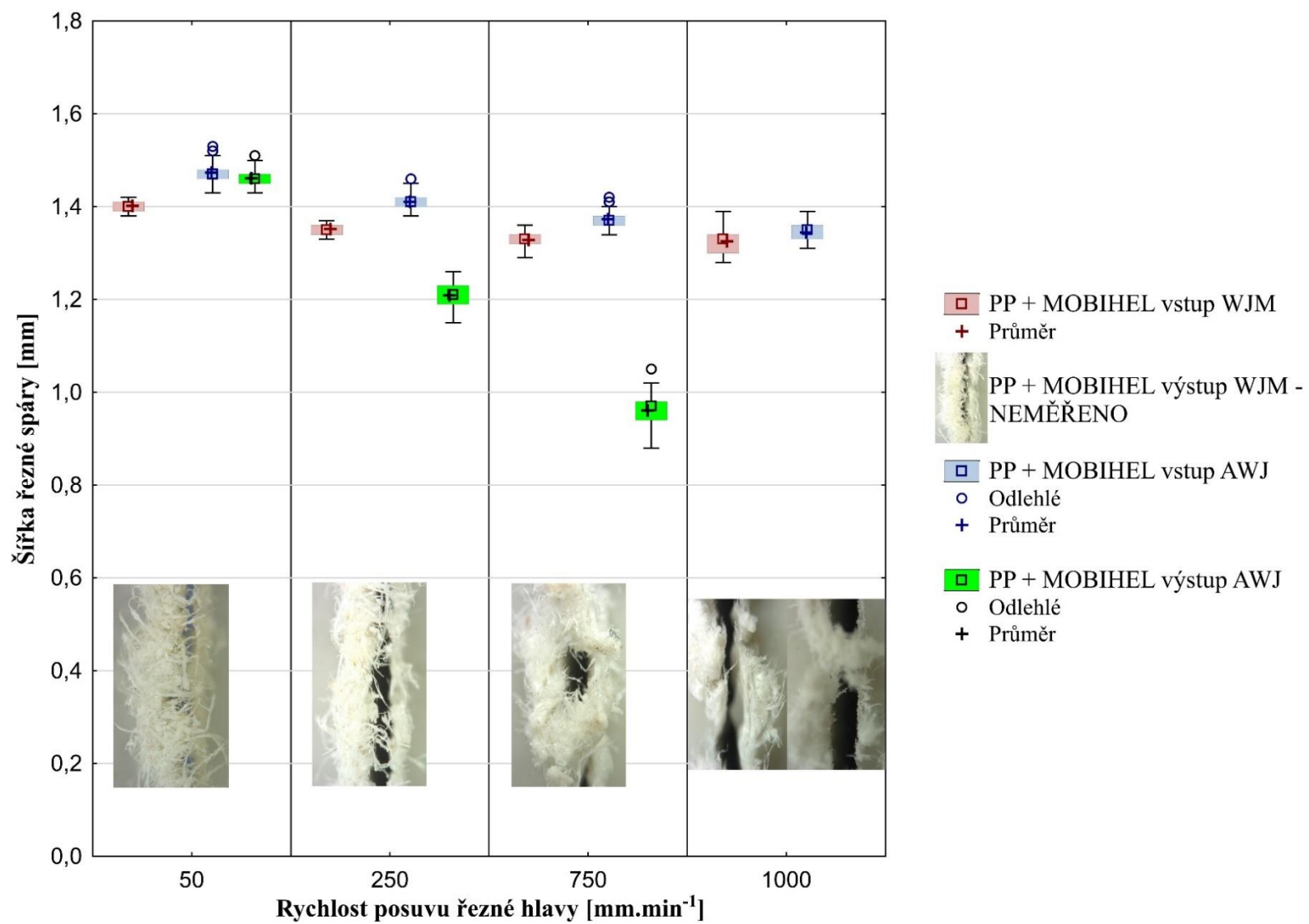
Spáry vytvořené technologií AWJ vykazovaly na straně vstupu paprsku do materiálu pozvolna klesající trend šířky spáry s postupně rostoucí hodnotou posuvu řezné hlavy. Rozdíl průměrné hodnoty šířky řezné spáry na straně vstupu paprsku při rychlostech posuvu $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ a $1000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ dosahuje hodnoty 0,13 mm. Na straně výstupu AWJ z materiálu lze pozorovat ve srovnání s předchozími hodnotami strmě klesající trend šířky řezné spáry s rostoucí hodnotou posuvu řezné hlavy. Šířku řezné spáry na straně výstupu AWJ z materiálu při rychlosti posuvu $1000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ nebylo možné změřit, jelikož vytvořená spára vykazovala výrazně nepravidelný tvar. Rozdíl průměrných hodnot šířek spár na straně výstupu při použití abrazivního paprsku při rychlostech posuvu $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ a $750 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ byl 0,5 mm.

Obrazová analýza řezů v materiálu Polypropylen + Mobihel na vstupu a výstupu paprsku je uvedena na obrázku 31.

Obr. 31 Řezné spáry v materiálu PP + Mobihel Chromind 2K: A: vstup WJM a AWJ do materiálu, B: výstup WJM a AWJ z materiálu [Zdroj: vlastní]



Obr. 32 Závislost šířky řezné spáry na rychlosti posuvu řezné hlavy a typu vodního paprsku (mat. PP + Mobihel Chromind 2K)



7.1.5 Materiál PP + nátěr Poluran 790

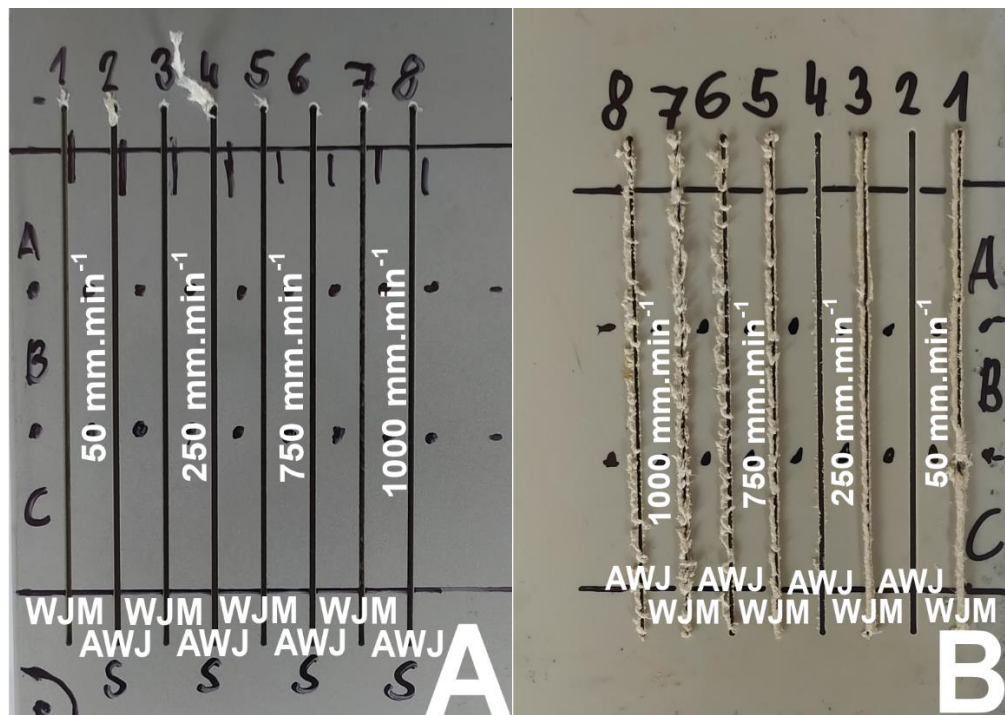
Obrázek 34 prezentuje výsledky změřené šířky řezné spáry na vstupu a výstupu vodního paprsku u materiálu PP s povrchovou úpravou polyuretanovým lakem.

Hodnoty šířky řezné spáry při použití technologie WJM na straně vstupu paprsku do materiálu klesají s rostoucí rychlostí posuvu řezné hlavy jen mírně. Rozdíl průměrných hodnot šířky řezné spáry mezi hodnotami posuvu $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ a $1000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ je $0,1 \text{ mm}$. Šířku spáry na straně výstupu paprsku z materiálu při použití čistého vodního paprsku bez abraziva opět nebylo možné změřit z důvodu výrazně nepravidelného okraje spáry.

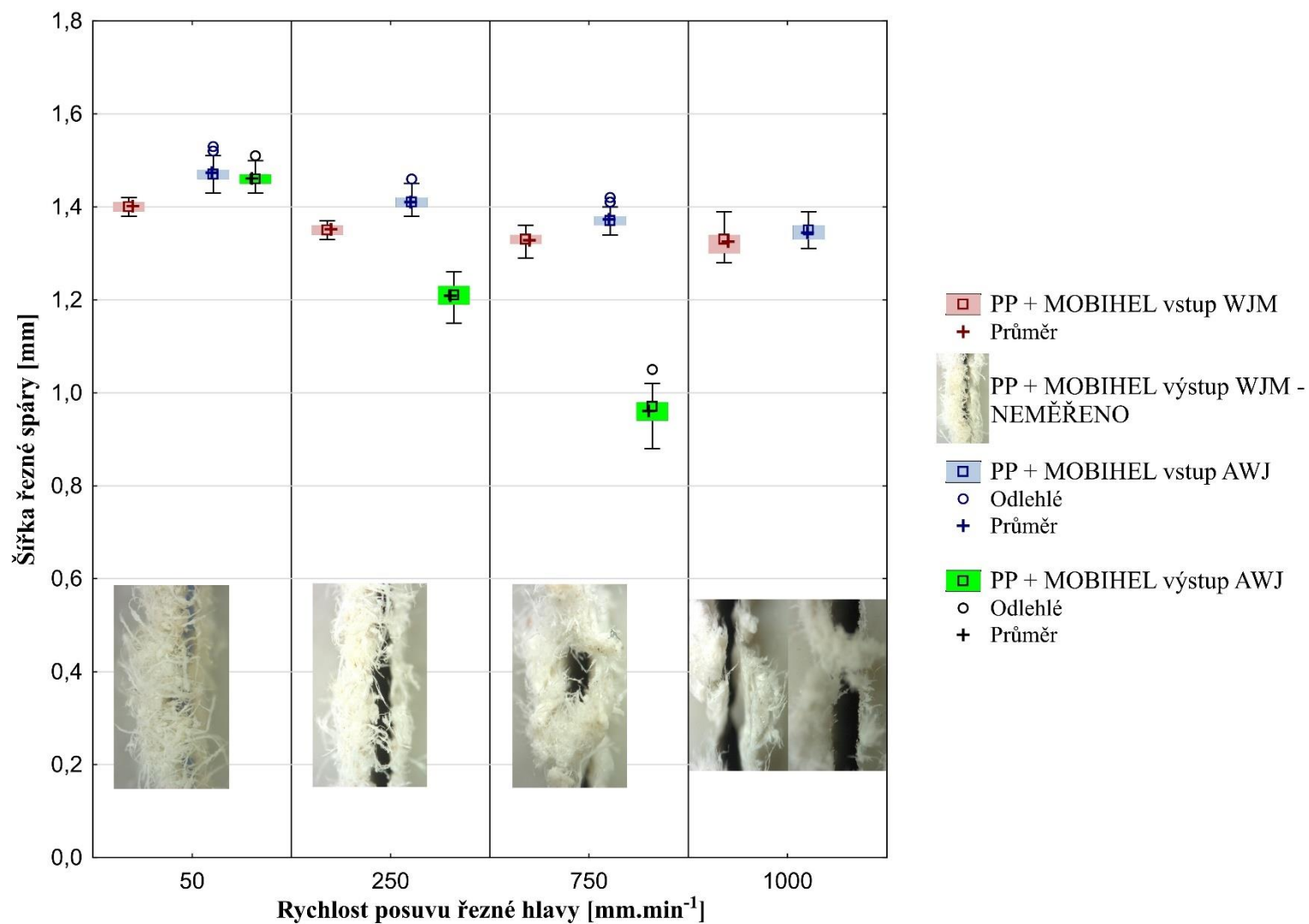
Šířka řezné spáry při využití abrazivního vodního paprsku na vstupu do materiálu klesá ještě mírněji než v případě technologie WJM. Rozdíl průměrných hodnot šířky řezné spáry při rychlostech posuvu $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ a $1000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ činí pouze $0,07 \text{ mm}$. Oproti tomu na straně výstupu AWJ z materiálu je trend poklesu šířky řezné spáry s rostoucí rychlostí posuvu řezné hlavy výraznější. Šířku řezné spáry na straně výstupu abrazivního paprsku z materiálu při rychlosti posuvu $1000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ nebylo možné změřit, protože zmíněná spára vykazovala výrazně nepravidelný tvar zapříčiněný otřepy materiálu podél hran spáry. Průměrné hodnoty šířek spár na straně výstupu AWJ z materiálu při krajních rychlostech posuvu dosahují rozdílu $0,5 \text{ mm}$.

Obrázek 33 představuje obrazovou analýzu řezů na vstupu a výstupu paprsku z materiálu Polypropylen s povrchovou úpravou Poluranem 790.

Obr. 33 Řezné spáry v materiálu PP + Poluran 790: A: vstup WJM a AWJ do materiálu, B: výstup WJM a AWJ z materiálu [Zdroj: vlastní]



Obr. 34 Závislost šířky řezné spáry na rychlosti posuvu řezné hlavy a typu vodního paprsku (mat. PP + Poluran 790)

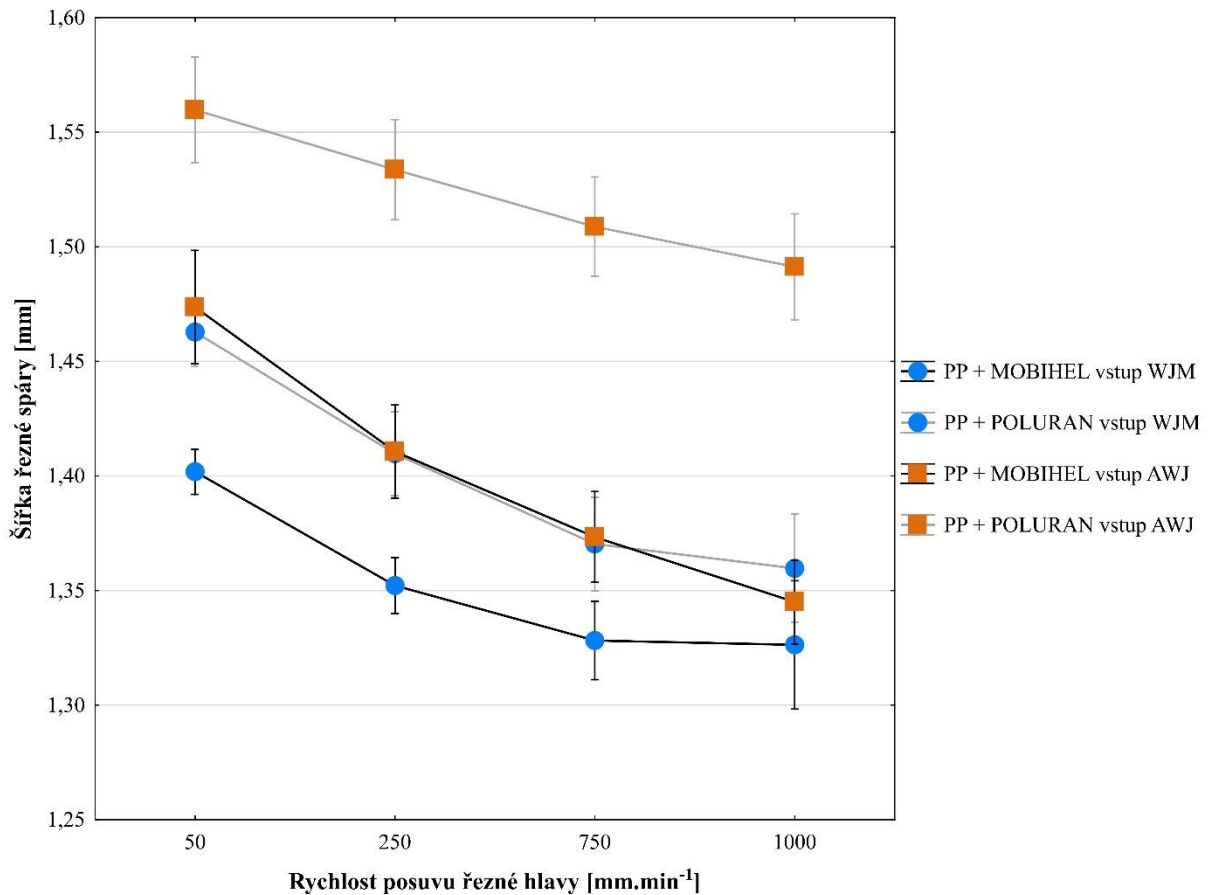


7.1.6 Porovnání šířky řezné spáry materiálu PP s rozdílnou povrchovou úpravou

Obrázek 35 zobrazuje graf průměru z více proměnných, který porovnává hodnoty šířky řezných spár v závislosti na rychlostech posuvu řezné hlavy u materiálů PP s povrchovou úpravou Mobihel Chromind 2K (černá křivka) a PP s povrchovou úpravou Poluran 790 (šedá křivka), na straně vstupu vodního paprsku do materiálu. Z porovnání šířek řezných spár vytvořených metodou WJM (modré značky) je patrné, že u materiálu PP + Mobihel dosahuje šířka řezné spáry při všech rychlostech posuvu řezné hlavy nižších hodnot než šířka řezné spáry u materiálu PP + Poluran.

Při použití technologie AWJ (oranžové značky) platí stejné tvrzení jako při použití technologie WJM, avšak rozdíly mezi šířkou řezné spáry při využití rozdílného organického nátěru jsou ještě výraznější. Jako příklad lze uvést průměrné hodnoty šířky spáry při rychlosti posuvu $1000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, kdy rozdíl šířek řezné spáry materiálu PP + Poluran a PP + Mobihel dosahoval hodnoty $0,15 \text{ mm}$.

Obr. 35 Porovnání šířky řezných spár na straně vstupu paprsku do materiálu PP s rozdílnou povrchovou úpravou



7.1.7 Materiál POM-H + nátěr Mobihel Chromind 2K

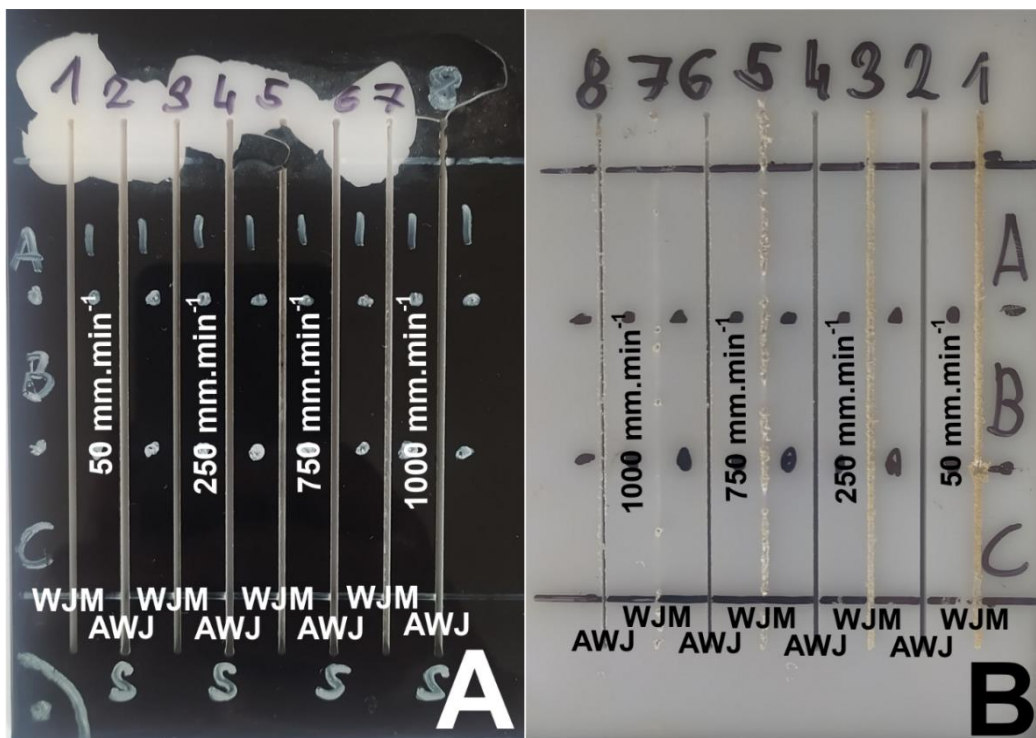
Materiál POM-H s povrchovou úpravou akrylátovým lakem vykazuje nejlepší fyzikálně-mechanické vlastnosti ze všech testovaných vzorků. Závislost šířky řezné spáry tohoto materiálu na rychlosti posuvu řezné hlavy je uvedena na obrázku 37.

Řezná spára na vstupu paprsku do materiálu při využití paprsku typu WJM vykazuje při všech hodnotách posuvu řezné hlavy téměř konstantní hodnotu šířky. Průměrná šířka řezné spáry při rychlosti posuvu $50 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ a $1000 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ se liší pouze o $0,05 \text{ mm}$. Šířku řezné spáry na výstupu WJM z materiálu nebylo možné změřit, protože spára vzniklá při rychlostech posuvu 50 a $250 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ vykazovala značně nepravidelný tvar a při rychlostech posuvu 750 a $1000 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ nedošlo k prořezání spáry.

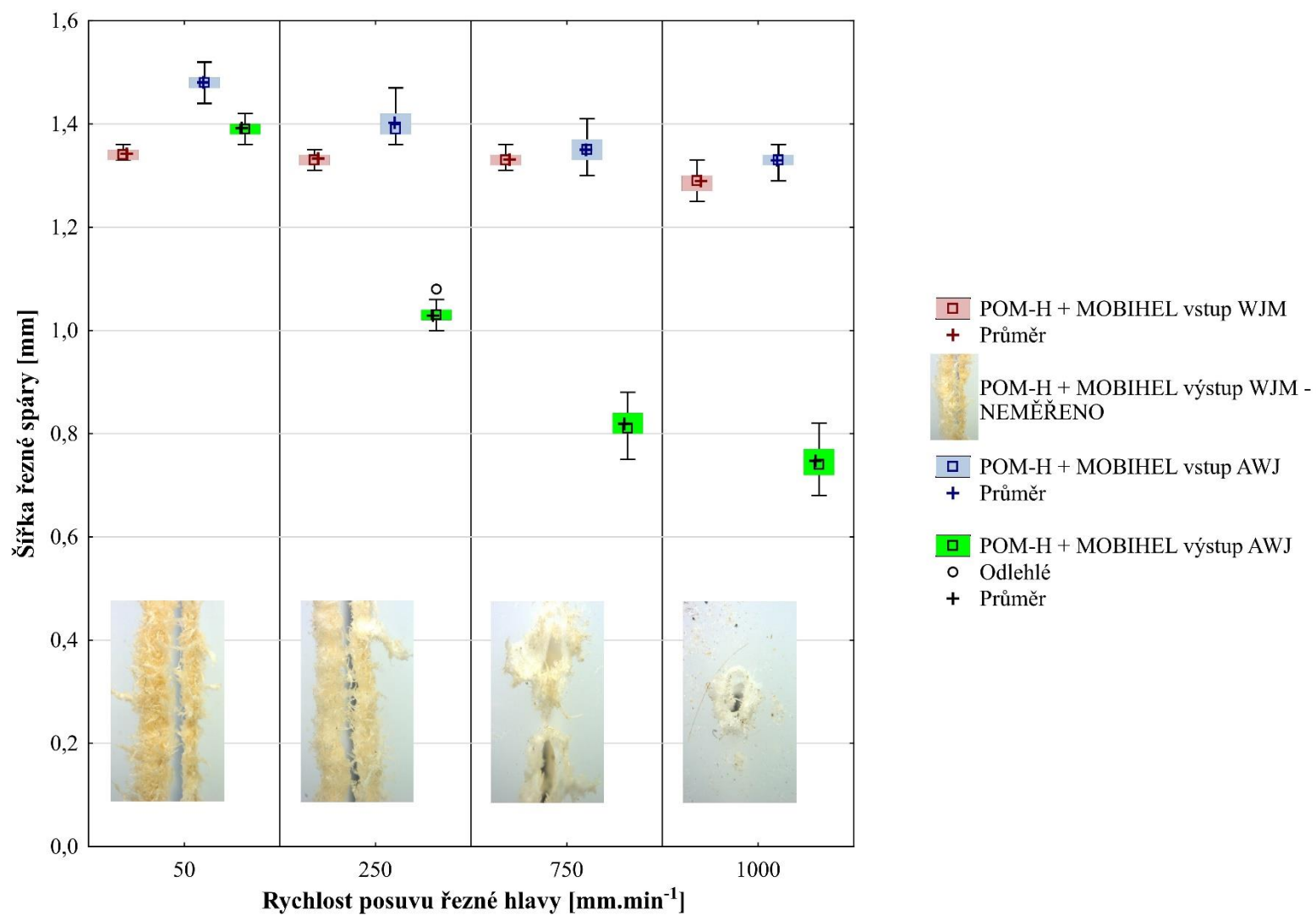
Šířka řezné spáry na vstupu paprsku typu AWJ do materiálu vykazovala klesající trend s rostoucí hodnotou posuvu řezné hlavy. Průměrné hodnoty šířky spáry na vstupu paprsku do materiálu při rychlostech posuvu $50 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ a $1000 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ se liší o $0,15 \text{ mm}$. Na straně výstupu paprsku typu AWJ z materiálu je patrný pokles šířky řezné spáry se zvyšující se rychlostí posuvu řezné hlavy hlavně mezi rychlostmi posuvu $50 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ a $750 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Průměrné hodnoty šířky řezné spáry mezi krajními rychlostmi posuvu se liší o $0,64 \text{ mm}$.

Na obrázku 36 jsou zobrazeny strany vstupu a výstupu paprsku typu WJM a AWJ v materiálu POM-H + Mobihel Chromind 2K.

Obr. 36 Řezné spáry v materiálu POM-H + Mobihel Chromind 2K: A: vstup WJM a AWJ do materiálu, B: výstup WJM a AWJ z materiálu [Zdroj: vlastní]



Obr. 37 Závislost šířky řezné spáry na rychlosti posuvu řezné hlavy a typu vodního paprsku (mat. POM-H + Mobihel Chromind 2K)



7.1.8 Výsledky statistického testování

Výsledky statistického testování variant experimentu jsou uvedeny v tabulce 3.

Tab. 3 Statistické vyhodnocení šířky řezné spáry polymerních materiálů s povrchovou úpravou dle ANOVA F-testu s uvedeným parametrem p na hladině významnosti α 0,05

Šířka řezné spáry	Testovaný materiál				
	PVC-U + MOBIHEL	PVC-U + POLURAN	PP + MOBIHEL	PP + POLURAN	POM-H + MOBIHEL
WJM vstup	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
AWJ vstup	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
AWJ výstup	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001

Z hlediska statistického testování závislosti rychlosti pojezdu řezné hlavy 50, 250, 750 a 1000 mm.min⁻¹ a paprsku typu WJM nebo AWJ na šířku řezné spáry lze konstatovat, že existuje statisticky významný rozdíl mezi uvedenými parametry rychlosti na hladině významnosti 0,05 ($p=0,0001$). Existuje tedy silná závislost rychlosti pojezdu řezné hlavy na šířku řezné spáry při použití technologie WJM i AWJ.

7.2 Vliv obráběcích parametrů vodního paprsku na úhel zkosení řezné spáry

Úhel zkosení řezné spáry je jedním z důležitých parametrů z hlediska hodnocení celkové kvality řezu. V případě ideálního dělení materiálu by rovina řezu měla svírat s plochou materiálu pravý úhel. Tuto situaci můžeme vidět na obrázku 11. Pokud nastane situace, kdy je šířka řezné spáry na vstupu vodního paprsku do materiálu větší než šířka řezné spáry na výstupu vodního paprsku z materiálu, je zřejmé, že vodní paprsek ztrácí při průchodu řezaným materiálem kinetickou energii. Dá se předpokládat, že se zvyšující se rychlostí pojezdu řezné hlavy mírně poroste úhel zkosení řezné spáry.

Úhel zkosení řezné spáry byl vyhodnocen pouze u spár vytvořených technologií AWJ. Tento úhel nemohl být vyhodnocen u spár vytvořených technologií WJM, protože u žádné z těchto spár nebylo možné změřit její šířku na straně výstupu paprsku z materiálu, jelikož na této straně vykazovaly vytvořené spáry výrazně nepravidelný tvar.

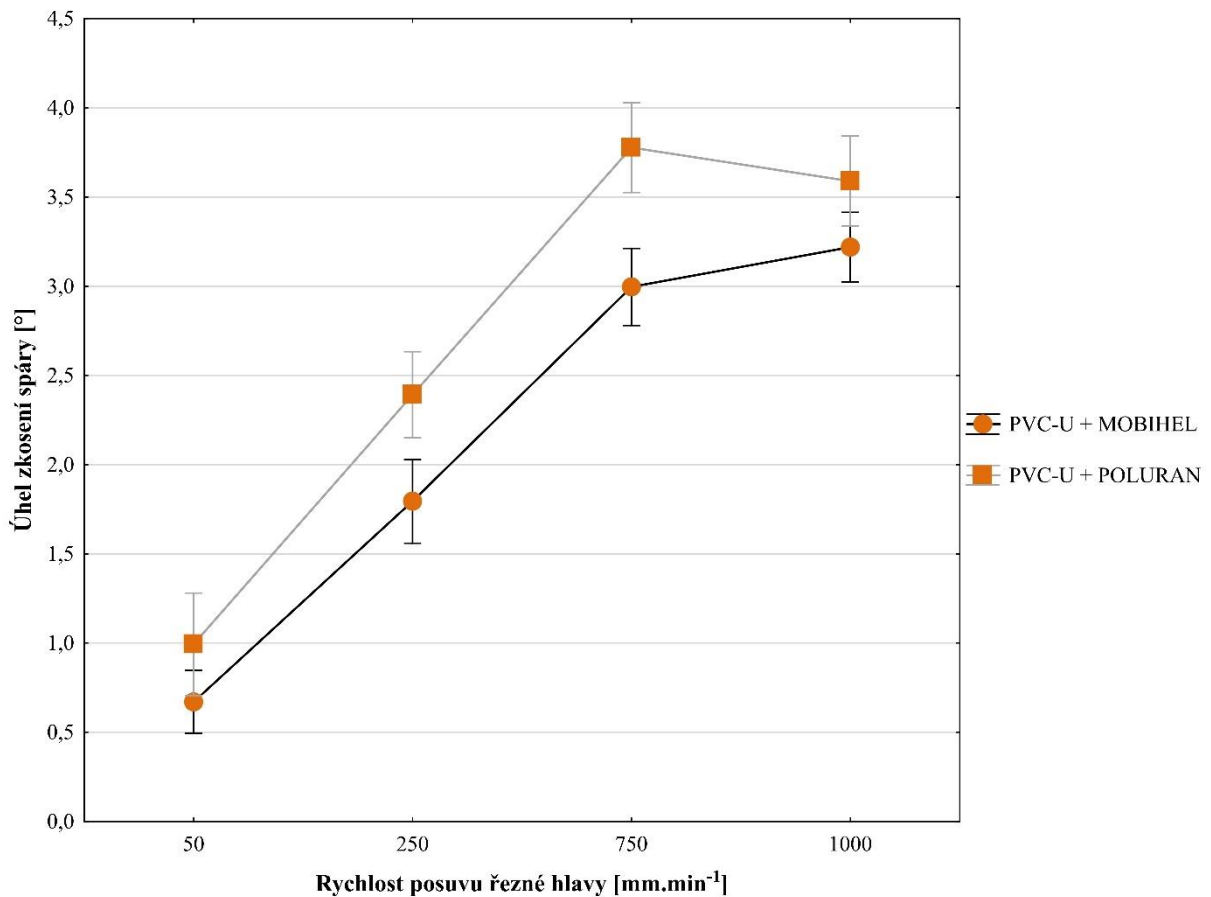
7.2.1 Materiál PVC-U + nátěr Mobihel Chromind 2K i Poluran 790

Obrázek 38 zobrazuje graf závislosti úhlu úkosu řezné spáry na rychlosti posuvu řezné hlavy při použití abrazivního vodního paprsku u materiálu PVC-U s akrylátovým i polyuretanovým lakem.

U materiálu PVC-U + Mobihel lze konstatovat, že úhel úkosu řezné spáry lineárně roste od hodnoty posuvu $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ až do hodnoty posuvu $750 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Při rychlosti posuvu $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ dosahoval úhel úkosu hodnoty $0,67^\circ$. Při rychlosti posuvu $750 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ dosáhl úhel úkosu hodnoty 3° . Při rychlosti posuvu řezné hlavy $1000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ se trend růstu úhlu zpomalil, hodnota úhlu zkosení při této rychlosti posuvu činila $3,21^\circ$.

Z vypočtených hodnot velikosti úhlu zkosení u materiálu PVC-U + Poluran lze konstatovat, že pro první řeznou rychlost je hodnota velikosti úhlu nejmenší 1° . Se zvyšující se rychlostí posuvu řezné hlavy se však velikost úhlu lineárně zvyšovala až do hodnoty posuvu $750 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, kdy vypočtený úhel dosahoval hodnoty $3,78^\circ$. Při rychlosti posuvu $1000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ však došlo k poklesu úhlu zkosení řezné spáry na hodnotu $3,59^\circ$.

Při porovnání obou křivek znázorňujících úhel zkosení řezné spáry stejných materiálů s různou povrchovou úpravou při různých rychlostech posuvu lze konstatovat, že úhel zkosení řezné spáry u materiálu PVC-U + Poluran je při všech rychlostech posuvu větší než u materiálu PVC-U + Mobihel. Při rychlosti posuvu $1000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ se však k sobě hodnoty úhlů začaly přibližovat.

Obr. 38 Porovnání úhlu zkosení řezné spáry materiálů PVC-U s rozdílnou povrchovou úpravou

7.2.2 Materiál PP + nátěr Mobihel Chromind 2K i Poluran 790

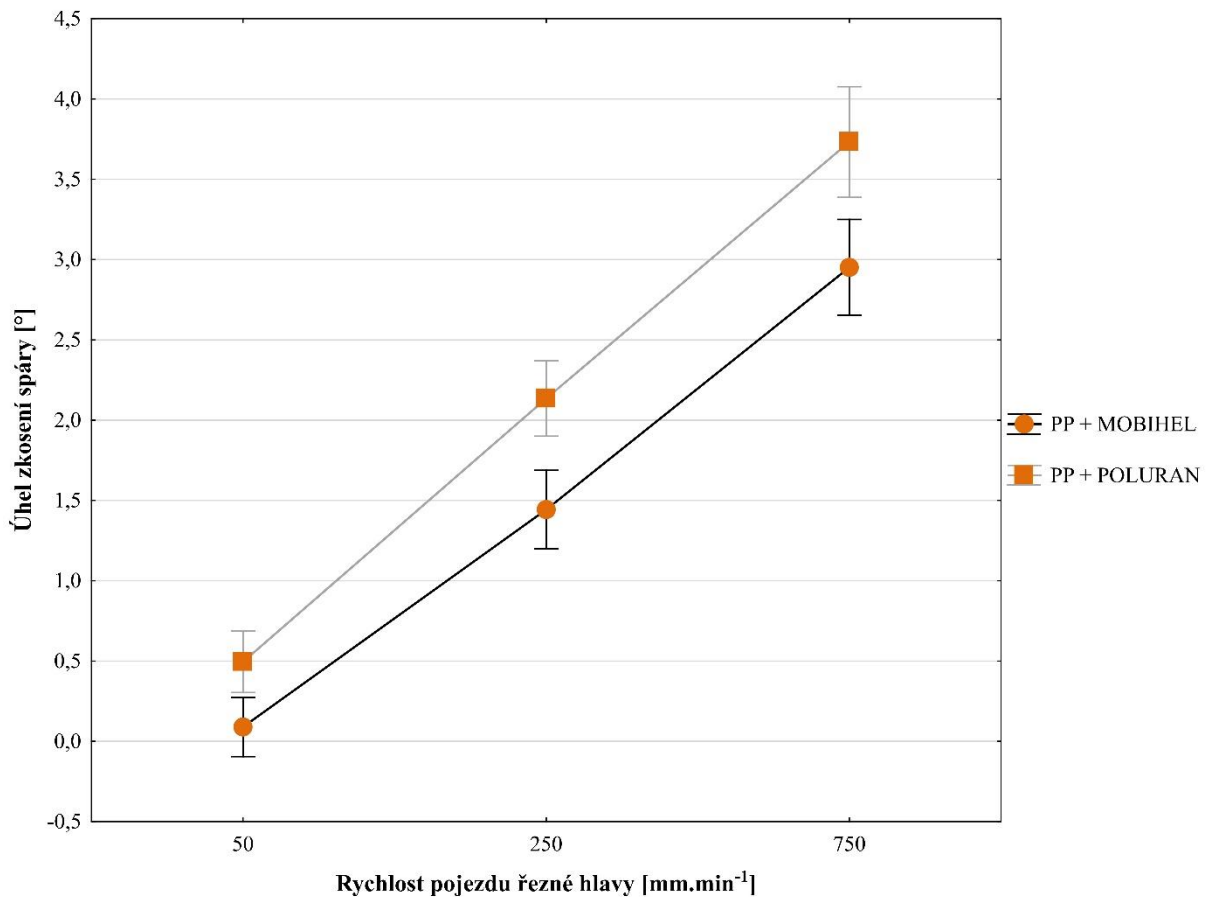
Úhel zkosení řezné spáry v závislosti na rychlosti posuvu řezné hlavy materiálu PP s povrchovou úpravou akrylátovým i polyuretanovým lakem je zobrazen na obrázku 39. Odchylku povrchu řezné spáry od kolmosti ideálního řezu bylo možné stanovit pouze pro hodnoty posuvu 50, 250 a 750 mm.min⁻¹, protože nebylo možné změřit šířku řezné spáry na straně výstupu AWJ z materiálu při rychlosti posuvu 1000 mm.min⁻¹. Důvodem byl značně nepravidelný tvar řezné spáry.

U materiálu PP + Mobihel roste úhel zkosení spáry téměř lineárně od hodnoty 0,09° při rychlosti posuvu 50 mm.min⁻¹, do hodnoty 2,95° při rychlosti posuvu 750 mm.min⁻¹.

Křivka znázorňující úhel zkosení pro materiál PP + Poluran stoupá se zvyšujícím se posuvem také téměř lineárně. Úhel při posuvu 50 mm.min⁻¹ nabývá hodnoty 0,49°, při rychlosti posuvu 750 mm.min⁻¹ dosahuje hodnoty 3,73°.

Při porovnání obou křivek závislosti úhlu zkosení řezné spáry na rychlosti posuvu řezné hlavy lze konstatovat, že podobně jako v předchozí kapitole nabývá úhel zkosení materiálu s povrchovou úpravou Poluran 790 při všech rychlostech posuvu vyšších hodnot než materiál s povrchovou úpravou Mobihel Chromind 2K.

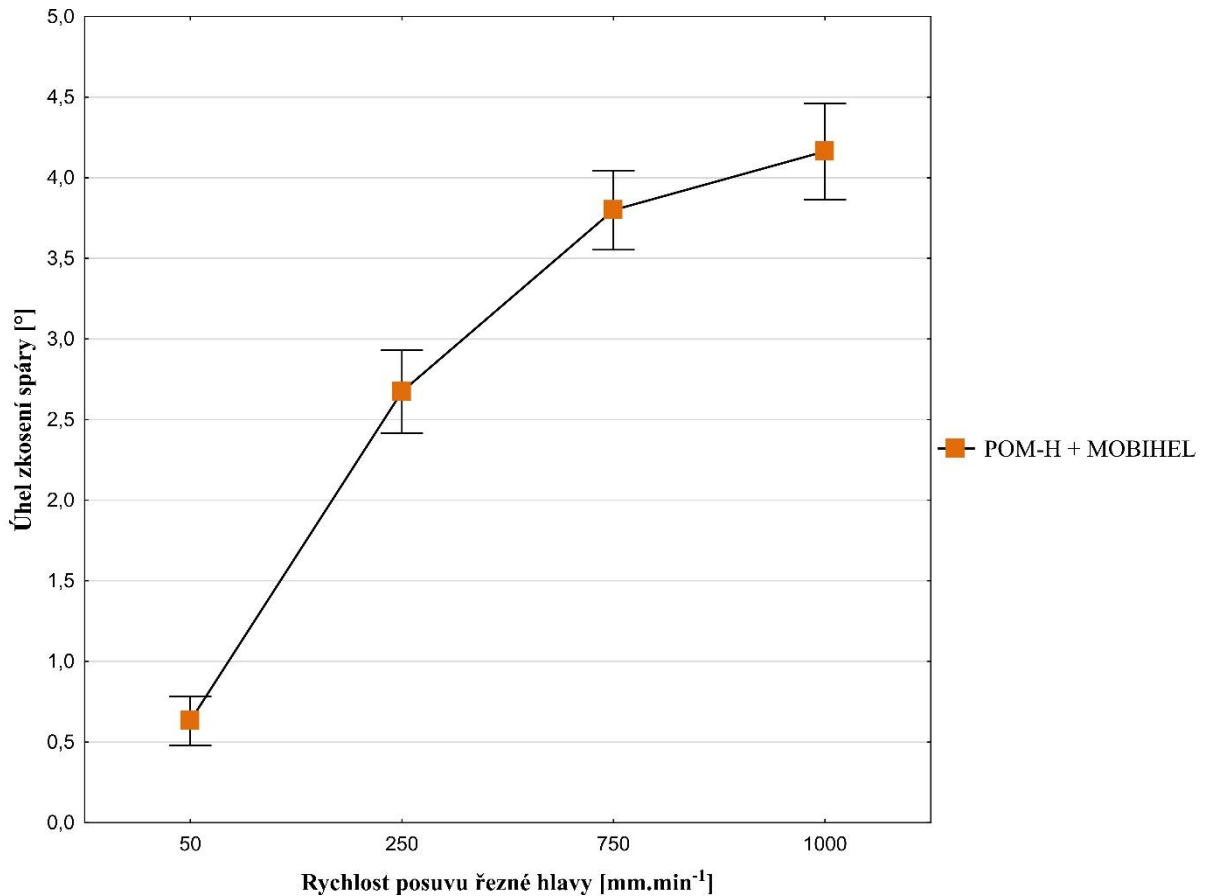
Obr. 39 Porovnání úhlu zkosení řezné spáry materiálů PP s rozdílnou povrchovou úpravou



7.2.3 Materiál POM-H + nátěr Mobihel Chromind 2K

Z vypočtených hodnot velikosti úhlu zkosení řezné spáry zanesených do grafu na obrázku 40 lze konstatovat, že pro první řeznou rychlost je hodnota velikosti úhlu nejmenší 0,63°. Se zvyšující se rychlostí posuvu řezné hlavy však stoupala velikost úhlu zkosení řezné spáry v souladu s předpokladem vysloveným v kapitole 7.2 a možnost vytvořit ideální řez se vzdalovala. Při hodnotě posuvu 1000 mm.min⁻¹ dosahoval úhel zkosení hodnoty 4,16°.

Obr. 40 Úhel zkosení řezné spáry materiálu POM-H s povrchovou úpravou Mobihel Chromind 2K



Pro větší přehlednost jsou hodnoty úhlů zkosení řezné spáry pro všechny materiály a hodnoty posuvu řezné hlavy uvedeny v tabulce 4.

Tab. 4 Výsledky měření úhlu řezné spáry

Rychlost pojezdu řezné hlavy [mm.min ⁻¹]	Testovaný materiál				
	PVC-U + MOBIHEL	PVC-U + POLURAN	PP + MOBIHEL	PP + POLURAN	POM-H + MOBIHEL
50	0°41'	1°00'	0°05'	0°30'	0°38'
250	1°48'	2°24'	1°27'	2°08'	2°40'
750	3°00'	3°47'	2°57'	3°44'	3°48'
1000	3°13'	3°35'			4°10'

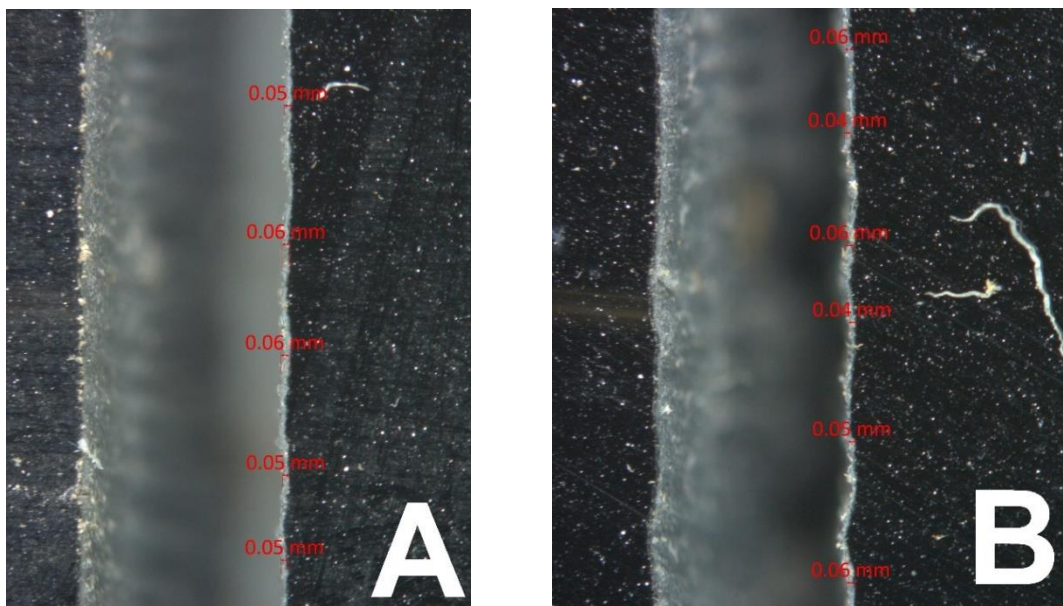
7.3 Vliv obráběcích parametrů vodního paprsku na povrchovou úpravu

V následující kapitole bude prodiskutován vliv nastavení obráběcích parametrů vodního paprsku na povrchovou úpravu jednotlivých vzorků. Vliv vodního paprsku bude porovnáván při rychlostech posuvu řezné hlavy 50 a 750 mm.min⁻¹ při využití technologie WJM i AWJ. Všechny snímky v této kapitole byly pořízeny v oblasti prvního snímku části B každého vzorku (viz. obrázek 23). Vliv paprsku na povrchovou úpravu bude vyhodnocen na straně vstupu paprsku do materiálu jako vzdálenost mezi hranou řezné spáry a začátkem povrchové úpravy. Delaminace povrchové úpravy v okolí hrany řezné spáry byla pravděpodobně způsobena vlivem působení pláště řezného paprsku, který je tvořen směsí kapek vody a abraziva a působí v okolí řezané hrany.

7.3.1 Materiál PVC-U + nátěr Mobihel Chromind 2K

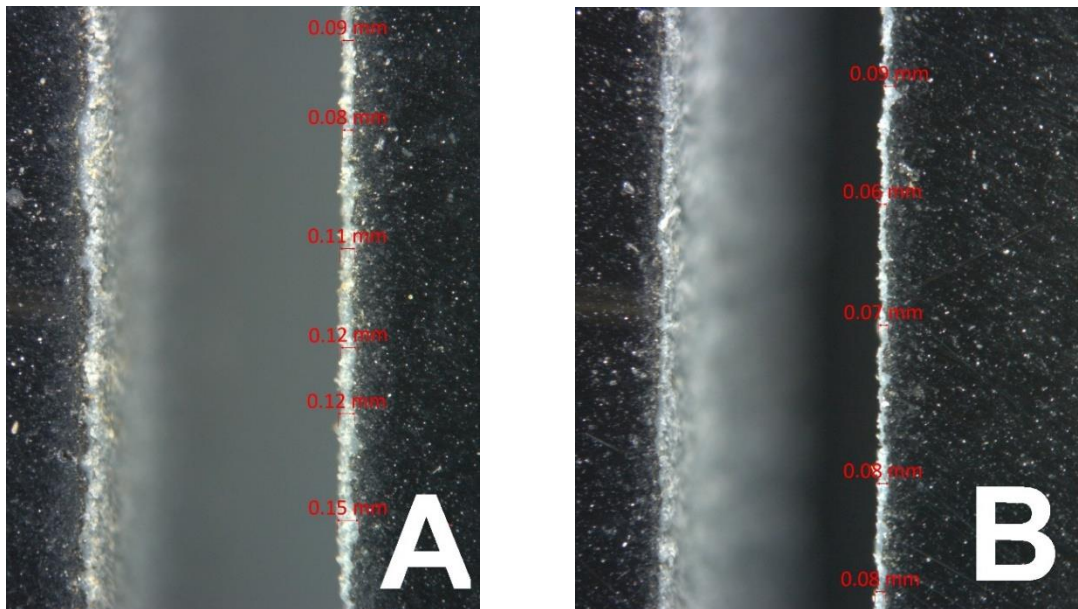
Obrázek 41 zobrazuje šířku delaminované vrstvy povrchové úpravy od hrany řezné spáry u materiálu PVC-U + Mobihel při použití paprsku typu WJM. Při rychlosti posuvu řezné hlavy 50 mm.min⁻¹ se šířka delaminované vrstvy pohybovala v rozmezí 0,05 až 0,06 mm, při rychlosti posuvu 750 mm.min⁻¹ v intervalu 0,04 až 0,06 mm.

Obr. 41 Šířka delaminované povrchové úpravy materiálu PVC-U + Mobihel paprskem typu WJM: A: posuv 50 mm.min⁻¹, B: posuv 750 mm.min⁻¹ [Zdroj: vlastní]



Při použití technologie AWJ se šířka delaminované vrstvy povrchové úpravy (obrázek 42) při hodnotě posuvu 50 mm.min⁻¹ pohybovala mezi hodnotami 0,08 – 0,15 mm. Při rychlosti posuvu 750 mm.min⁻¹ nabývala šířka odstraněné povrchové úpravy hodnot v intervalu 0,06 až 0,09 mm.

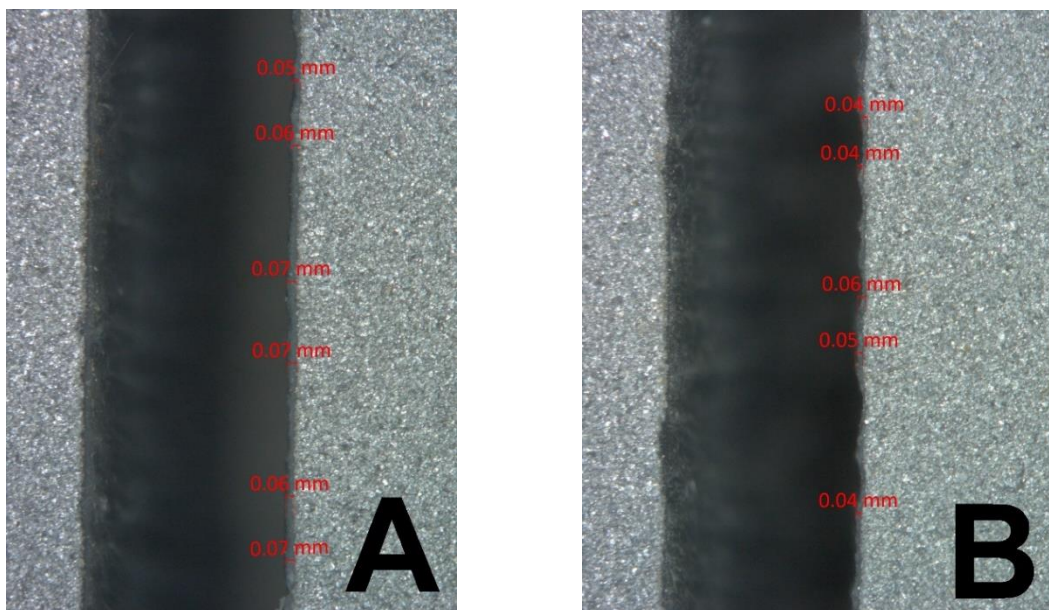
Obr. 42 Šířka delaminované povrchové úpravy materiálu PVC-U + Mobihel paprskem typu AWJ:
A: posuv 50 mm.min⁻¹, B: posuv 750 mm.min⁻¹ [Zdroj: vlastní]



7.3.2 Materiál PVC-U + nátěr Poluran 790

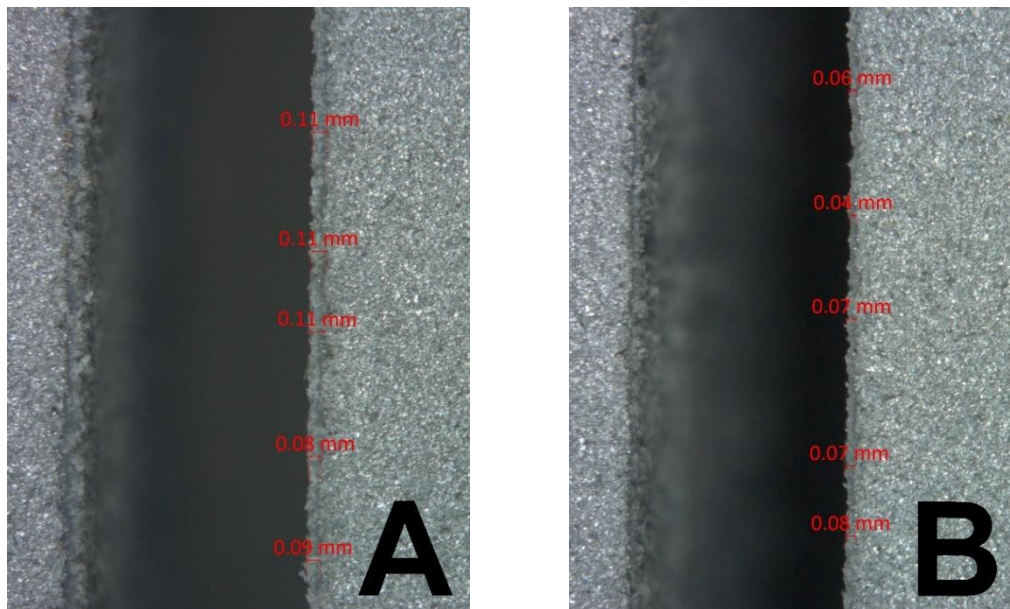
Obrázek 43 zobrazuje šířku delaminované vrstvy povrchové úpravy na materiálu PVC-U s naneseným polyuretanovým lakem. Při rychlosti posuvu 50 mm.min⁻¹ se šířka odstraněné vrstvy pohybuje v rozmezí 0,05 až 0,07 mm. Při rychlosti posuvu 750 mm.min⁻¹ se šířka snížila na hodnoty 0,04 – 0,06 mm.

Obr. 43 Šířka delaminované povrchové úpravy materiálu PVC-U + Poluran paprskem typu WJM:
A: posuv 50 mm.min⁻¹, B: posuv 750 mm.min⁻¹ [Zdroj: vlastní]



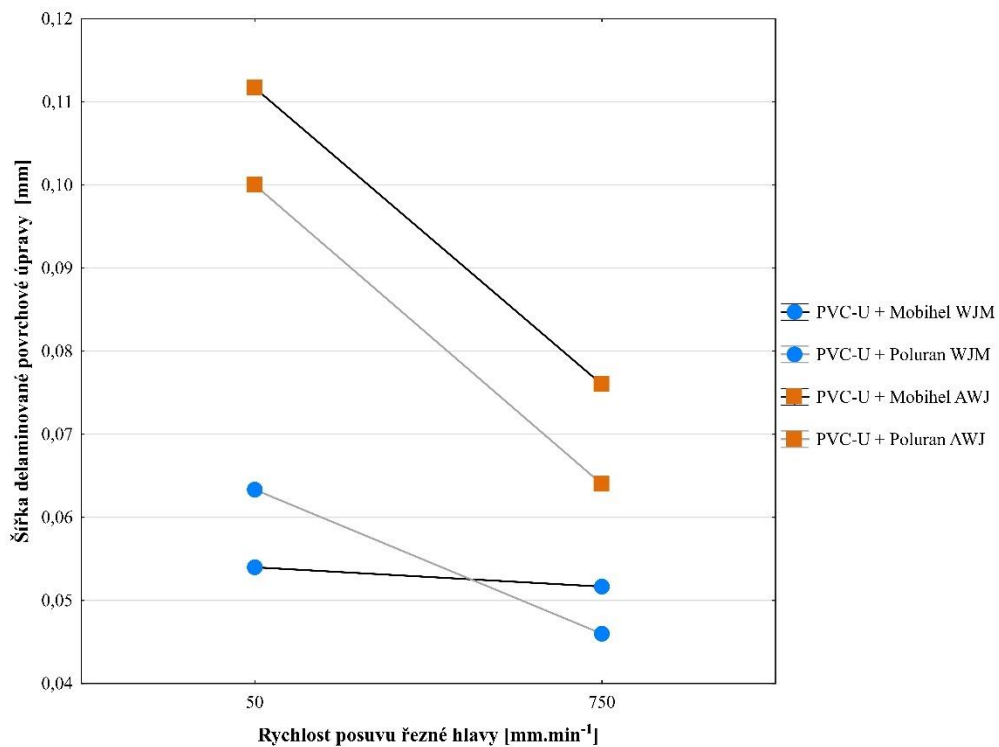
Při použití technologie AWJ dojde při rychlosti posuvu 50 mm.min⁻¹ k odstranění povrchové úpravy do vzdálenosti 0,08 – 0,11 mm od řezné hrany (obrázek 44). Při posuvu 750 mm.min⁻¹ se šířka odstraněné povrchové úpravy pohybuje v rozmezí 0,04 – 0,08 mm.

Obr. 44 Šířka delaminované povrchové úpravy materiálu PVC-U + Poluran paprskem typu AWJ: A: posuv 50 mm.min⁻¹, B: posuv 750 mm.min⁻¹ [Zdroj: vlastní]



V grafu na obrázku 45 je porovnání delaminované šířky povrchové úpravy od hrany spáry u materiálů PVC-U + Mobihel a PVC-U + Poluran v závislosti na rychlosti pojezdu řezné hlavy a typu paprsku. Z grafu lze usoudit, že paprsek typu WJM je k povrchové úpravě šetrnější než paprsek typu AWJ. Dále lze konstatovat, že s rostoucí rychlostí posuvu řezné hlavy klesá šířka obnaženého základního materiálu od hrany řezné spáry.

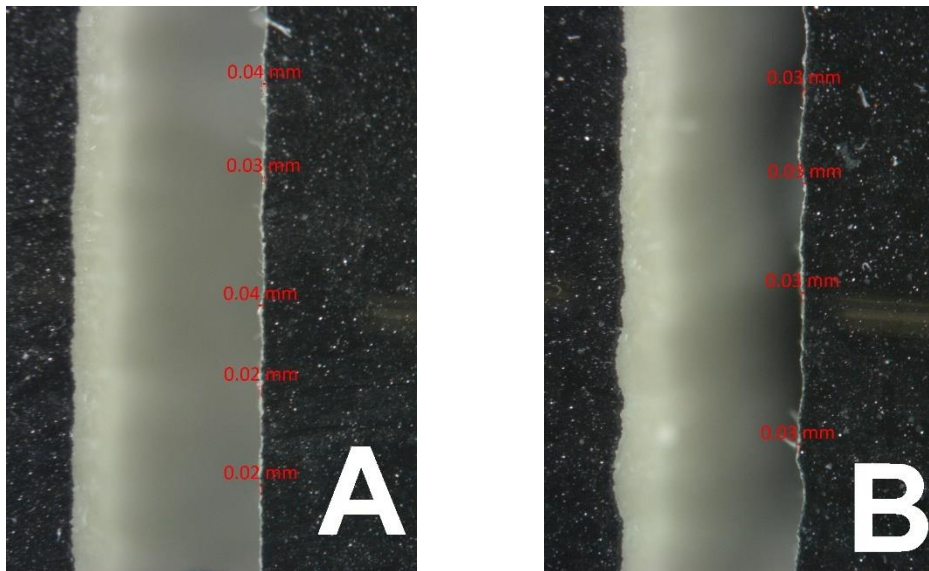
Obr. 45 Porovnání delaminované povrchové úpravy materiálu PVC-U s rozdílnou povrchovou úpravou



7.3.3 Materiál PP + nátěr Mobihel Chromind 2K

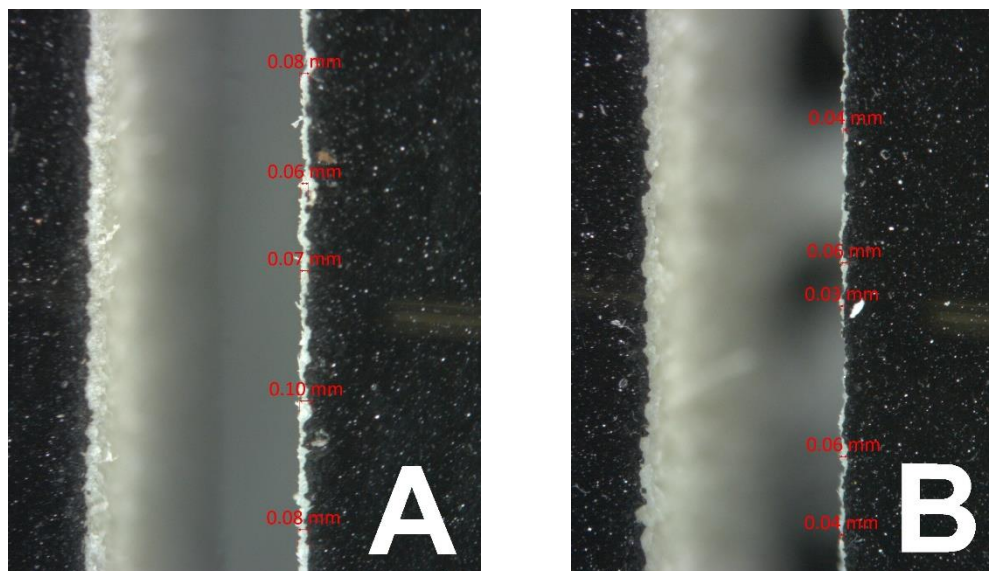
Z obrázku 46 plyne, že materiál Polypropylen vykazuje lepší přilnavost povrchové úpravy akrylátovým lakem než materiál Polyvinylchlorid. V případě využití technologie WJM a posuvu rychlosti $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ dosahovala šířka odstraněné povrchové úpravy od hrany spáry hodnot v intervalu 0,02 až 0,04 mm. Při rychlosti posuvu $750 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ se hodnota šířky delaminované vrstvy ustálila na 0,03 mm.

Obr. 46 Šířka delaminované povrchové úpravy materiálu PP + Mobihel paprskem typu WJM: A: posuv $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, B: posuv $750 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ [Zdroj: vlastní]



V případě abrazivního vodního paprsku (obrázek 47) se šířka delaminované povrchové úpravy při rychlosti $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ pohybovala v rozmezí 0,06 mm až 0,10 mm. Při posuvu $750 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ se šířka delaminované povrchové úpravy zmenšila na hodnoty 0,03 – 0,06 mm.

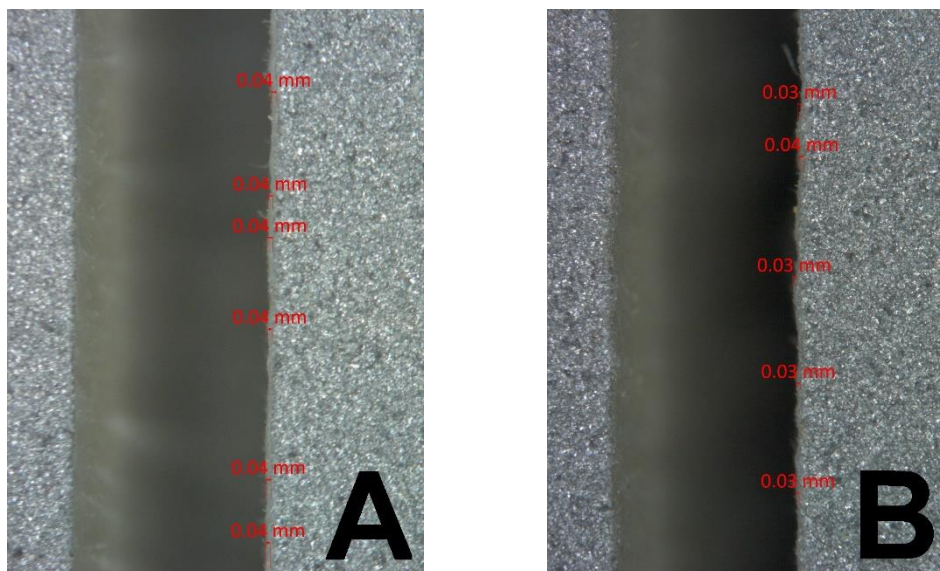
Obr. 47 Šířka delaminované povrchové úpravy materiálu PP + Mobihel paprskem typu AWJ: A: posuv $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, B: posuv $750 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ [Zdroj: vlastní]



7.3.4 Materiál PP + nátěr Poluran 790

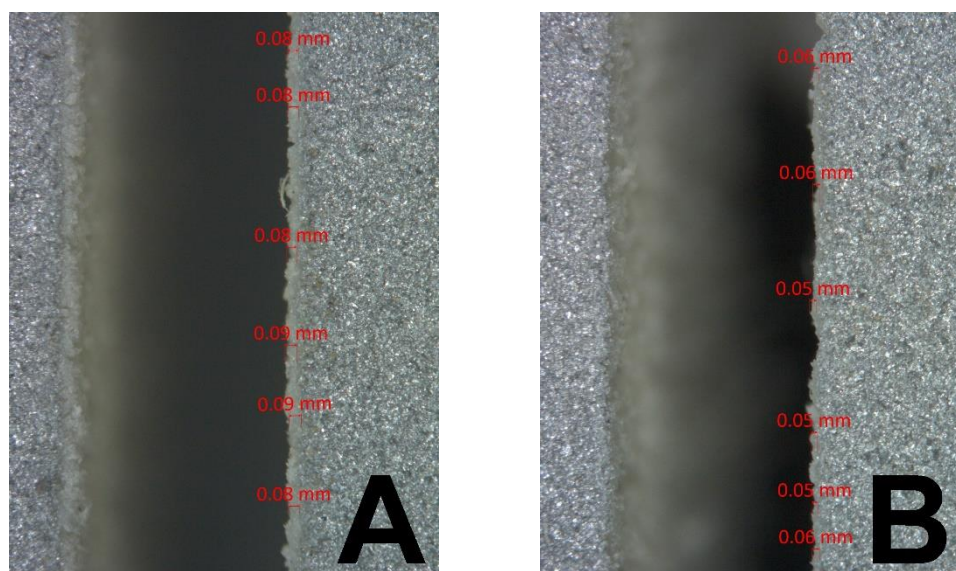
I v případě povrchové úpravy polyuretanovým lakem vykazuje materiál Polypropylen lepší přilnavost než materiál Polyvinylchlorid. Na obrázku 48 je zobrazena šířka poškozené povrchové úpravy vlivem působení paprsku typu WJM. Při posuvu $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ byla vzdálenost začátku povrchové úpravy od hrany řezné spáry $0,04 \text{ mm}$. V případě rychlosti posuvu $750 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ se tato hodnota snížila na $0,03 \text{ mm}$.

Obr. 48 Šířka delaminované povrchové úpravy materiálu PP + Poluran paprskem typu WJM: A: posuv $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, B: posuv $750 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ [Zdroj: vlastní]



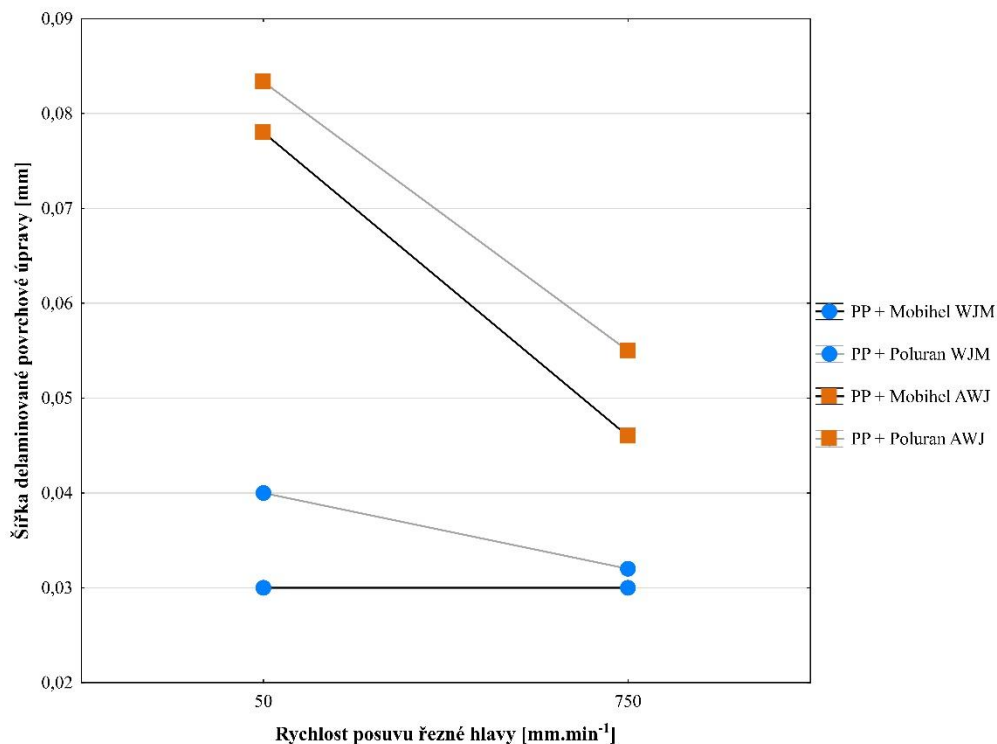
V případě technologie AWJ a rychlosti posuvu $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ se šířka delaminovaného nátěru pohybovala v intervalu $0,08 \text{ mm}$ až $0,09 \text{ mm}$. Se zrychlením posuvu na $750 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ se šířka snížila na $0,05$ až $0,06 \text{ mm}$.

Obr. 49 Šířka delaminované povrchové úpravy materiálu PP + Poluran paprskem typu AWJ: A: posuv $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, B: posuv $750 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ [Zdroj: vlastní]



Graf na obrázku 50 uvádí porovnání delaminované šířky povrchové úpravy od hrany spáry u materiálů PP + Mobihel a PP + Poluran při rychlosti pojezdu řezné hlavy 50 a 750 mm.min⁻¹ a typu paprsku WJM nebo AWJ. Opět platí, že čistý vodní paprsek je k povrchové úpravě šetrnější než abrazivní vodní paprsek. S rostoucí rychlostí posuvu řezné hlavy klesá šířka delaminované povrchové úpravy v okolí řezné spáry. Pouze v případě čistého vodního paprsku a povrchové úpravy akrylátovým lakem zůstává hodnota šířky odstraněné povrchové úpravy mezi oběma rychlostmi stejná.

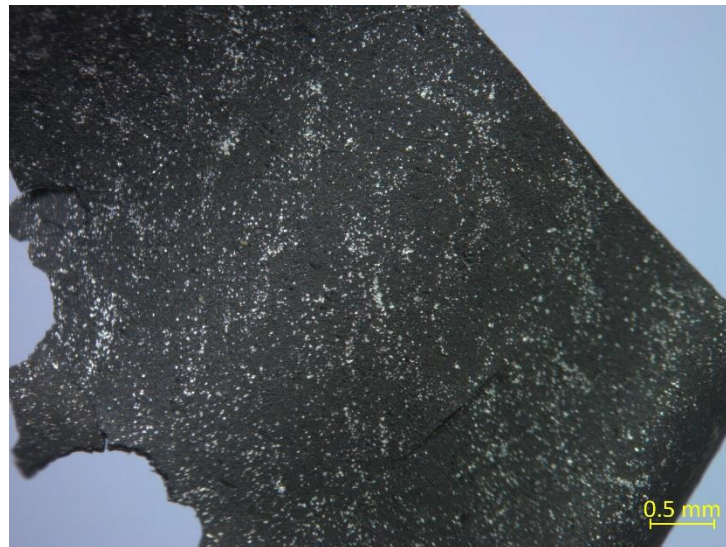
Obr. 50 Porovnání delaminované povrchové úpravy materiálu PP s rozdílnou povrchovou úpravou



7.3.5 Materiál POM-H + nátěr Mobihel Chromind 2K

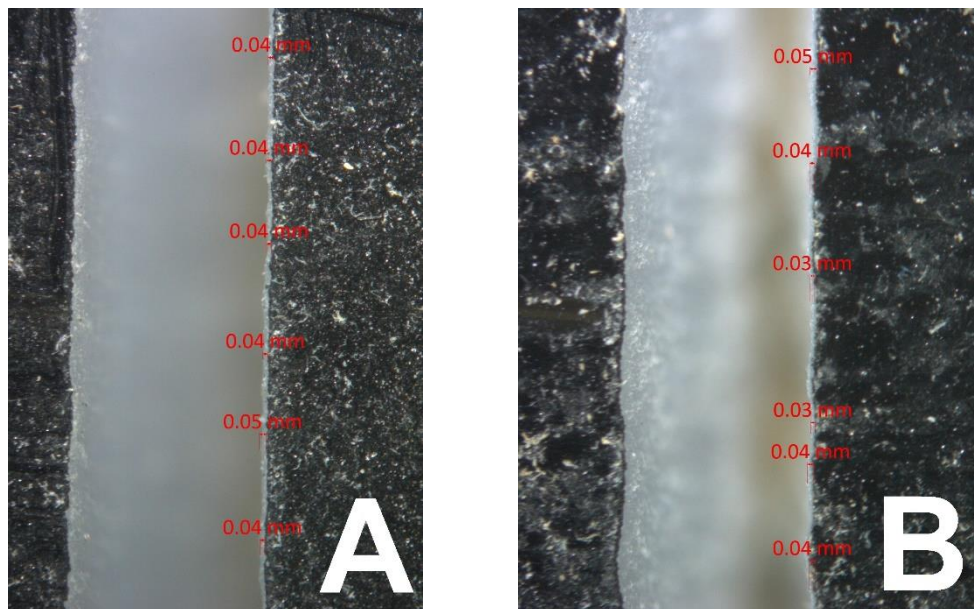
Při dělení materiálu POM-H došlo v oblasti průstřelu k rozsáhlé delaminaci vrstvy povrchové úpravy, viz obrázek 36. Po aktivaci pojezdu řezné hlavy se tento jev zastavil a v dalších částech řezu již byla povrchová úprava poškozena pouze v blízkém okolí řezných spár. Vzhled delaminované části povrchové úpravy pod stereoskopickým mikroskopem je zobrazen na obrázku 51.

Obr. 51 Vzhled delaminované povrchové úpravy z materiálu POM-H + Mobihel [Zdroj: vlastní]



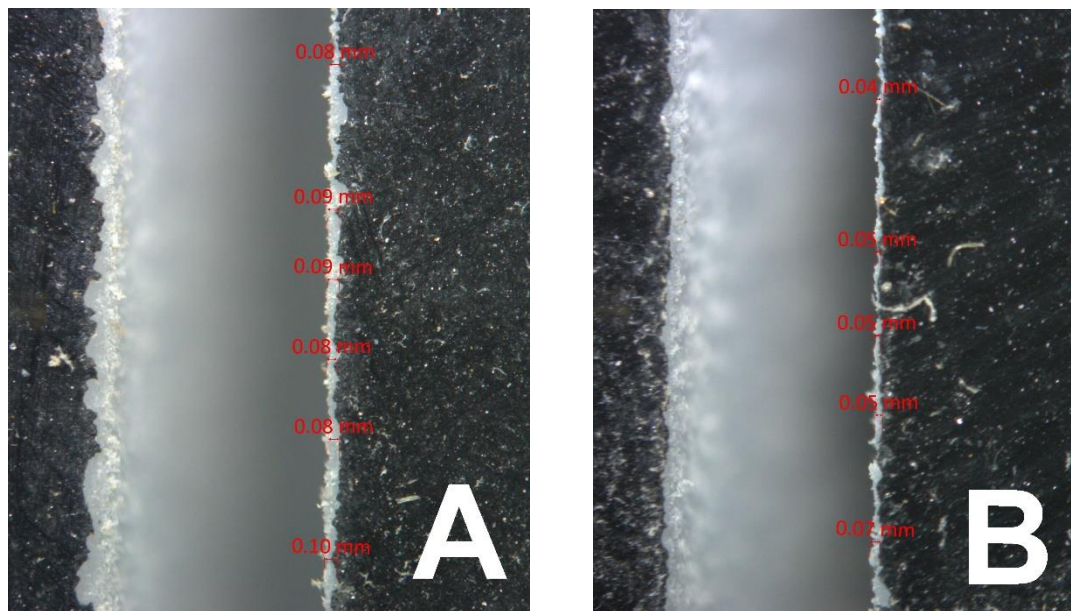
Obrázek 52 zobrazuje vzdálenost od hrany řezné spáry, ze které byl vlivem paprsku typu WJM odstraněn akrylátový lak. Při rychlosti posuvu $50 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ se šířka delaminované povrchové úpravy pohybovala v intervalu $0,04 - 0,05 \text{ mm}$. Při zvýšení posuvu na hodnotu $750 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ se tato šířka změnila na hodnoty $0,03 - 0,05 \text{ mm}$.

Obr. 52 Šířka delaminované povrchové úpravy materiálu POM-H + Mobihel paprskem typu WJM: A: posuv $50 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, B: posuv $750 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ [Zdroj: vlastní]



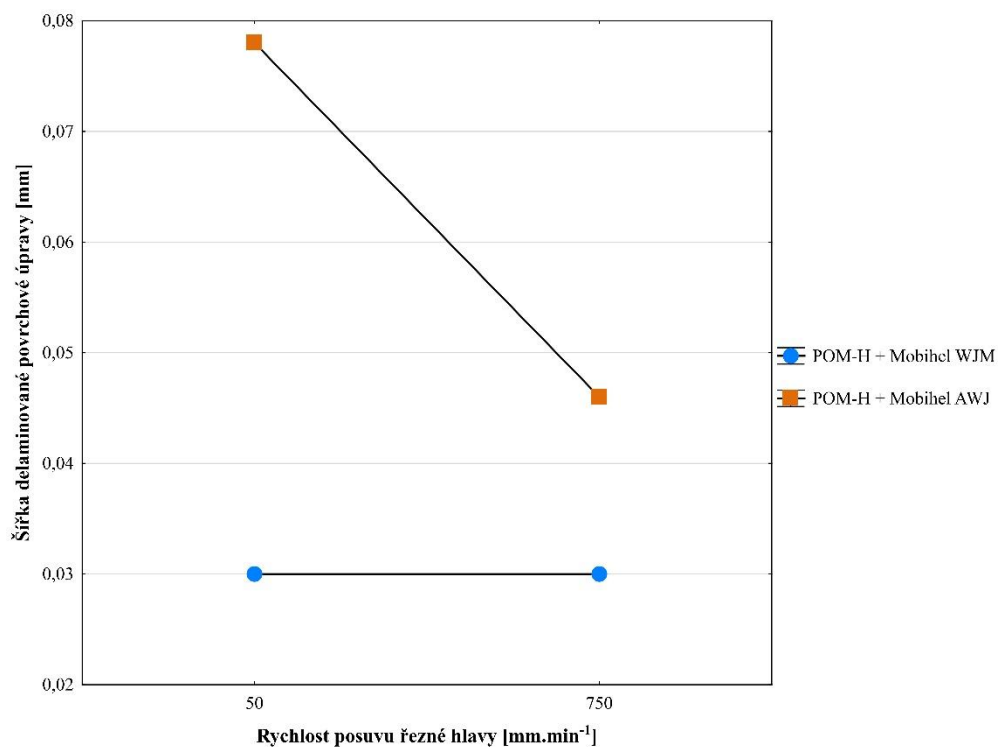
V případě působení paprsku typu AWJ (obrázek 53) se při rychlosti posuvu $50 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ povrchová úprava odstranila do vzdálenosti $0,08 - 0,10 \text{ mm}$. Při posuvu řezné hlavy $750 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ se hodnoty šířky odstraněné povrchové úpravy pohybovaly v rozmezí $0,04 \text{ mm}$ až $0,07 \text{ mm}$.

Obr. 53 Šířka delaminované povrchové úpravy materiálu POM-H + Mobihel paprskem typu AWJ: A: posuv 50 mm.min⁻¹, B: posuv 750 mm.min⁻¹ [Zdroj: vlastní]



V grafu na obrázku 54 je zobrazena závislost šířky delaminované povrchové úpravy při rychlostech posuvu 50 a 750 mm.min⁻¹ a typu paprsku WJM nebo AWJ. Při použití čistého vodního paprsku bez abraziva se delaminovaná šířka mezi oběma rychlostmi posuvu drží na konstantní hodnotě. V případě použití abrazivního vodního paprsku se šířka odstraněné povrchové úpravy s rostoucí rychlostí posuvu snižuje.

Obr. 54 Graf závislosti šířky delaminované vrstvy povrchové úpravy materiálu POM-H + Mobihel



8 Závěr

Tématem diplomové práce je řezání materiálů s povrchovou úpravou nekonvenční technologií vodního paprsku. V úvodu teoretické části je popsána podstata této technologie, popis paprsku s přidaným abrazivem a bez abraziva a dále charakteristika používaných druhů vodního paprsku. Následující kapitola pojednává o makromechanismu a mikromechanismu úběru obráběného materiálu. Je zde popsán vliv rychlosti posuvu řezné hlavy na profil řezu, mechanismus vytváření rýh na děleném povrchu a erozní působení paprsku na materiál. Závěr teoretické části se věnuje povrchovým úpravám polymerních materiálů s důrazem na organické povlaky z nátěrových hmot. Jsou zde popsány předúpravy plastových povrchů a nejčastější metody používané k povrchovým úpravám plastů.

Praktická část diplomové práce je věnována experimentálnímu posouzení parametrů vodního paprsku na dělený materiál a jeho povrchovou úpravu. Polymerní materiály je třeba někdy obrábět a docílit tak požadovaných rozměrů a přesnosti. Při jejich obrábění se však často setkáváme s překážkou z hlediska tepelného ovlivnění jednotlivých vrstev děleného materiálu při vzájemném tření řezného nástroje s povrchem obráběného materiálu. Z uvedeného důvodu je vhodné využít technologii vodního paprsku, která vytváří tzv. studený řez, tzn. že nedochází k tepelnému ovlivnění polymerního materiálu a jeho povrchové úpravy.

V experimentální části byly vytvořené spáry na polymerních materiálech s povrchovou úpravou hodnoceny pod stereoskopickým mikroskopem a byla vyhodnocována šířka řezné spáry na vstupu a výstupu paprsku z materiálu. Dále byla vypočtena hodnota úhlu zkosení v závislosti na nastavení řezných parametrů vodního paprsku a byl posuzován vliv vodního paprsku na povrchovou úpravu na jednotlivých vzorcích.

Výsledky měření šířky řezné spáry na vstupu a výstupu paprsku z materiálu jsou shrnuty v následujících bodech:

- Měření prokázalo vliv rychlosti posuvu řezné hlavy vodního paprsku typu WJM i AWJ na šířku řezné spáry. Závěr je podložen výsledky prezentovanými v grafech a na obrázcích, které zobrazují samotné řezné spáry (Obr. 27, 28, 31, 33 a 36).
- Paprsek typu AWJ vytvářel na straně vstupu paprsku do materiálu při všech rychlostech posuvu nepatrně širší řeznou spáru ve srovnání s paprskem typu WJM.
- Vodní paprsek bez abraziva vykazoval velmi nízkou efektivitu při obrábění všech testovaných materiálů. Na straně výstupu WJM z materiálů nebylo možné změřit šířku řezné spáry z důvodu silného znečištění hran spáry ořepky řezaného materiálu, které

vytvářely velmi nepravidelný tvar řezné spáry. U materiálu POM-H nedošlo při rychlostech posuvu 750 a 1000 mm.min⁻¹ k prořezání materiálu.

- Z grafů na obrázcích 30 a 35 vyplývá, že rozdílná povrchová úprava na stejném základním materiálu má vliv na šířku řezné spáry na straně vstupu paprsku do materiálu při působení paprsku typu WJM i AWJ.
- Z hlediska statistického testování vlivu rychlosti posuvu řezné hlavy na šířku řezné spáry se prokázal statisticky významný rozdíl u technologie WJM na vstupu paprsku do materiálu a u technologie AWJ na vstupu i výstupu paprsku z materiálu. Bylo tedy prokázáno, že rychlost pojezdu řezné hlavy ovlivňuje šířku řezné spáry.

V následujících bodech jsou shrnuty výsledky výpočtů úhlu zkosení řezné spáry při působení paprsku typu AWJ:

- Při rychlosti posuvu 50 mm.min⁻¹ se úhly zkosení řezné spáry u všech testovaných materiálů blíží k optimálnímu tvaru, tedy ke kolmému řezu. S rostoucí rychlostí posuvu se úhel zkosení zvyšuje a vytváří v materiálu průřez tvaru „V“. Výjimkou je pouze materiál PVC-U + Poluran, u kterého došlo při rychlosti posuvu 1000 mm.min⁻¹ k poklesu úhlu zkosení v porovnání s rychlostí posuvu 750 mm.min⁻¹.
- Z grafů na obrázcích 38 a 39 vyplývá, že vzorky ze stejného základního materiálu s povrchovou úpravou Poluran 790 vykazují při všech rychlostech posuvu vyšší hodnotu úhlu zkosení řezné spáry než vzorky s povrchovou úpravou Mobihel Chromind 2K.

V závěru práce byl prodiskutován vliv řezných parametrů vodního paprsku na povrchovou úpravu v okolí řezné spáry na straně vstupu paprsku do materiálu. Poznatky jsou shrnuty v následujících bodech:

- S rostoucí rychlostí posuvu řezné hlavy klesá šířka delaminované povrchové úpravy od hrany řezné spáry. Výjimku tvoří vzorky PP + Mobihel a POM-H + Mobihel při obrábění paprskem typu WJM, u kterých se šířka delaminované vrstvy od hrany řezné spáry s rostoucí rychlostí posuvu řezné hlavy neliší.
- Z hlediska vlivu na povrchovou úpravu vyplývá, že čistý vodní paprsek je k nanesené povrchové úpravě šetrnější než abrazivní vodní paprsek, protože v případě využití paprsku typu WJM je ve všech případech šířka delaminované povrchové úpravy od hrany řezné spáry menší než v případě využití paprsku typu AWJ. Tento závěr je podložen grafy na obrázcích 45 a 50.

9 Seznam použité literatury

- [1] HÍREŠ, Ondrej, Michal HATALA a Sergej HLOCH. *Delenie kovových materiálov okružnou pílou, vodným prúdom a plazmovým oblúkom*. 1. vyd. Ostrava: Jiří Pustina, 2007. ISBN 978-80-8073-769-6.
- [2] BURNHAM, Chip. *Flow: The Ultimate Guide to Waterjet* [online]. 2015, , 1-9 [cit. 2021-01-28]. Dostupné z: <https://www.flowwaterjet.cz/Forms/eBook-Ultimate-Guide-to-Waterjet-Response-cs.aspx>
- [3] SARAVANAN, S., V. VIJAYAN, S.T. Jaya SUTHAHAR, A.V. BALAN, S. SANKAR a M. RAVICHANDRAN. A review on recent progresses in machining methods based on abrasive water jet machining. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2020, **2019**(21), 116-122 [cit. 2021-03-25]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2019.05.373
- [4] *Alcom Alval: O technologii řezání vodním paprskem* [online]. Bruntál, 2019 [cit. 2021-01-28]. Dostupné z: <https://www.vodnipaprsek.com/o-vodnim-paprsku/>
- [5] *OMAX: What is Waterjet Cutting?* [online]. Kent, 2021 [cit. 2021-01-28]. Dostupné z: <https://www.omax.com/learn/waterjet-cutting>
- [6] *WJTA: Jet News* [online]. St. Louis, 2007 [cit. 2021-01-29]. Dostupné z: http://www.wjta.org/images/wjta/JetNews/JetNews_Dec07.pdf
- [7] MOLITORIS, Matúš, Ján PITEĽ, Alexander HOŠOVSKÝ, Mária TÓTHOVÁ a Kamil ŽIDEK. A Review of Research on Water Jet with Slurry Injection. *Procedia Engineering* [online]. 2016, **149**, 333-339 [cit. 2021-02-22]. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2016.06.675
- [8] *Vodní paprsek ... - výzkum, vývoj, aplikace: sborník přednášek konference o technologii vodního paprsku = Water Jet ... - Research, Development, Applications : proceedings of the conference on water jetting technology*. Ostrava: Ústav geoniky AV ČR, v.v.i., 2009, . ISBN 978-80-86407-23-4.
- [9] HUMÁR, Anton. *Technologie I-Technologie obrábění-3.část: Interaktivní multimediální text pro bakalářský a magisterský studijní program*. [online]. 2005 [cit. 2021-01-29]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/13479-Technologie-i-technologie-obrabeni-3-cast.html>. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [10] DVOŘÁKOVÁ, Jana a Jaromír DVOŘÁK. *Technika, technologie: Technologie WJM/AWJ pro řezání pevných materiálů vodním paprskem II*. [online]. 2008 [cit. 2021-02-03]. Dostupné z: <http://www.glassrevue.com/news.asp@nid=6709&cid=6.html>
- [11] FOLDYNA, Josef. Use of Acoustic Waves for Pulsating Water Jet Generation. BEGHI, Marco G., ed. *Acoustic Waves - From Microdevices to Helioseismology* [online]. InTech, 2011 [cit. 2021-02-11]. ISBN 978-953-307-572-3. Dostupné z: doi:10.5772/18862
- [12] RADOVANOVIC, Miroslav. Multi-Objective Optimization of Abrasive Water Jet Cutting Using MOGA. *Procedia Manufacturing* [online]. 2020, **47**, 781-787 [cit. 2021-02-12]. ISSN 23519789. Dostupné z: doi:10.1016/j.promfg.2020.04.241

- [13] ZELENÁK, M., J. FOLDYNA, M. LINDE, F. PUDE, T. RENTSCH, J. FERNOLENDT a H.U. POORT. Measurement and Analysis of Abrasive Particles Velocities in AWSJ. *Procedia Engineering* [online]. 2016, **149**, 77-86 [cit. 2021-03-03]. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2016.06.641
- [14] JOEL, C., Linda JOEL, S. MUTHUKUMARAN a P. MATILDA SHANTHINI. Parametric optimization of abrasive water jet machining of C360 brass using MOTLBO. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2020 [cit. 2021-02-12]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2020.07.471
- [15] PEREC, Andrzej. Abrasive Suspension Water Jet Cutting Optimization Using Orthogonal Array Design. *Procedia Engineering* [online]. 2016, **149**, 366-373 [cit. 2021-03-04]. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2016.06.680
- [16] MARTINEC, Petr. *Abrasives for AWJ cutting*. Ostrava: Institute of Geonics Academy of Sciences of the Czech Republic, 2002. ISBN 80-86407-02-0.
- [17] FOLDYNA, J., L. SITEK, J. ŠČUČKA, P. MARTINEC, J. VALÍČEK a K. PÁLENÍKOVÁ. Effects of pulsating water jet impact on aluminium surface. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2009, **209**(20), 6174-6180 [cit. 2021-01-30]. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2009.06.004
- [18] LEHOČKA, D., J. KLICH, J. FOLDYNA, S. HLOCH, J.B. KROLCZYK, J. CARACH a G.M. KROLCZYK. Copper alloys disintegration using pulsating water jet. *Measurement* [online]. 2016, **82**, 375-383 [cit. 2021-02-02]. ISSN 02632241. Dostupné z: doi:10.1016/j.measurement.2016.01.014
- [19] NAG, Akash, Sergej HLOCH, Dominik ČUHA, Amit Rai DIXIT, Hakan TOZAN, Jana PETRŮ, Monika HROMASOVÁ a Miroslav MÜLLER. Acoustic chamber length performance analysis in ultrasonic pulsating water jet erosion of ductile material. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2019, **47**, 347-356 [cit. 2021-02-02]. ISSN 15266125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2019.10.008
- [20] MÜLLER, Miroslav, Roberto D'AMATO a Anna RUDAWSKA. Machining of polymeric composites by means of abrasive water-jet technology. In: *Engineering for Rural Development* [online]. Jelgava, 2017, s. 121–127 [cit. 2021-03-10]. ISSN 16915976. Dostupné z: doi:10.22616/ERDev2017.16.N021
- [21] KULEKCI, Mustafa Kemal. Processes and apparatus developments in industrial waterjet applications. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2002, **42**(12), 1297-1306 [cit. 2021-03-10]. ISSN 08906955. Dostupné z: doi:10.1016/S0890-6955(02)00069-X
- [22] NATARAJAN, Yuvaraj, Pradeep Kumar MURUGESAN, Mugilvalavan MOHAN a Shakeel Ahmed LIYAKATH ALI KHAN. Abrasive Water Jet Machining process: A state of art of review. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2019, **2019**(49), 271-322 [cit. 2021-03-25]. ISSN 15266125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2019.11.030
- [23] KRAJCARZ, Daniel, Damian BAŃKOWSKI a Piotr MŁYNARCZYK. The Effect of Traverse Speed on Kerf Width in AWJ Cutting of Ceramic Tiles. *Procedia Engineering* [online]. 2017, **2017**(192), 469-473 [cit. 2021-03-29]. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2017.06.081

- [24] MOHYLA, Miroslav. *Technologie povrchových úprav kovů*. 2. vyd. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2000. ISBN 80-7078-953-0.
- [25] KREIBICH, Viktor a Jan KUDLÁČEK. Povrchové úpravy z pohledu vývojových etap a potřeb. *Povrcháři* [online]. 2019, **2019**(2), 2-4 [cit. 2021-03-12]. ISSN 1802-9833. Dostupné z: http://povrchari.cz/kestazeni/201902_povrchari.pdf
- [26] KRAUS, Václav. *Povrchy a jejich úpravy*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2009. ISBN 978-80-7082-668-3.
- [27] JONES, Frank N., Mark E. NICHOLS, Socrates Peter PAPPAS a Dean C. WEBSTER. *Organic Coatings: Science and Technology*. 4th ed. John Wiley & Sons, Incorporated, 2017. ISBN 9781119026891.
- [28] MLEZIVA, Josef. *Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 1. vyd. Praha: Sobotáles, 1993. ISBN 80-901-5704-1.
- [29] WOLF, Rory A. *Plastic surface modification: surface treatment and adhesion*. Munich: Hanser, 2010. ISBN 978-1-56990-447-3.
- [30] OSTRÁ, Vladislava. Pokovování plastů. *Povrcháři* [online]. 2009, **2009**(9), 4-6 [cit. 2021-03-17]. ISSN 1802-9833. Dostupné z: http://www.povrchari.cz/kestazeni/200909_povrchari.pdf
- [31] JOHANSSON, Kenth S. Surface Modification of Plastics. *Applied Plastics Engineering Handbook* [online]. 2nd ed. Oxford: Elsevier, 2017, s. 443-487 [cit. 2021-03-17]. ISBN 9780323390408. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-323-39040-8.00020-1
- [32] AL, Thomas. PAINTING PLASTIC. *Automotive Body Repair News* [online]. Cleveland, 2012, **2012**(1), 38-43 [cit. 2021-03-19]. ISSN 0192-0995. Dostupné z: <http://ezproxy.techlib.cz/login?url=https://www-proquest-com.ezproxy.techlib.cz/trade-journals/painting-plastic/docview/1501442275/se-2?accountid=119841>
- [33] *Plastics.cz* [online]. Přelouč, 2021 [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <https://www.plastics.cz/>
- [34] MÜLLER, Miroslav, Petr VALÁŠEK a Viktor KOLÁŘ. Research on Application of Technology Using Water Jet on Machining of Polymeric Composite Biological-Reinforced Materials. *Manufacturing Technology* [online]. 2018, **18**(4), 630-634 [cit. 2021-05-02]. ISSN 12132489. Dostupné z: doi:10.21062/ujep/151.2018/a/1213-2489/MT/18/4/630
- [35] KOLÁŘ, Viktor. *Technologie přípravy kompozitních materiálů a výzkum jejich vlastností*. Praha, 2020. Disertační práce. Česká zemědělská univerzita v Praze.

10 Seznam obrázků

Obr. 1 Příklady využití vodního paprsku [2]	2
Obr. 2 Vývoj technologie vodního paprsku [7]	4
Obr. 3 Obtokový systém pro generování AWSJ [13]	8
Obr. 4 Řezací hlavy pro vytvoření vysokorychlostního vodního paprsku [15].....	9
Obr. 5 Dopad paprsku na povrch tělesa [17]	10
Obr. 6 Vznik pulzního vodního paprsku pomocí sonotrody [19].....	12
Obr. 7 Pulzující vodní paprsek [17].....	12
Obr. 8 Schéma procesu dělení vodním paprskem [1]	14
Obr. 9 Zóny řezaného povrchu [22]	15
Obr. 10 Řezaný povrch hořčikové slitiny [22].....	16
Obr. 11 Tvary průřezů v závislosti na rychlosti posuvu řezací hlavy [23].....	17
Obr. 12 Odstraňování materiálu obrobku erozním působením pevné částice [1].....	18
Obr. 13 Interakce abrazivní částice s tvárným nebo křehkým materiálem obrobku [22]	18
Obr. 14 Mechanismus úběru tvárného materiálu při obrábění metodou AWJ [22].....	19
Obr. 15 Působení sférických abrazivních částic na povrch tvárného materiálu [22].....	19
Obr. 16 Napařování a naprašování kovů na plast [30].....	27
Obr. 17 Vzorky plastů před povrchovou úpravou.....	31
Obr. 18 Vzorky plastů po povrchové úpravě organickými nátěry	31
Obr. 19 Zařízení pro dělení vodním paprskem AWAC CNC AWJ CT 0806	32
Obr. 20 Rozměry zkušební vzorku	32
Obr. 21 Průstřel materiálu	34
Obr. 22 Stereoskopický mikroskop Zeiss Stemi 508 s kamerou AxioCam	35
Obr. 23 Postup měření šířky řezné spáry	36
Obr. 24 Strana výstupu paprsku z materiálu.....	37
Obr. 25 Úkos řezné spáry	38
Obr. 26 Závislost šířky řezné spáry na rychlosti posuvu řezné hlavy a typu vodního paprsku (mat. PVC-U + Mobihel Chromind 2K).....	40
Obr. 27 Řezné spáry v materiálu PVC-U + Mobihel Chromind 2K	41
Obr. 28 Řezné spáry v materiálu PVC-U + Poluran 790	42
Obr. 29 Závislost šířky řezné spáry na rychlosti posuvu řezné hlavy a typu vodního paprsku (mat. PVC-U + Poluran 790).....	43
Obr. 30 Porovnání šířky řezných spár na straně vstupu paprsku do materiálu PVC-U s rozdílnou povrchovou úpravou.....	44
Obr. 31 Řezné spáry v materiálu PP + Mobihel Chromind 2K.....	45

Obr. 32 Závislost šířky řezné spáry na rychlosti posuvu řezné hlavy a typu vodního paprsku (mat. PP + Mobihel Chromind 2K).....	46
Obr. 33 Řezné spáry v materiálu PP + Poluran 790.....	47
Obr. 34 Závislost šířky řezné spáry na rychlosti posuvu řezné hlavy a typu vodního paprsku (mat. PP + Poluran 790).....	48
Obr. 35 Porovnání šířky řezných spár na straně vstupu paprsku do materiálu PP s rozdílnou povrchovou úpravou	49
Obr. 36 Řezné spáry v materiálu POM-H + Mobihel Chromind 2K	50
Obr. 37 Závislost šířky řezné spáry na rychlosti posuvu řezné hlavy a typu vodního paprsku (mat. POM-H + Mobihel Chromind 2K).....	51
Obr. 38 Porovnání úhlu zkosení řezné spáry materiálů PVC-U s rozdílnou povrch. úpravou	54
Obr. 39 Porovnání úhlu zkosení řezné spáry materiálů PP s rozdílnou povrchovou úpravou	55
Obr. 40 Úhel zkosení řezné spáry mat. POM-H s povrch. úpravou Mobihel Chromind 2K	56
Obr. 41 Šířka delaminované povrchové úpravy materiálu PVC-U + Mobihel paprskem typu WJM...57	
Obr. 42 Šířka delaminované povrchové úpravy materiálu PVC-U + Mobihel paprskem typu AWJ ...58	
Obr. 43 Šířka delaminované povrchové úpravy materiálu PVC-U + Poluran paprskem typu WJM....58	
Obr. 44 Šířka delaminované povrchové úpravy materiálu PVC-U + Poluran paprskem typu AWJ59	
Obr. 45 Porovnání delaminované povrch. úpravy materiálu PVC-U s rozdílnou povrch. úpravou	59
Obr. 46 Šířka delaminované povrchové úpravy materiálu PP + Mobihel paprskem typu WJM	60
Obr. 47 Šířka delaminované povrchové úpravy materiálu PP + Mobihel paprskem typu AWJ.....	60
Obr. 48 Šířka delaminované povrchové úpravy materiálu PP + Poluran paprskem typu WJM	61
Obr. 49 Šířka delaminované povrchové úpravy materiálu PP + Poluran paprskem typu AWJ.....	61
Obr. 50 Porovnání delaminované povrchové úpravy mat. PP s rozdílnou povrch. úpravou	62
Obr. 51 Vzhled delaminované povrchové úpravy z materiálu POM-H + Mobihel.....	63
Obr. 52 Šířka delaminované povrchové úpravy materiálu POM-H + Mobihel paprskem typu WJM..63	
Obr. 53 Šířka delaminované povrchové úpravy materiálu POM-H + Mobihel paprskem typu AWJ ..64	
Obr. 54 Graf závislosti šířky delaminované vrstvy povrch. úpravy mat. POM-H + Mobihel.....	64

11 Seznam tabulek

Tab. 1 Technologické parametry jednotlivých řezů.....	33
Tab. 2 Měřené a neměřené spáry na straně výstupu paprsku z materiálu.....	37
Tab. 3 Statistické vyhodnocení šířky řezné spáry polymerních materiálů s povrchovou úpravou dle ANOVA F-testu s uvedeným parametrem p na hladině významnosti α 0,05	52
Tab. 4 Výsledky měření úhlu řezné spáry.....	56

12 Přílohy

Naměřené a vypočtené hodnoty

PVC-U + Mobihel Chromind 2K, šířka spáry na vstupu paprsku do materiálu

Šířka spáry [mm]		Rychlost posuvu řezné hlavy [mm.min ⁻¹]							
		50	50	250	250	750	750	1000	1000
		Typ paprsku							
		WJM	AWJ	WJM	AWJ	WJM	AWJ	WJM	AWJ
Číslo měření	1	1,47	1,67	1,40	1,57	1,40	1,46	1,37	1,47
	2	1,46	1,66	1,38	1,56	1,38	1,45	1,37	1,45
	3	1,44	1,64	1,40	1,58	1,40	1,46	1,35	1,44
	4	1,46	1,63	1,41	1,59	1,39	1,44	1,36	1,43
	5	1,46	1,66	1,41	1,53	1,38	1,49	1,33	1,44
	6	1,45	1,63	1,44	1,54	1,38	1,47	1,37	1,44
	7	1,46	1,64	1,42	1,54	1,39	1,47	1,33	1,43
	8	1,45	1,64	1,42	1,54	1,41	1,45	1,36	1,42
	9	1,45	1,65	1,42	1,55	1,38	1,44	1,34	1,45
	10	1,46	1,66	1,43	1,53	1,43	1,46	1,34	1,42
	11	1,44	1,66	1,43	1,53	1,42	1,45	1,37	1,42
	12	1,45	1,65	1,42	1,50	1,38	1,42	1,36	1,44
	13	1,46	1,65	1,41	1,51	1,38	1,41	1,34	1,42
	14	1,44	1,61	1,40	1,51	1,39	1,43	1,35	1,43
	15	1,42	1,63	1,39	1,50	1,38	1,41	1,34	1,44
	16	1,41	1,67	1,40	1,49	1,40	1,45	1,35	1,40
	17	1,43	1,60	1,39	1,50	1,38	1,46	1,33	1,40
	18	1,44	1,64	1,39	1,52	1,38	1,46	1,36	1,41
	19	1,44	1,63	1,40	1,47	1,37	1,45	1,35	1,41
	20	1,42	1,61	1,40	1,48	1,36	1,47	1,37	1,38
	21	1,43	1,63	1,42	1,49	1,40	1,47	1,36	1,39
	22	1,44	1,65	1,40	1,49	1,36	1,43	1,34	1,43
	23	1,41	1,61	1,43	1,48	1,38	1,45	1,36	1,38
	24	1,41	1,62	1,39	1,49	1,41	1,45	1,35	1,39
	25	1,41	1,62	1,41	1,50	1,37	1,47	1,33	1,41
	26	1,45	1,61	1,39	1,48	1,39	1,43	1,33	1,42
	27	1,41	1,64	1,43	1,49	1,37	1,41	1,32	1,40
	28	1,43	1,65	1,41	1,49	1,37	1,43	1,36	1,39
	29	1,41	1,62	1,43	1,48	1,39	1,46	1,37	1,40
	30	1,43	1,64	1,43	1,50	1,40	1,45	1,34	1,41
	31	1,45	1,62	1,41	1,48	1,37	1,42	1,33	1,42
	32	1,44	1,61	1,39	1,49	1,37	1,43	1,34	1,43
	33	1,43	1,63	1,39	1,49	1,36	1,41	1,37	1,43
Průměr		1,44	1,64	1,41	1,51	1,39	1,45	1,35	1,42
Směr. odchylka		0,01783	0,0187	0,015717	0,031473	0,016713	0,020602	0,015073	0,021169

PVC-U + Mobihel Chromind 2K, šířka spáry na výstupu paprsku z materiálu

Šířka spáry [mm]		Posuv řezné hlavy [mm.min ⁻¹]							
		50	50	250	250	750	750	1000	1000
		Typ paprsku							
		WJM	AWJ	WJM	AWJ	WJM	AWJ	WJM	AWJ
Číslo měření	1		1,55		1,26		1,01		0,96
	2		1,56		1,29		1,02		0,98
	3		1,56		1,27		1,03		1,04
	4		1,56		1,25		1,01		1,01
	5		1,55		1,29		1,03		0,98
	6		1,54		1,27		1,02		0,97
	7		1,54		1,27		1,05		0,98
	8		1,55		1,26		1,02		0,98
	9		1,53		1,25		1,02		0,95
	10		1,51		1,26		1,08		0,97
	11		1,52		1,28		1,00		0,96
	12		1,55		1,25		1,00		0,95
	13		1,56		1,24		1,02		1,02
	14		1,57		1,25		1,02		1,00
	15		1,54		1,27		1,05		0,95
	16		1,53		1,27		1,03		0,96
	17		1,55		1,27		1,05		0,99
	18		1,54		1,25		1,03		0,97
	19		1,52		1,25		0,99		0,95
	20		1,52		1,28		0,99		0,93
	21		1,56		1,26		1,04		0,95
	22		1,54		1,25		0,99		0,98
	23		1,54		1,26		1,06		0,97
	24		1,55		1,25		1,04		0,96
	25		1,54		1,24		1,03		0,97
	26		1,52		1,27		1,02		0,95
	27		1,54		1,23		1,03		0,97
	28		1,53		1,26		1,09		0,93
	29		1,54		1,27		1,01		0,97
	30		1,55		1,28		1,04		0,96
	31		1,53		1,26		1,03		0,96
	32		1,54		1,27		1,02		0,98
	33		1,56		1,24		1,02		0,94
Průměr			1,54		1,26		1,03		0,97
Směr. odchylka			0,014304		0,014304		0,022628		0,023347

PVC-U + Poluran 790, šířka spáry na vstupu paprsku do materiálu

Šířka spáry [mm]		Rychlost posuvu řezné hlavy [mm.min ⁻¹]							
		50	50	250	250	750	750	1000	1000
		Typ paprsku							
		WJM	AWJ	WJM	AWJ	WJM	AWJ	WJM	AWJ
Číslo měření	1	1,56	1,65	1,47	1,57	1,43	1,51	1,41	1,50
	2	1,55	1,65	1,49	1,56	1,41	1,55	1,41	1,49
	3	1,55	1,62	1,51	1,57	1,41	1,52	1,42	1,47
	4	1,54	1,64	1,49	1,55	1,44	1,49	1,40	1,46
	5	1,55	1,60	1,51	1,51	1,42	1,51	1,41	1,46
	6	1,56	1,59	1,50	1,52	1,43	1,52	1,43	1,44
	7	1,57	1,57	1,51	1,53	1,46	1,50	1,44	1,48
	8	1,55	1,59	1,48	1,49	1,45	1,53	1,42	1,44
	9	1,55	1,57	1,50	1,49	1,45	1,50	1,42	1,46
	10	1,56	1,59	1,48	1,52	1,44	1,53	1,42	1,44
	11	1,56	1,61	1,48	1,50	1,45	1,50	1,40	1,43
	12	1,54	1,64	1,51	1,48	1,42	1,49	1,43	1,41
	13	1,55	1,63	1,50	1,52	1,43	1,50	1,42	1,39
	14	1,55	1,60	1,49	1,50	1,43	1,52	1,42	1,40
	15	1,55	1,57	1,52	1,50	1,44	1,52	1,38	1,42
	16	1,55	1,57	1,50	1,50	1,44	1,53	1,39	1,42
	17	1,56	1,56	1,49	1,52	1,42	1,50	1,42	1,42
	18	1,55	1,54	1,47	1,50	1,44	1,47	1,39	1,44
	19	1,54	1,55	1,48	1,51	1,43	1,49	1,39	1,44
	20	1,55	1,56	1,49	1,51	1,42	1,50	1,40	1,43
	21	1,55	1,57	1,48	1,55	1,43	1,49	1,41	1,44
	22	1,54	1,57	1,50	1,55	1,44	1,50	1,39	1,45
	23	1,55	1,58	1,49	1,53	1,42	1,48	1,41	1,44
	24	1,56	1,55	1,47	1,54	1,44	1,53	1,42	1,45
	25	1,56	1,56	1,49	1,54	1,42	1,53	1,43	1,45
	26	1,53	1,66	1,48	1,55	1,43	1,52	1,40	1,44
	27	1,53	1,60	1,48	1,53	1,42	1,50	1,34	1,43
	28	1,54	1,59	1,47	1,54	1,42	1,52	1,39	1,40
	29	1,53	1,58	1,47	1,54	1,43	1,50	1,40	1,42
	30	1,54	1,62	1,48	1,54	1,42	1,50	1,39	1,46
	31	1,53	1,57	1,47	1,55	1,44	1,50	1,39	1,46
	32	1,53	1,61	1,46	1,56	1,42	1,48	1,39	1,44
	33	1,54	1,58	1,47	1,55	1,43	1,49	1,40	1,44
Průměr		1,55	1,59	1,49	1,53	1,43	1,51	1,41	1,44
Směr. odchylka		0,01045	0,03156	0,01482	0,02434	0,011899	0,01769	0,01892	0,024216

PVC-U + Poluran 790, šířka spáry na výstupu paprsku z materiálu

Šířka spáry [mm]		Posuv řezné hlavy [mm.min ⁻¹]							
		50	50	250	250	750	750	1000	1000
		Typ paprsku							
		WJM	AWJ	WJM	AWJ	WJM	AWJ	WJM	AWJ
Číslo měření	1	Výrazně nepravidelný tvar => neměřitelné	1,47	Výrazně nepravidelný tvar => neměřitelné	1,21	Výrazně nepravidelný tvar => neměřitelné	0,96	Výrazně nepravidelný tvar => neměřitelné	0,92
	2		1,44		1,19		0,96		0,94
	3		1,47		1,16		1,00		0,95
	4		1,46		1,17		0,99		0,95
	5		1,46		1,18		1,00		0,92
	6		1,44		1,14		1,00		0,93
	7		1,47		1,19		0,98		0,91
	8		1,46		1,20		0,96		0,96
	9		1,45		1,19		0,93		0,89
	10		1,49		1,24		0,96		0,91
	11		1,42		1,20		0,92		0,95
	12		1,44		1,16		1,00		0,96
	13		1,45		1,19		0,95		0,88
	14		1,46		1,22		0,97		0,94
	15		1,49		1,21		0,98		0,95
	16		1,44		1,23		0,97		0,97
	17		1,44		1,18		0,95		0,94
	18		1,46		1,19		0,97		0,93
	19		1,42		1,19		0,96		0,98
	20		1,41		1,21		1,03		0,90
	21		1,47		1,21		0,99		0,92
	22		1,44		1,18		0,97		0,94
	23		1,42		1,17		0,97		0,94
	24		1,43		1,22		1,01		0,96
	25		1,46		1,21		0,92		0,95
	26		1,41		1,19		1,01		0,95
	27		1,45		1,19		1,03		0,98
	28		1,46		1,18		1,00		0,94
	29		1,45		1,19		0,97		0,95
	30		1,47		1,19		0,96		0,93
	31		1,48		1,21		1,02		0,96
	32		1,47		1,18		1,00		0,95
	33		1,51		1,22		1,00		0,95
Průměr			1,45		1,19		0,98		0,94
Směr. odchylka			0,022918		0,021008		0,027974		0,023086

PP + Mobihel Chromind 2K, šířka spáry na vstupu paprsku do materiálu

Šířka spáry [mm]		Rychlost posuvu řezné hlavy [mm.min ⁻¹]							
		50	50	250	250	750	750	1000	1000
		Typ paprsku							
		WJM	AWJ	WJM	AWJ	WJM	AWJ	WJM	AWJ
Číslo měření	1	1,42	1,48	1,37	1,45	1,32	1,41	1,37	1,39
	2	1,41	1,50	1,34	1,43	1,34	1,38	1,39	1,37
	3	1,40	1,53	1,35	1,44	1,33	1,40	1,37	1,35
	4	1,40	1,51	1,37	1,46	1,35	1,36	1,34	1,36
	5	1,39	1,52	1,36	1,44	1,36	1,41	1,29	1,36
	6	1,40	1,51	1,35	1,44	1,33	1,42	1,28	1,37
	7	1,39	1,52	1,37	1,41	1,36	1,41	1,29	1,36
	8	1,40	1,48	1,36	1,39	1,36	1,37	1,28	1,35
	9	1,40	1,49	1,36	1,41	1,31	1,37	1,35	1,36
	10	1,40	1,48	1,34	1,40	1,35	1,36	1,33	1,34
	11	1,41	1,47	1,34	1,42	1,33	1,35	1,32	1,35
	12	1,41	1,48	1,35	1,39	1,34	1,36	1,30	1,36
	13	1,41	1,47	1,36	1,39	1,32	1,38	1,28	1,35
	14	1,41	1,48	1,34	1,41	1,32	1,37	1,31	1,33
	15	1,39	1,48	1,36	1,40	1,32	1,37	1,35	1,33
	16	1,41	1,48	1,33	1,40	1,32	1,38	1,31	1,36
	17	1,40	1,46	1,36	1,39	1,33	1,36	1,34	1,35
	18	1,41	1,46	1,33	1,42	1,32	1,38	1,32	1,35
	19	1,41	1,45	1,33	1,38	1,29	1,35	1,32	1,32
	20	1,41	1,46	1,36	1,38	1,34	1,38	1,34	1,33
	21	1,42	1,46	1,35	1,38	1,30	1,38	1,35	1,35
	22	1,40	1,47	1,35	1,41	1,33	1,37	1,34	1,36
	23	1,39	1,46	1,36	1,39	1,34	1,36	1,34	1,33
	24	1,39	1,46	1,34	1,41	1,31	1,38	1,29	1,35
	25	1,39	1,46	1,35	1,40	1,31	1,37	1,33	1,33
	26	1,41	1,48	1,35	1,42	1,34	1,37	1,30	1,33
	27	1,41	1,44	1,37	1,42	1,34	1,37	1,30	1,33
	28	1,38	1,45	1,35	1,42	1,33	1,39	1,35	1,34
	29	1,39	1,47	1,36	1,40	1,32	1,37	1,35	1,31
	30	1,39	1,43	1,36	1,40	1,33	1,34	1,34	1,33
	31	1,40	1,46	1,34	1,42	1,32	1,36	1,32	1,31
	32	1,41	1,45	1,34	1,41	1,31	1,34	1,33	1,32
	33	1,40	1,43	1,37	1,42	1,31	1,35	1,32	1,34
Průměr		1,40	1,47	1,35	1,41	1,33	1,37	1,33	1,34
Směr. odchylka		0,00967	0,02434	0,01199	0,01999	0,01677	0,019488	0,027534	0,017938

PP + Mobihel Chromind 2K, šířka spáry na výstupu paprsku z materiálu

Šířka spáry [mm]		Posuv řezné hlavy [mm.min ⁻¹]							
		50	50	250	250	750	750	1000	1000
		Typ paprsku							
		WJM	AWJ	WJM	AWJ	WJM	AWJ	WJM	AWJ
Číslo měření	1		1,49		1,19		0,88		
	2		1,47		1,24		0,95		
	3		1,50		1,23		1,01		
	4		1,47		1,24		1,01		
	5		1,48		1,15		0,97		
	6		1,47		1,21		1,01		
	7		1,45		1,21		0,94		
	8		1,51		1,19		0,90		
	9		1,47		1,23		1,02		
	10		1,48		1,21		0,92		
	11		1,46		1,26		0,94		
	12		1,46		1,24		0,99		
	13		1,44		1,20		0,95		
	14		1,46		1,19		1,00		
	15		1,47		1,22		0,97		
	16		1,48		1,22		0,97		
	17		1,48		1,20		0,96		
	18		1,47		1,24		0,98		
	19		1,47		1,23		0,97		
	20		1,46		1,24		0,98		
	21		1,43		1,24		0,97		
	22		1,45		1,21		1,05		
	23		1,45		1,19		0,93		
	24		1,46		1,18		0,99		
	25		1,43		1,19		0,90		
	26		1,43		1,19		0,97		
	27		1,44		1,21		0,96		
	28		1,43		1,17		0,96		
	29		1,43		1,22		0,96		
	30		1,49		1,18		0,94		
	31		1,45		1,21		0,91		
	32		1,46		1,20		0,97		
	33		1,43		1,17		0,88		
Průměr			1,46		1,21		0,96		
Směr. odchylka			0,021143		0,025029		0,039109		

PP + Poluran 790, šířka spáry na vstupu paprsku do materiálu

Šířka spáry [mm]		Rychlost posuvu řezné hlavy [mm.min ⁻¹]							
		50	50	250	250	750	750	1000	1000
		Typ paprsku							
		WJM	AWJ	WJM	AWJ	WJM	AWJ	WJM	AWJ
Číslo měření	1	1,49	1,59	1,44	1,52	1,37	1,49	1,40	1,53
	2	1,48	1,58	1,44	1,52	1,38	1,51	1,38	1,53
	3	1,49	1,60	1,44	1,51	1,39	1,50	1,36	1,52
	4	1,48	1,57	1,45	1,53	1,38	1,51	1,36	1,54
	5	1,49	1,57	1,43	1,55	1,38	1,55	1,38	1,49
	6	1,47	1,59	1,43	1,53	1,36	1,54	1,38	1,48
	7	1,47	1,60	1,42	1,54	1,36	1,56	1,36	1,48
	8	1,47	1,59	1,40	1,50	1,40	1,54	1,40	1,47
	9	1,47	1,57	1,39	1,56	1,41	1,53	1,35	1,47
	10	1,45	1,57	1,39	1,50	1,37	1,49	1,38	1,48
	11	1,45	1,57	1,40	1,51	1,39	1,49	1,41	1,49
	12	1,45	1,54	1,40	1,55	1,34	1,51	1,37	1,51
	13	1,45	1,55	1,41	1,55	1,38	1,49	1,36	1,50
	14	1,47	1,55	1,40	1,53	1,35	1,51	1,37	1,52
	15	1,47	1,58	1,40	1,55	1,36	1,49	1,35	1,49
	16	1,46	1,60	1,38	1,56	1,39	1,51	1,37	1,45
	17	1,46	1,57	1,39	1,53	1,41	1,50	1,38	1,47
	18	1,46	1,55	1,39	1,53	1,39	1,53	1,37	1,48
	19	1,45	1,55	1,40	1,53	1,38	1,51	1,39	1,49
	20	1,45	1,56	1,42	1,56	1,35	1,50	1,34	1,47
	21	1,46	1,53	1,40	1,54	1,36	1,52	1,33	1,45
	22	1,47	1,55	1,43	1,57	1,38	1,49	1,35	1,46
	23	1,46	1,55	1,43	1,52	1,38	1,50	1,35	1,48
	24	1,47	1,54	1,40	1,53	1,38	1,53	1,33	1,49
	25	1,48	1,57	1,40	1,57	1,34	1,52	1,31	1,49
	26	1,46	1,56	1,42	1,57	1,34	1,53	1,35	1,53
	27	1,45	1,53	1,41	1,53	1,35	1,49	1,36	1,48
	28	1,46	1,53	1,41	1,50	1,34	1,52	1,33	1,50
	29	1,47	1,53	1,38	1,55	1,35	1,46	1,34	1,50
	30	1,43	1,54	1,41	1,52	1,34	1,50	1,33	1,49
	31	1,45	1,53	1,41	1,50	1,36	1,49	1,34	1,48
	32	1,43	1,53	1,40	1,50	1,38	1,50	1,35	1,48
	33	1,45	1,53	1,40	1,55	1,38	1,48	1,34	1,51
Průměr		1,46	1,56	1,41	1,53	1,37	1,51	1,36	1,49
Směr. odchylka		0,01482	0,02276	0,01800	0,02157	0,02007	0,02128	0,022894	0,022477

PP + Poluran 790, šířka spáry na výstupu paprsku z materiálu

Šířka spáry [mm]		Posuv řezné hlavy [mm.min ⁻¹]							
		50	50	250	250	750	750	1000	1000
		Typ paprsku							
		WJM	AWJ	WJM	AWJ	WJM	AWJ	WJM	AWJ
Číslo měření	1		1,47		1,21		1,02		
	2		1,51		1,28		1,04		
	3		1,47		1,23		1,00		
	4		1,52		1,25		1,05		
	5		1,50		1,26		0,97		
	6		1,51		1,29		0,97		
	7		1,51		1,25		1,01		
	8		1,48		1,24		0,95		
	9		1,50		1,25		1,01		
	10		1,51		1,23		1,03		
	11		1,49		1,25		1,03		
	12		1,47		1,21		1,03		
	13		1,52		1,22		1,08		
	14		1,51		1,24		0,96		
	15		1,47		1,23		0,98		
	16		1,48		1,22		0,94		
	17		1,51		1,25		0,96		
	18		1,48		1,21		0,98		
	19		1,48		1,22		1,01		
	20		1,52		1,22		0,97		
	21		1,51		1,23		0,95		
	22		1,49		1,22		0,94		
	23		1,51		1,23		0,98		
	24		1,47		1,21		0,99		
	25		1,49		1,23		0,93		
	26		1,47		1,21		0,96		
	27		1,47		1,25		0,99		
	28		1,49		1,24		0,91		
	29		1,47		1,23		1,01		
	30		1,48		1,23		1,00		
	31		1,48		1,24		0,99		
	32		1,49		1,25		0,94		
	33		1,46		1,24		0,99		
Průměr			1,49		1,24		0,99		
Směr. odchylka			0,018081		0,018924		0,037456		

POM-H + Mobihel Chromind 2K, šířka spáry na vstupu paprsku do materiálu

Šířka spáry [mm]		Rychlost posuvu řezné hlavy [mm.min ⁻¹]							
		50	50	250	250	750	750	1000	1000
		Typ paprsku							
		WJM	AWJ	WJM	AWJ	WJM	AWJ	WJM	AWJ
Číslo měření	1	1,35	1,52	1,34	1,45	1,35	1,41	1,33	1,31
	2	1,35	1,48	1,35	1,45	1,33	1,40	1,32	1,31
	3	1,34	1,51	1,34	1,47	1,33	1,39	1,29	1,34
	4	1,36	1,52	1,35	1,46	1,34	1,36	1,31	1,34
	5	1,36	1,47	1,32	1,41	1,34	1,37	1,31	1,33
	6	1,33	1,48	1,34	1,42	1,34	1,38	1,29	1,35
	7	1,33	1,49	1,34	1,46	1,34	1,35	1,27	1,35
	8	1,33	1,47	1,35	1,43	1,36	1,34	1,27	1,36
	9	1,34	1,49	1,34	1,42	1,35	1,32	1,25	1,34
	10	1,33	1,47	1,35	1,41	1,31	1,33	1,29	1,36
	11	1,34	1,48	1,32	1,41	1,33	1,31	1,28	1,33
	12	1,33	1,49	1,34	1,38	1,31	1,32	1,30	1,32
	13	1,36	1,51	1,33	1,40	1,34	1,32	1,28	1,32
	14	1,33	1,51	1,35	1,37	1,31	1,33	1,27	1,34
	15	1,34	1,51	1,34	1,37	1,33	1,32	1,31	1,33
	16	1,34	1,45	1,32	1,39	1,33	1,35	1,30	1,33
	17	1,35	1,46	1,32	1,39	1,32	1,35	1,30	1,32
	18	1,35	1,46	1,35	1,42	1,32	1,37	1,30	1,34
	19	1,35	1,47	1,32	1,38	1,36	1,37	1,29	1,32
	20	1,35	1,47	1,32	1,38	1,34	1,38	1,28	1,32
	21	1,33	1,48	1,33	1,41	1,36	1,38	1,27	1,36
	22	1,35	1,48	1,32	1,41	1,32	1,35	1,27	1,36
	23	1,35	1,50	1,32	1,38	1,34	1,34	1,27	1,33
	24	1,34	1,47	1,31	1,36	1,33	1,35	1,29	1,31
	25	1,35	1,49	1,34	1,39	1,34	1,36	1,27	1,33
	26	1,34	1,47	1,33	1,37	1,31	1,36	1,31	1,33
	27	1,33	1,46	1,32	1,37	1,31	1,36	1,28	1,30
	28	1,33	1,47	1,33	1,40	1,31	1,34	1,31	1,29
	29	1,33	1,49	1,35	1,38	1,34	1,34	1,28	1,34
	30	1,34	1,48	1,32	1,38	1,32	1,34	1,32	1,30
	31	1,36	1,46	1,34	1,39	1,31	1,33	1,29	1,33
	32	1,36	1,44	1,33	1,39	1,34	1,34	1,28	1,33
	33	1,33	1,45	1,33	1,38	1,32	1,30	1,27	1,31
Průměr		1,34	1,48	1,33	1,40	1,33	1,35	1,29	1,33
Směr. odchylka		0,01073	0,02022	0,01197	0,02913	0,01532	0,025523	0,018413	0,017835

POM-H + Mobihel Chromind 2K, šířka spáry na výstupu paprsku z materiálu

Šířka spáry [mm]		Posuv řezné hlavy [mm.min ⁻¹]							
		50	50	250	250	750	750	1000	1000
		Typ paprsku							
		WJM	AWJ	WJM	AWJ	WJM	AWJ	WJM	AWJ
Číslo měření	1	Výrazně nepravidelný tvar => neměřitelné	1,41	Výrazně nepravidelný tvar => neměřitelné	1,04	Neprořezaná spára => neměřitelné	0,80	Neprořezaná spára => neměřitelné	0,73
	2		1,40		1,00		0,87		0,72
	3		1,39		1,02		0,81		0,77
	4		1,41		1,00		0,81		0,73
	5		1,41		1,02		0,81		0,79
	6		1,39		1,02		0,88		0,81
	7		1,39		1,03		0,81		0,76
	8		1,39		1,05		0,82		0,72
	9		1,42		1,06		0,82		0,78
	10		1,39		1,03		0,80		0,76
	11		1,39		1,03		0,78		0,72
	12		1,38		1,08		0,84		0,77
	13		1,39		1,04		0,81		0,81
	14		1,39		1,02		0,75		0,82
	15		1,40		1,00		0,80		0,71
	16		1,36		1,04		0,85		0,74
	17		1,42		1,03		0,84		0,70
	18		1,38		1,05		0,83		0,78
	19		1,37		1,01		0,84		0,74
	20		1,38		1,02		0,80		0,74
	21		1,39		1,03		0,80		0,68
	22		1,38		1,02		0,82		0,74
	23		1,39		1,02		0,81		0,68
	24		1,40		1,03		0,82		0,71
	25		1,40		1,03		0,82		0,75
	26		1,38		1,06		0,81		0,76
	27		1,41		1,02		0,79		0,76
	28		1,40		1,03		0,84		0,82
	29		1,39		1,03		0,79		0,75
	30		1,39		1,04		0,84		0,72
	31		1,37		1,00		0,87		0,76
	32		1,40		1,03		0,81		0,70
	33		1,38		1,02		0,84		0,73
Průměr			1,39		1,03		0,82		0,75
Směr. odchylka			0,013653		0,017711		0,026442		0,036785