

**MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ**  
**LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ FAKULTA**  
*ÚSTAV ZÁKLADNÍHO ZPRACOVÁNÍ DŘEVA*



Nekonvenční technologie obrábění vodním abrazivním  
paprskem

**Diplomová práce**

**2017**

**Bc. Jakub Liseč**

Zadání diplomové práce:

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem práci: Nekonenční technologie obrábění vodním abrazivním paprskem vypracoval samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a v souladu s platnou Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací.

Jsem si vědom, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity, a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně dne: .....

.....

Podpis

## PODĚKOVÁNÍ

Mé poděkování patří vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Miroslavu Rouskovi, CSc. za odborné vedení, věnovaný čas, ochotu, cenné rady a konzultace. Dále bych tímto poděkoval firmě AWAC spol. s r. o. za poskytnutou příležitost tvorby vzorků. Poděkování patří p. Jaroslavu Mášovi za odborný výklad, seznámení s technologií vodního abrazivního paprsku spojené s nejčastějšími problémy, úskalími výroby a cenné zkušenosti z praxe při řezání vodním abrazivním paprskem. Velké díky patří i mé rodině za podporu během celého studia.

**Bc. Jakub Lisec**

## **Nekonvenční technologie obrábění vodním abrazivním paprskem**

### **The unconventional technology of cutting abrasive water jet**

#### **ABSTRAKT**

Práce je zaměřena na využití nekonvenční technologie vodního abrazivního paprsku pro řezání foliovaného vodovzdorného překližovaného materiálu. Práce je rozdělena do několika částí: na analýzu technologie, způsob vytváření abrazivního paprsku, způsoby řízení a zadávání dat, technicko-ekonomické zhodnocení, kvalitu řezného procesu a experimentální část. Ve výsledcích práce pojednává, jaké ovlivnění kvality řezného povrchu nastává při rozdílných vstupních parametrech obrábění foliované vodovzdorné překližované desky vodním abrazivním paprskem. V závěru práce se snažím poukázat na problematiku hodnocení kvality obrábění a zdůvodnění, proč metoda řezání vodním abrazivním paprskem bude mít v dřevozpracujícím průmyslu jen velmi malé zastoupení.

**Klíčová slova:** kvalita řezného procesu, nekonvenční technologie, obrábění, rychlost posuvu, foliovaná vodovzdorná překližovaná deska, vodní abrazivní paprsek.

#### **ABSTRACT**

The work is focused on the use of unconventional technology of abrasive water jet cutting foil waterproof plywood material. The work is divided into several parts: on the analysis technology, a method of forming an abrasive jet, methods of control and data entry, techno-economic assessment, the quality of the cutting process and the experimental part. The results of the work discusses what influence the quality of the cut surface, depending at a different input parameters machining foil waterproof plywood abrasive water jet. In conclusion, I try to highlight the issue of evaluating the quality of machining and justification method waterjet abrasive jet will be in the woodworking industry very little representation.

**Keywords:** quality cutting process, unconventional technology, machining, speed shift, foil waterproof plywood, abrasive water jet.

## Obsah

1	Úvod.....	9
2	Cíl práce.....	10
3	Analýza technologie .....	10
3.1	Nekonvenční technologie obrábění.....	10
3.2	Obrábění vysokotlakým vodním paprskem .....	10
3.3	Dělení materiálu .....	10
3.3.1	Abrazivní vodní paprsek v procesu obrábění .....	10
4	Analýza konstrukčního zařízení pro řezání vodním abrazivním paprskem.....	11
4.1	Lapač paprsku .....	11
4.2	Přívod pracovní kapaliny. ....	12
4.2.1	Chemické a fyzikální vlastnosti vody.....	12
4.2.2	Specifikace vody.....	13
4.2.3	Způsoby úpravy vody .....	13
4.2.4	Fyzikální úprava .....	15
4.2.5	Biologická úprava vody.....	15
4.3	Čistící filtry .....	15
4.4	Nízkotlaké čerpadlo .....	16
4.5	Zásobník tlakové pracovní kapaliny .....	16
4.6	Vysokotlaké čerpadlo.....	16
4.7	Zásobník abrazivního materiálu.....	16
4.8	Pracovní řezací hlava .....	16
4.9	Manipulační zařízení.....	17
4.10	Vysokotlaké potrubí .....	18
4.11	Abrazivní materiál .....	18
4.12	Těsnění .....	20
4.13	Akumulátor.....	21

4.14	Zařízení s multiplikátorem .....	21
4.15	Zařízení s triplexový plunžrem.....	23
4.16	Trysky.....	23
4.16.1	Vodní trysky .....	23
4.16.2	Abrazivní trysky .....	24
4.17	Způsoby vytváření abrazivního vodního paprsku .....	24
4.17.1	Nepřímé vstřikování abraziva.....	24
4.17.2	Přímé vstřikování abraziva (DIAJET-Direct Injection Abrasive Jet).....	24
4.18	Použití metody a dosahované parametry v praxi.....	25
5	způsoby řízení a zadávání technologických dat.....	27
5.1	Řídicí systémy.....	27
5.1.1	AsperWin.....	27
5.1.2	MSNC .....	29
6	Technicko-ekonomické zhodnocení .....	30
7	Kvalita řezného procesu.....	33
7.1	Vlastnosti opracovaného povrchu .....	33
7.2	Hodnocení topografie povrchu.....	34
7.3	Rozdělení metod pro hodnocení topografie povrchu: .....	35
7.3.1	Mechanická metoda .....	35
7.3.2	Optické metody.....	35
7.3.3	Jiné metody .....	36
7.4	Chyby vznikající během řezání .....	36
7.4.1	Kvalita řezné plochy .....	36
7.4.2	Povrchové vady při řezání .....	37
8	Posouzení vlivů obráběcích parametrů .....	38
9	Členění technologických postupů.....	39
10	Dílčí závěr.....	39

11	Materiál a Metodika.....	40
11.1	Řezací zařízení.....	40
11.2	Materiál.....	41
11.2.1	Překližovaná deska .....	41
11.2.2	Vodovzdorná překližka.....	41
11.2.3	Foliované vodovzdorné překližované desky.....	42
11.3	Metodika stanovení nerovnosti obroběného povrchu.....	43
11.4	Grafické zpracování výsledků nerovnosti obroběného povrchu .....	45
11.5	Metodika měření poškození hrany voděodolné překližky.....	45
11.6	Grafické zpracování vad desky .....	46
11.7	Příprava zkušebních vzorků .....	46
11.7.1	Tlak řezací kapaliny .....	46
11.7.2	Směr opracování vzorků .....	46
11.7.3	Posuvná rychlost řezání .....	47
11.7.4	Abrazivní materiál .....	47
11.7.5	Vzorky .....	47
11.7.6	Proces řezání .....	47
12	Výsledky .....	48
13	Diskuse.....	55
14	Závěr .....	57
15	Summary.....	57
16	Seznam použitých zkratk a symbolů .....	58
17	seznam použité literatury .....	59
18	Seznam obrázků.....	61
19	Seznam tabulek.....	62
20	Přílohy.....	63



# 1 ÚVOD

Technologie vodního paprsku, kdy se využívalo kapalinového media jako nástroje obrábění je známa již od minulého století. Velký rozmach této technologie nastal v období, kdy některé firmy viděly v tomto způsobu obrábění budoucnost a zkoumaly jeho možné průmyslové využití. Vody pro obrábění by se bývalo využilo dříve, ale z důvodu technologické omezenosti se vývoj zpomalil. Avšak v nynější době se dostává do popředí stále více díky novým materiálům a jednotlivým nárokům na obrábění. Základní myšlenkou je uvědomit si, že vodním paprskem nemusíme obrábět pouze dřevo nebo aglomerované, překližované materiály. Použití je mnohem rozsáhlejší např. kámen, sklo, beton, plasty, kovy. Právě v tom tkví hlavní výhody této technologie. Představitelé této technologie uvádějí, že energetická účinnost je osmkrát větší než u laserové technologie. Jednodušší zařízení, široká využitelnost pro různé druhy materiálů, jednoduchá obsluha, rychlá výroba a jednodušší. Bezprašné prostředí obrábění dělá z této technologie budoucnost v obrábění. Díky technologickému pokroku jsou každým rokem nabízeny další a další materiály. Stále dosahujeme větších rychlostí v cestování, s tím úzce souvisí zvětšující se nároky na pevnost a odolnost. Ani výrobci nástrojů neotálejí. Snaží se vždy na trh nabídnout co nejlepší variantu pro obrábění právě nově uváděných materiálů. Dalo by se to nazvat, jako závody nástrojářských firem o prvenství.

Kvalita obrobeného povrchu je jeden z nejsledovanějších parametrů obrábění. Kvalitně obrobený materiál neznamená pouze krásnější vzhled. Měli bychom v tom vidět souvislosti, které s tím úzce souvisí. Jako je například povrchová úprava pomocí nátěrových hmot, lepší vlastnosti pro lepení a mnoho dalších. Některé součásti v leteckém průmyslu musí být vyrobeny na desetiny milimetru přesně. Se všemi takovými proměnnými hledáme co nejlepší podobu obrobené plochy pro další použití. V této diplomové práci se budeme právě kvalitou obrobené plochy zabývat, konkrétně jak změna posuvné rychlosti ovlivňuje kvalitu obrobené plochy pro jeho další využití.

Ze seznamu literatury, která je uvedena v závěru samotné práce, bylo nejvíce využíváno knihy Barcík a kol., Řezání dřeva a dřevěných kompozitních materiálů abrazivním vodním paprskem. Tato publikace velmi dobře charakterizuje celou technologii řezání vodním paprskem. Součástí je i velmi dobře zpracována metodika

experimentálního řezání a vyhodnocení zkoumaných vzorků. Dokonce se zabývá i řezáním aglomerovaných a překližovaných materiálů.

## **2 CÍL PRÁCE**

Cílem diplomové práce bylo experimentálně prokázat, jak rozdílná posuvná rychlost abrazivního vodního paprsku ovlivňuje kvalitu obrobenej plochy a zároveň, jak je kvalita obrobku závislá na rozdílném směru řezání u foliované vodovzdorné překližované desky.

## **3 ANALÝZA TECHNOLOGIE**

### **3.1 Nekonvenční technologie obrábění**

Pod tímto názvem se zahrnují způsoby obrábění, které na rozdíl od třískového obrábění nepoužívají mechanické práce pro úběr materiálu. K úběru materiálu využívají tepelných, elektrických, chemických, ultrazvukových, abrazivních a jiných fyzikálních jevů nebo jiných kombinací a to převážně při bezsilovém působení na obráběný materiál a bez vzniku třísky (Morávek, 1999).

### **3.2 Obrábění vysokotlakým vodním paprskem**

Podstatou této technologie obrábění materiálů je obrušování děleného materiálu tlakem vodního paprsku. Pracovní tlak vody se nejčastěji pohybuje v rozmezí 80–410 MPa pro abrazivní vodní paprsek. U obrábění čistým vodním paprskem až 700 MPa Tlakovým zdrojem jsou vysokotlaká čerpadla, která se liší příkonem (9–75 kW) a průtokem vody ( $1,2\text{--}7,6\text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ ). Paprsek vzniká v řezací hlavě zakončené speciální tryskou. Proud vody hnaný přes dýzy má rychlost  $600\text{--}900\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Při zpracování měkkých materiálů používáme čistý vodní paprsek, pro ostatní případy je třeba použít abrazivní paprsek (AB JET 2016; Lipa 2001; Řasa, Pokorný, Grabriel, 2005; Valíček, Hloch, 2008).

### **3.3 Dělení materiálu**

#### **3.3.1 Abrazivní vodní paprsek v procesu obrábění**

Základním rozdílem mezi obráběním čistým vodním paprskem a abrazivním vodním paprskem je v přidávání brusiva do proudu vody. Abrazivní řezné medium je

usměrněné do úzkého paprsku, čímž se zvyšuje jeho řezná účinnost. Přidáváním abraziva se zvyšuje výkon řezání (Barcík a kol., 2012).

Způsoby přidávání abraziva mohou být dvojí. Abrazivum může být strháváno kapalinovým paprskem nebo může být přidáváno pod tlakem. Směšování probíhá v mísicích komorách. Mezi nejčastěji využívaná abraziva se řadí granát, oxid hlinitý, minerální písek, křemičitý písek nebo ocelová drť (Maňková, 2000).

Vodní trysky jsou navrhovány do tvaru dýzy, což znásobuje rychlost paprsku a vytváří tak kontinuální proud pohybující se rychlostí 1–4 Mach (Slaný, 2009).

Přimíchávání abraziva se uskutečňuje v důsledku vzniku podtlaku při protékání tekutinového paprsku tryskou. Po přechodu paprsku vodou se paprsek rozlišuje ve vytvořené komoře. Dochází ke změně proudění z laminárního na turbulentní a vzniklý podtlak přisává abrazivní částice do paprsku. Vzhledem k vysoké kompaktnosti paprsku se v podstatě pouze připojí na povrch vodního sloupce a vytvoří pomyslný obal paprsku. Nedokonalé promíchávání snižuje řeznou účinnost celého způsobu obrábění. Proto jsou stále zkoumány nové podoby směšovacích abrazivních trysek, aby bylo dosaženo co nejvyššího stupně promíchávání tekutiny s abrazivem. Technologické řešení trysky, ve které probíhá proces pronikání abraziva do proudu vody, musí být otěruvzdorná. Využívá se velice kvalitních materiálů karbid wolframu, karbid bóru a povlaky vytvořené iontovou implantací (Barcík a kol., 2012).

Abrazivní vodní paprsek se označuje mnoha výhodami:

- vysoká rychlost řezání,
- minimální tepelné ovlivnění povrchu,
- malé deformační napětí v opracovaném povrchu,
- možnost řezat v různých směrech bez ztráty účinnosti paprsku,
- univerzálnost použití (tamtéž str. 23).

## **4 ANALÝZA KONSTRUKČNÍHO ZAŘÍZENÍ PRO ŘEZÁNÍ VODNÍM ABRAZIVNÍM PAPERSEM**

### **4.1 Lapač paprsku**

Po průchodu kapalinového paprsku materiálem, daný paprsek obsahuje stále, až 75 % počáteční energie. Velikost této energie se mění v závislosti na síle a druhu materiálu a dalších parametrech (Kulekci, 2002).

Je umístěn proti řezací trysce pod obráběným materiálem. Jeho úkolem je zachycovat a ničit energii paprsku, který projde skrz materiál. Lapač vodního paprsku může být stabilní nebo mobilní. Stabilní lapač je proveden jako vana naplněná vodou umístěná pod roštem, na kterém je umístěn obráběný materiál. Voda v tomto případě slouží jako absorbent energie. Výška vodní hladiny je často 60 cm. Mobilní lapač umožňuje zachytávat kapalinový paprsek, až v šesti osách. Nejčastěji má podobu kontejneru naplněného ocelovými nebo keramickými kuličkami. Existují i varianty štěrbinových lapačů, které mají šikmo uložené destičky ve své konstrukci a je tedy využíváno štěrbin místo látky absorbující energii. Dalším možným způsobem je použití roury dlouhé minimálně 300 mm, která je naplněna speciálním přípravkem pro pohlcení zbytkové energie paprsku. Lapač je synchronně veden s řezací tryskovou hlavou (Moravek, 1999; Maňková, 2000; Barcík a kol., 2012).

## **4.2 Přívod pracovní kapaliny.**

Nejčastějším přívodem pracovní kapaliny je běžně dostupný vodovodní řad, který je dostupný v dané oblasti. K zajištění delší životnosti jednotlivých součástí zařízení je nutná úprava a filtrace vody. Z toho důvodu je zapotřebí využití filtrů.

### **4.2.1 Chemické a fyzikální vlastnosti vody**

Voda je sloučenina prvků vodíku a kyslík také známa jako  $H_2O$ . Voda v přírodě není chemicky čistá, ale obsahuje velké množství organických a anorganických složek a také mikroorganismů. Chemicky čistá voda je bez barvy, chuti a zápachu. Jsou v ní přítomny různé příměsi a množství rozpuštěných sloučenin. Nejvíce obsahuje chloridy, bromidy, uhličitany a i rozpuštěné plyny kyslík v podobě dvouatomových molekul a i oxid uhličitý (Benešová, Satrapová, 2011).

Jednou z důležitých fyzikální vlastností vody z hlediska použití jako řezného média je kompresibilita. Změna hodnoty stlačitelnosti vody při změně tlaku o 10 MPa je 4 %, což představuje stačení pracovní kapaliny na tlak 400 MPa až 15 %. Tuto podstatnou vlastnost je potřeba znát při navrhování konstrukce zařízení, do kterého musí být z důvodu pulsace tlakové vody (při dvojčinném multiplikátoru) zařazen vysokotlaký akumulátor (Krajný, 1998).

Viskozitu vody je také potřeba brát v úvahu při návrhu vysokotlakých systémů. Hlavním důvodem je zvláště optimální těsnost a životnost vysokotlakých těsnění multiplikátoru (Barcík a kol., 2012).

#### 4.2.2 Specifikace vody

Jednotlivé firmy si zavedly díky velké variabilitě vody a různým způsobům její úpravy jistá opatření. Tato opatření bychom mohly nazvat jako specifikace vody, aby předešly problémům ohledně reklamací strojů. Firmy Ingersoll – Rand a Flow Systems ji stanovily následovně:

- celkové množství rozpuštěných pevných látek (TDS): max.  $500 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ ,
- celková tvrdost: max.  $25 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ ,
- obsah železa: max.  $0,2 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ ,
- obsah manganu: max.  $0,1 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ ,
- obsah chloridu: max.  $100 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ ,
- obsah zákalu: max. 5 NTU,
- obsah volného chloru: max.  $1,0 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ ,
- kyselost od 6,5 do 8,5 pH.

Překročení udávaných hodnot má za následek zhoršení životnosti trysek dále ventilů, těsnění a pístů (Krajný, 1998).

#### 4.2.3 Způsoby úpravy vody

Úprava vody zabraňuje předčasnému opotřebením trysek před usazováním příměsí obsažené ve vodě a tím prodlužuje jejich životnost. V praxi se používají tři základní postupy mechanický, fyzikálně – chemický a biologický (Barcík a kol., 2012).

##### 4.2.3.1 Mechanická úprava vody

Filtrace je založena na mechanickém zachycení pevných částic na překážce – filtru. Při obrábění vodním abrazivním paprskem se používá hluboký filtr. Filtr je složen z několika vrstev. Dokáže totiž zadržet částice, až do velikosti  $1 \mu\text{m}$ . Každá vrstva je rozdílná ve své jemnosti. Vrchní vrstva zachycuje velké částice, druhá zachycuje menší a až čtvrtá ty nejmenší (Krajný, 1998).

Použité filtry se v určitém časovém intervalu regenerují na základě rozdílnosti tlaků tzv. proplachem, kterým se usazené částice vyplaví z filtru. Použití při obrábění vodním paprskem vyžaduje medium bez zápachu a chuti. Z tohoto důvodu je potřeba provést uhlíkovou filtraci. Příčinou použití tohoto filtru je přítomnost organických látek ve vodě. V případě, že by ve vodě bylo obsaženo více železa nebo manganu je třeba aplikovat tzv. zeleně pískovou filtraci (Barcík a kol., 2012).

#### **4.2.3.2 Změkčování**

Je bráno jako krok před deionizací nebo zpětnou osmózou. V každé části světa je jinak tvrdá voda. Díky tomu vznikla stupnice tvrdosti vody od měkké, až po extrémně tvrdou vodu (Barcík a kol., 2012).

Zařízení na změkčování iontovou výměnou je složeno z nádržky s pryskyřicí, nádržky se slanou vodou, která obsahuje sůl na jemnější obnovu z kontrolní záklopkou. Voda stéká přes pryskyřičné řečiště, plastický materiál, který se skládá z milionových počtů malých zrněk. Voda prochází přes zrnka, vápník a hořčík, které jsou kladně nabitě, jsou přitahovány a zadrženy negativně nabitými částmi pórovitých pryskyřičných zrněk. Sodíkové ionty, které jsou na zrnkách, se uvolní a vypustí se z vody. Iontová výměna probíhá v poměru 1 : 1 (Krajný, 1998).

#### **4.2.3.3 Deionizace**

Proces je podobně založený jako změkčování na výměně iontů, pouze s tím rozdílem, že při deionizaci se kromě kationové využívá aniontová pryskyřice. Při přechodu kationovou pryskyřicí jsou kationy přesunuty volnými minerály kyselin a naopak při přechodu aniontovou pryskyřicí jsou anionty přesunuty a nahrazeny hydroxidy. Minerály kyselin a hydroxidy se dále slučují a vzniká čistá voda bez iontových sloučenin. V úvahu dále přichází i deionizační dvouřečišťová aniontová úprava na slabé nebo silné bázi (Barcík a kol., 2012).

Deionizátor používá kationové i aniontové pryskyřice. Dvounádržkový deionizátor obsahuje v jedné nádržce kationové pryskyřice a v druhé aniontové. Volba pryskyřic závisí na chemickém složení vody a požadavku na kvalitu vody na výstupu (Krajný, 2001).

#### **4.2.3.4 Zpětná osmóza**

Nazývá se také reverzní. Tento proces produkuje vysoce kvalitní vodu. Voda je vysokým tlakem tlačena přes polopropustnou membránu, která zachycuje nečistoty a také rozpustné částice. Rozpustné částice odplavuje do odtoku, čímž odděluje očištěnou vodu (Krajný, 1998).

Reverzní osmóza má vysokou účinnost. U všech částic, bakterií a dalších mikroorganismů, až 95 % (Barcík a kol., 2012).

#### 4.2.4 Fyzikální úprava

Hlavní podstatou této metody je přenos nebo uložení volného elektronového náboje na jednotlivé molekuly vody. Důsledkem toho se molekuly zpolarizují. Tento efekt způsobuje změnu tvaru rozpustných pevných látek ve vodě tak, že už tak snadno netvoří krystalickou mřížku. Mají různý tvar a také velikost. Tvrdý vodní kámen se tedy již nevytváří. Vytváří se pouze měkký nepřilnavý kal (Barcík a kol., 2012).

Voda je sloučenina, která může získat elektrický náboj několika různými způsoby:

- přechodem přes magnetické pole (nejnižší účinnost),
- přechodem přes elektromagnetické střídavé pole - výhodou je, že při aplikaci není třeba přerušovat potrubí, při větších světlostech potrubí a při různých průtocích vody je třeba snímat a vyhodnocovat průtok vody dalším přístrojem a regulovat frekvenci napáječe cívky vzhledem k účinnosti s tím jsou spojeny samozřejmě vyšší náklady odběratelů, je to možné chápat jako nevýhoda,
- přechodem přes elektrostatické vysokonapěťové pole - nevýhodou této metody je napájení elektrod těchto přístrojů, kde je využito stejnosměrného napětí do 15 kV, což vede k poměrně velkým nárokům na izolátory těchto elektrod,
- přechodem přes galvanický iontový článek (polarizátor) - přístroje jsou založeny na principu galvanického mokrého článku (tamtéž st. 36).

#### 4.2.5 Biologická úprava vody

Tento druh úpravy je zapotřebí, pokud mechanické čištění není dostatečné. Vstupní voda pro biologické čištění je již po mechanickém vyčištění. Hlavní podstatou je využívání aerobních bakterií, které ve svém metabolismu odbourávají 99 % organického znečištění vody (tamtéž st. 36).

### 4.3 Čistící filtry

Filtrace vody je jedna z hlavních důležitostí této technologie. V kapalině jsou přítomny pevné částice, které urychlují opotřebení zařízení. Jedná se hlavně o stěny válců a trubek. Dále ucpávají ventily nebo v kontaktu s těsněním omezují jeho správnou funkci. Je možné i zanesení trysky právě rozpuštěnými pevnými částicemi a tím způsobí ztrátu její funkčnosti (Maňková, 2000).

Hlavní funkcí je odstraňovat nečistoty z přiváděné pracovní kapaliny a současně přivádět kapalinu do vysokotlakého čerpadla. Filtry bychom mohli dělit na dva druhy. Nízkotlaké a vysokotlaké. Nízkotlaká filtrace se využívá u vstupu nízkotlaké vody do multiplikátoru. Mohli bychom je také nazývat jako běžné filtry. Tyto filtry jsou vyrobeny na bázi syntetických vláken nebo bavlny (PTV 2016).

#### **4.4 Nízkotlaké čerpadlo**

Umožňuje regulaci výstupního tlaku a ovládá zároveň vysokotlaké čerpadlo.

#### **4.5 Zásobník tlakové pracovní kapaliny**

Slouží k vyrovnání a udržení konstantního pracovního tlaku kapaliny, vystupující z vysokotlakého čerpadla.

#### **4.6 Vysokotlaké čerpadlo**

Plní funkci zdroje tlakové pracovní kapaliny. Pracuje jako dvojčinný pístový zesilovač tlaku. Dodává kapalinu pod tlakem 200–600 MPa v množství  $2\text{--}4,5 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  (Řasa, Pokorný, Gabriel, 2005).

#### **4.7 Zásobník abrazivního materiálu**

Většinou se jedná o nádobu, která pojme, až 200 kg brusiva. Je opatřen seřiditelným výstupním dávkovačem. Z tohoto prostoru jsou jednotlivá zrna nasávána na principu ejektoru do směšovací komory pracovní řezací hlavy (Řasa, Pokorný, Gabriel, 2005).

#### **4.8 Pracovní řezací hlava**

Podoba řezacích hlav se liší v závislosti na použitém médiu pro řezání. Hlavy mohou obsahovat dva druhy trysek. Jednu vodní a druhou abrazivní. Velikost trysek zajišťuje různou kinetickou energii paprsku. Může také určovat počet pracovišť, které je možné současně napájet z jednoho zdroje. Životnost vodních trysek je závislá na množství minerálů obsažených ve vodě a je v rozmezích přibližných 50–500 hodin. Při abrazivní trysce použití tlaku vody 200 MPa a křemičitého písku o zrnitosti 0,4 mm je maximální životnost trysky 8 hodin (Morávek, 1999).



## 4.9 Manipulační zařízení

Slouží k vyvození relativního pohybu mezi pracovní řezací hlavou a obrobkem. Může mít mnoho podob jako třmen, jehož řízení se provádí ručně, nebo jako portál, k jehož řízení se používá CNC řídicí systém. Řezací hlava může být upevněna jako robotická ruka nebo souřadnicový stůl (Řasa, Pokorný, Gabriel, 2005).

Manipulační systém je stejně důležitý jako samotné zařízení pro generování kapalinového paprsku. Právě on zabezpečuje vzájemný pohyb mezi obrobkem a řeznou hlavici. V současnosti je možno řezací hlavici upevnit, díky již vyřešené problematice instalace přírodních potrubí do všech os, na libovolný typ manipulačního systému. Manipulační systém je však třeba přizpůsobit určitým požadavkům. Prvním z nich je nosnost, pro abrazivní paprsek uvažujeme 10–15 kg. Eliminace zpětných sil což pro abrazivní paprsek představuje 6 N. Odolnost vůči prostředí, vysoká vlhkost prostředí a přímý styk s vodou může způsobit kratší životnost. Od přesného řízení řezu závisí přesnost a zvláště kvalita výroby (Barcík a kol., 2012).

Řídí se především parametry jako je poloha nástroje, ale tak i tlak generátoru, odčerpávání vody ze sběrné vany a jiné. Množství řízených jednotek závisí na stupni automatizace zařízení. Nejčastěji v praxi je využíváno smyslových robotů nebo X – Y manipulátorů (Barcík a kol., 2012).

Manipulační systém se v podstatě skládá ze dvou spolupracujících částí a to řídicí jednotky a výkonné jednotky. Řídicí jednotka je software a hardware, který promění technickou dokumentaci od výrobku na řídicí impulsy pro výkonnou jednotku. Jednotka současně ovládá i chod jednotky pro generování vodního paprsku. Výkonná jednotka představuje hardware, který reálně na základě řídicích impulsů z řídicí jednotky provádí pohyb řezné hlavice (Barcík a kol., 2012).

Největšího pokroku v řešení robotizovaných technologických pracovišť ve spojení s vodním paprskem se dosáhlo při koncipování tzv. CAD/CAM řezacích center, které se vyznačují komplexním propojení všech souvisejících funkcí. Podobně jako u obráběcího stroje bez obsluhy při mechanickém obrábění, navíc se zahrnutím i automatického programování pohybu robota při řezání pomocí senzorického systému (Krajný, 1998).

## 4.10 Vysokotlaké potrubí

Přivádí tlakovou pracovní kapalinu k pracovní řezací hlavě. Nejčastěji se využívá vinutých a pancéřových hadic.

Vlastní konstrukci potrubního zařízení předchází stanovení přípojovacích rozměrů součástí potrubí a určení výpočtových hodnot. Některé části návrhu potrubí jsou vázány na předpisy a normy. Jiné jsou ponechány na vůli konstruktéra. Materiál pro výrobu potrubí se volí podle požadavků pevnostních a provozních. Výpočty pevností jednotlivých částí potrubí je aplikací výpočtu tlakových nádob a některých strojních součástí (Neckářová, 1990).

## 4.11 Abrazivní materiál

Na kvalitu a řezný výkon mají vliv především materiál, tvar, velikost a hmotnostní tok abraziva. Abrazivum se přidává do kontinuálního vodního paprsku, čímž vzniká abrazivní vodní paprsek známý pod zkratkou AWJ (Barcík a kol., 2012).

Jak již bylo uvedeno, přidáváním abrazivního materiálu do proudu vody se zvyšuje účinnost paprsku. Do řezného procesu vstupuje abrazivo jako druhořadý nástroj. V případě, že by se daný materiál nevyužíval, nebylo by možné řezat tvrdší materiály, neboť malé částičky abraziva přimísené do plochy vodního paprsku zvyšují jeho účinek, v tom to případě mechanický (Maňková, 2000).

Jako nejdůležitější faktory, které je potřeba zvážit při správném výběru jednotlivého druhu abraziva patří zvláště:

- tvrdost – tvrdší druh abraziva zaručuje vyšší účinnost dělicího procesu, ale zároveň způsobuje rychlejší opotřebení hydroabrazivní trubice,
- cena – nákup tohoto materiálu představuje až 50 % celkových provozních nákladů,
- hmotnostní tok – se zvyšujícím se hmotnostním tokem se zvyšuje i kinetická energie paprsku, tím je dosahována hloubka řezu, po překročení kritického množství se však dosahovaná hloubka řezu snižuje a tím může dojít, až k ucpání hydroabrazivní trubice,
- velikost a tvar abrazivních zrn: zrna větších rozměrů vytváří na povrchu dělicích stěn hlubší rýhy, čímž dochází k horší kvalitě obrobenej plochy, ale při jejich použití se čas potřebný na prořezání materiálu zkrátí, tvar zrn ovlivňuje jak jakost dělených ploch, tak i dosahovanou hloubku řezu,

- ekologické nároky – využití abraziva při technologii řezání abrazivním vodním paprskem by měla splňovat požadavky jak zdravotní tak i ekologické nezávadnosti,
- recyklovatelnost – opětovného využití abraziva, aby se dále účastnilo řezacího procesu (Maňková, 2000; Krajný, 1998; Valíček, Hloch, 2008).

Tab. 1 Vlastnosti používaných abrazivních materiálů (Barčík a kol., 2012)

abrazivní materiál	velikost částic (MESH)	materiálové vlastnosti				
		kruhovitost	kulatost	tvrdost podle KNOOPA	relativní tvrdost	Hustota $g \cdot cm^{-3}$
granát	16–250	0,48	0,78	1350	1 (základní)	3,8
křemičitý písek	16–120	0,57	0,78	700	0,7	2,5
karbit křemíku	80–200	0,31	0,75	2500	50	3,2
ocelové piliny	16–100	0,55	0,82	400–800	2	7,5
měděné piliny	16–100	0,5	0,78	1050	0,4	1,5
sklo	16–100	1	1	400–600	0,5	2,5

Tab. 2 Chemická struktura Granát Barton (Barčík a kol., 2012)

Granát Barton $\{Fe_3Al_2(SiO_4)^3\}$	tvrdost: 8–9 MOHS stupňů
dioxid křemíku ( $SiO_2$ )	41,34 %
oxid železa ( $FeO$ )	9,72 %
kysličník železa ( $Fe_2O_3$ )	12,55 %
kysličník hlinitý ( $Al_2O_3$ )	20,36 %
oxid vápníku ( $CaO$ )	2,97 %
oxid hořčíku ( $MgO$ )	12,35 %

oxid manganu (MnO)	0,85 %
	100 %

Tab. 3 Chemická struktura Olivín 24 (Barčík a kol., 2012)

Olivín 24 ( $Mg_2SiO_4$ )	tvrdost: 7–8 MOHS stupňů
oxid hořčíku ( $MgO$ )	47–48 %
dioxid křemíku ( $SiO_2$ )	42–43 %
oxidy železa ( $FeO + Fe_2O_3$ )	do 8 %
kysličník hlinitý ( $Al_2O_3$ )	do 1 %
oxid vápníku ( $CaO$ )	do 0,5 %
ostatní látky	do 1 %
	100 %

#### 4.12 Těsnění

Od těsnění se požaduje co největší těsnivost, dlouhá životnost, konstrukční a výrobní jednoduchost. Kromě toho má splňovat ostatní ekonomické parametry běžné u ostatních strojních součástí (Zýma, 1990).

Základním problémem konstrukce multiplikátoru je utěsnění vysokotlaké komory, v těchto prostorách jsou nejčastěji tlaky 200–500 MPa. Je tedy nutné, aby těsnění mělo velice nízké průsaky či žádné, vysokou životnost a co nejmenší tření. Z konstrukčního hlediska se těsnění umísťuje do komory samotného multiplikátoru tak, aby se v něm plunžr mohl volně pohybovat. Těsnění s přirozeným utěšňováním spočívá ve vytvoření malé kontrolované mezery za pomoci tzv. pružného válcového pouzdra. K deformaci tohoto pouzdra dochází vlivem rozdílu tlaku na jeho vnější a vnitřní ploše (Krajný, 2001).

Těsnění s mezikroužky je další skupinou, které jsou využívány. Jejich princip spočívá v částečné deformaci mezikroužku. Ty potom utěšňují povrchy pístu a válce. Mezikroužky jsou vyrobené z modifikovaných plastů, jako jsou například teflon, vyztužené pomocí grafitu nebo skelnými vlákny. Deformace mezikroužku se dosahuje jednak pomocí přepětí, které vzniká působením přítlačné matice, kuželu a kovového kroužku a nebo autodeformací. Autodeformace využívá nízkotlakou kapalinu z hydrogenerátoru, která tlačí na píst a na kužel, který prostřednictvím kovového kroužku deformuje mezikroužek a tím dochází k utěšňování prostoru mezi pístem a válcem (Krajný, 2001).

### 4.13 Akumulátor

V okamžiku, kdy v multiplikátoru dochází ke zpětnému pohybu pístu, současně dojde ke změně tlaku ve válci. Tlak rapidně klesá, až k nule. V zápětí zase rychle stoupá na maximum. Při tomto poklesu tlaku, který celý probíhá v desetinách sekundy, nastává krátký časový interval, po který je přerušen souvislý tok řezné kapaliny a tím také vlastní proces řezání. Na eliminování tohoto nežádoucího jevu se do systému zařízení pro obrábění vodním paprskem přidává akumulátor. Akumulátor představuje dutý silnostěnný válec určitého objemu, v kterém je stlačena kapalina na pracovní tlak, který využívá stroj. V okamžiku zpětného pohybu pístu, při náhlém poklesu tlaku, expandující kapalina a část z ní proudí do řezací hlavičky z důvodu vyrovnání poklesu tlaku. Tím je zabezpečeno nepřetržitý tok kapaliny (Brym, 2008).

Generování vysokého tlaku kapaliny je možné dvěma způsoby. Prvé pomocí multiplikátoru, nebo triplexovým plunžrem (Barcík a kol., 2012).

### 4.14 Zařízení s multiplikátorem

Multiplikátorem rozumíme hydraulické měniče tlaku, jejichž účelem je zvyšování nebo snižování dodávky a tlaku kapaliny v hydraulickém obvodu tím, že předáváme energii původní kapaliny kapalině nové. Jedná se o zvýšení tlaku, nazýváme toto zařízení, jako zesilovač. Nový tlak je násobkem původního, proto multiplikátory. Jako zesilovače tlaku mohou sloužit všechny druhy diferenciálních pístů, u nichž lze z poměru ploch pístu vypočítat tzv. stupeň multiplikace (Šimůnek, 1969).

Hydraulické zařízení pro generování vysokorychlostního paprsku s multiplikátorem je tvořeno ze dvou okruhů:

- nízkotlakého,
- vysokotlakého (Barcík a kol., 2012).

Vysokotlaký okruh (sekundární) je řízen díky nízkotlakému (primární) okruhu prostřednictvím tlaku řídicí kapaliny hydraulické jednotky (Krajný, 1998).

Základní tlakové poměry lze objasnit následovně, pokud píst 1 působí jako tlak  $P_1$ , pak podle Pascalova zákona bude tlak  $P_2$  tolikrát větší, kolikrát menší plocha  $S_2$  vzhledem k ploše  $S_1$ .

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

$P_1$  - tlak na píst s menší plochou [MPa]

$P_2$  - tlak na píst s větší plochou [MPa]

$S_1$  - plocha menšího pístu [ $m^2$ ]

$S_2$  - plocha většího pístu [ $m^2$ ]

V zařízeních se z hlediska zajištění kontinuálního proudu vysokotlaké kapaliny používají dvojčinné multiplikátory. Pro tlak  $P_2$  pak platí:

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

Pro vyjádření zesílení tlaku na tlak  $P_2$  byla zavedena multiplikační konstanta  $i$ , která se vyjadřuje:

$$i = \frac{S_1 - S_2}{S_2} [-]$$

$i$  - multiplikační konstanta (koeficient zesílení tlaku).

Ztráty multiplikátoru (způsobené třením a netěsnostmi) zohledňují ve výpočtu vyvíjeného tlaku pomocí mechanické účinnosti, jejíž hodnota je kolem  $\eta_m = 0,95$ .

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

$\eta_m$  - mechanická účinnost multiplikátoru (Krajný, 1998).

Princip činnosti dvojčinného multiplikátoru: olej z hydrogenerátoru postupuje přes rozvaděč do první komory nízkotlakého válce multiplikátoru a vyvolává přímočarý vratný pohyb pístů, které jsou mezi sebou pevně propojeny. Vlivem toho pracovní kapalina, nacházející se v první komoře válce, kde je vysoký tlak. Dále postupuje přes zpětný ventil a akumulátor do řezací hlavy. Současně do komory druhého válce vysokého tlaku, z hydrogenerátoru přes filtr a zpětný ventil, proudí kapalina a zaplňuje tím dutinu multiplikátoru. Díky pístu, který se pohybuje do strany, během plnění první komory nízkotlakého válce dochází k současnému vyprazdňování druhé komory nízkotlakého válce (Barcík a kol., 2012).

Posuv pístu doprava, nebo doleva, je omezen dorazy a mikrosplínači, které dávají signál rozvaděči. Po dosažení krajní polohy se rozvaděč přepne a olej z hydrogenerátoru vteče do druhé komory nízkotlakého válce a proces probíhá opačně (tamtéž str. 42).

## 4.15 Zařízení s triplexový plunžrem

Tento způsob je méně vhodnou variantou z důvodu malého dosažitelného tlaku max. 275 MPa a velkého průtoku  $400 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  pro opracování dřeva. Představitelem tohoto typu zařízení je japonská firma SIGINO. Zařízení je charakteristické přímým řízením mechanismu s jednou konstrukcí klikového zařízení. Generování tlaku je zajištěno paralelním způsobem s válci s jednočinnou pístnicí (Barcík a kol., 2012).

## 4.16 Trysky

U zařízení na řezání abrazivním vodním paprskem je využíváno dvou trysek. Jedna tryška je vodní a druhá abrazivní.

### 4.16.1 Vodní trysky

Vodní tryška je základní součást zařízení na řezání čistým vodním paprskem. Vytváří a formuje vysokorychlostní paprsek kapaliny, čímž ovlivňuje jeho odchýlení, a tím i kvalitu a produktivitu řezání. Energie v takovémto případě je jako tlaková energie převedena na energii kinetickou. Vzhledem k různým požadavkům na pracovní tlaky a využití různých pracovních medií je vyráběno několik základních tvarů trysek (Barcík a kol., 2012).

Stejně jako i různé typy řezacích materiálů se používají i různé materiály, například safír, rubín nebo syntetický diamant. Výstupní průměr trysky je v rozmezí 0,07–0,4 mm. Použitý materiál při výrobě trysky má vliv na životnost vodní trysky. Samotná vodní tryška má vnější průměr 2 mm a výšku 1,5 mm, proto musí být zakomponována do konstrukce řezacích hlav. V nynější době je na trhu několik konstrukčních variant jednotlivých trysek. Rozhodujícím kritériem při volbě materiálu na výrobu trysek je jeho tvrdost. Při nízkých tlacích je možno využití i tvrdokovu. Nejdelší životnost mají však diamantové trysky (Barcík a kol., 2012).

Podle ústního sdělení zaměstnance firmy AWAC s r. o. Jaroslava Máši (mistr zakázkové výroby, programátor) ze dne 25. ledna 2016 mají diamantové trysky nejdelší životnost, přibližně 6–10 násobek životnosti trysek ze safíru a rubínu. Vzhledem k prodloužené životnosti diamantových trysek roste i jejich cena.

#### **4.16.2 Abrazivní trysky**

Zvýšení efektivity řezání vodního paprsku dosáhneme přidáním abrazivního materiálu do vody (Hashish, 1991).

Jako první prochází kapalina přes vodní trysku, kde se zformuje do požadovaného kapalinového paprsku. Zformovaný paprsek vstupuje po opuštění vodní trysky do směšovací komory, kde způsobí podtlak, který zajistí přísun abraziva přes přísavné potrubí za zásobníku. Abrazivo dodané do směšovací komory je strháváno vodním paprskem, který dodává kinetickou energii. Vodní paprsek s abrazivem prochází abrazivní tryskou, která umožňuje lepší promíchání abraziva a vody, zároveň zabraňuje rozpadu vodního paprsku. Existují i varianty, kde je abrazivo do směšovací komory přiváděno pod tlakem. Vnitřní průměr abrazivních trysek je 0,8–2,2 mm. Materiálem na výrobu abrazivních trysek je kubický nitrid bóru, řezná keramika nebo karbid wolframu s iontovou implementací. (Barcík a kol., 2012)

### **4.17 Způsoby vytváření abrazivního vodního paprsku**

#### **4.17.1 Nepřímé vstřikování abraziva**

Abrazivní částice jsou ze zásobníku vedeny do směšovací komory, kde jsou strhávány rychlostí vody. Směs je urychlována přes abrazivní trysku (kolimátor). Množství abraziva je 0,5–20 kg · min<sup>-1</sup>. Nejčastěji je vyžíváno tlaků 7–400 MPa (Barcík a kol., 2012).

#### **4.17.2 Přímé vstřikování abraziva (DIAJET-Direct Injection Abrasive Jet)**

Podle Barcíka a kol. (2012) smíšené abrazivum s vysokotlakou vodou v tlakové nádobě a stlačená suspenze je přidána do trysek speciální konstrukce. Tato tryska pracuje při tlacích do 100 MPa. V tomto případě může množství abraziva překročit i 20 kg · min<sup>-1</sup>. Paprsek takto vzniklý je označován jako ASJ tj. Abrasiv Suspension Jet. Při posuzování abrazivního paprsku je třeba brát v úvahu, že jeho složení je třífázové (pevné, kapalné a plynné skupenství).

Orientace zrn abraziva je zcela náhodná. Nejvyšší koncentrace je v obalové zóně (povrch paprsku). Koncentrace abraziva směrem k jádru paprsku se prudce snižuje. Jednotlivá zrna abraziva získávají kinetickou energii od vodního paprsku, kterou potom následně využívají na mikrořezání (tamtéž str. 25).



Povrchová vrstva se plasticky deformuje, přičemž dochází k porušení soudružnosti materiálu. V oblasti mikrořezání přichází do kontaktu s obráběným materiálem nové, dosud nepoužité řezné klíny nástroje abrazivního vodního paprsku. Obrobený povrch je složen z řezných ploch zanechaných řezných klínů (Barcík, 2007).

Stanovení hloubky řezu při abrazivním vodním paprsku je velice složitý proces. Je ovlivněna jak fyzikálně-mechanickými vlastnostmi obrobku tak i samotného abraziva. Hloubka řezu lze stanovit následovně:

$$e = \frac{A}{\sqrt{HV}} + \frac{B}{E+C}[\text{mm}]$$

A, B, C - jsou konstanty závislé na parametrech abrazivního vodního paprsku a na jeho rychlosti posuvu,

E - modul pružnosti,

HV - tvrdost obrobku podle Vickerse [ $N \cdot mm^{-2}$ ] (Barcík a kol., 2012).

#### **4.18 Použití metody a dosahované parametry v praxi**

Nekonečné využití WJM a AWJ ilustruje následující přehled:

- chemický průmysl - dělení výbušných látek (dynamit, tuhá paliva do raketových motorů),
- potravinářský - dělení ovoce a zeleniny v surovém a zmraženém stavu (maso, dorty, čokolády, sýr),
- elektrotechnický, elektronický - řezání a dělení feritů, keramiky, skla, amorfních látek ornamentních magnetů, plošných spojů),
- strojírenský - dělení titánu, wolframu, tantalu, uranu, extrémně tvrdých a těžko obrobitelných materiálů, kompozitu, skel, izolačních materiálů, výroba tvarově složitých součástí, lopatek, dílu tryskových a raketových motorů, turbín a kompresorů, řezání vláknitých materiálů, široké uplatnění v kosmickém, leteckém a lodním odvětví,
- stavební - dělení plastů jako polyuretan, polystyrén, čedičová vata, azbest, plastbeton, keramika, dlažba,
- gumárenský - řezání gumy, plastů vláken KEVLAR,
- papírenský - papír, fólie, buničina (bezprašná pracoviště, bez nebezpečí elektrostatických výbojů),
- obuvnický a galanterní - řezání pravé a umělé kůže, plastické hmoty,

- sklářský - řezání, matování a dělení skla veškerých druhů, až do hloubky 200 mm, tvarové řezy, vrtání do skla,
- jaderný - dekontaminace a odstraňování ochranných železobetonových vrstev v zařízení pro jaderné elektrárny, čištění a odstraňování usazenin (Maňková, 2000).

Abrazivní paprsek je vhodný pro řezání tvrdých a houževnatých materiálů, lze řezat materiály o tloušťce větší než 100 mm. Šířka řezné spáry je 1,1–2,5 mm. Rychlost řezání se pohybuje dle tloušťky a druhu materiálu od  $5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  pro kovy. Drsnost obrobeneho povrchu  $R_a = 2,5\text{--}12 \text{ } \mu\text{m}$ , podél tloušťky řezaného materiálu se mění. Na straně vstupu paprsku do řezaného materiálu je nejlepší, ale pouze asi do jedné třetiny řezu. Naopak nejhorší je na straně výstupu paprsku z materiálu. Kolmost řezaných stěn je  $0,3\text{--}6,4^\circ$  (Řasa, Pokorný, Gabriel, 2005).

Přesnost tvarů řezaných touto technologií je maximálně 0,1 mm u tenkých obrobků tloušťky do 10 mm. U obrobků tloušťky nad 10 mm je přesnost, až 1 mm. Kapalinovým paprskem lze kromě řezání, vyřezávání tvarů provádět také vrtání, odstraňování otřepů, úkosování a otryskávání. Můžeme řezat i tvarově složitě a málo tuhé obrobky (tamtéž str. 185).

Jak již bylo uvedeno, výše využití vodního abrazivního paprsku nachází stále širší použití v různých průmyslových odvětvích. Od dělení plochých, ale i tvarově složitých materiálů jako sklo, hliník, ocel, slitiny, litiny, kompozitní a keramické materiály, až po využití jako řezného nástroje řezání závitů (Maňková, 2000).

Dalším velice praktickým způsobem využití této technologie je soustružení, jako způsob obrábění. Obrobek rotuje a abrazivní vodní paprsek se posouvá ve směru osy obrobku. Úběr materiálu je způsoben radiálním posuvem paprsku do požadované hloubky řezu (tamtéž str. 83).

Také frézování vodním abrazivním paprskem, je využíváno pro tvarově složitě tvary na obrobku. Při postupu frézování se jedná o řezný proces, ale nejedná se o dělení materiálu. Vodní abrazivní paprsek neprochází celým obrobkem, ale odstraňuje pouze určitou vrstvu materiálu bez průniku skrze materiál (tamtéž str. 83).

Řezání překližek je možné, až rychlostí  $2000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  vztažené samozřejmě na druh a sílu desky (Řasa, Pokorný, Gabriel, 2005).

Využití technologie vodního abrazivního paprsku je natolik obsáhlá, že by zpracování pouze této oblasti stačilo na samostatnou publikaci.

## **5 ZPŮSOBY ŘÍZENÍ A ZADÁVÁNÍ TECHNOLOGICKÝCH DAT**

U této technologie je jednou z nepodstatnějších částí softwarové vybavení. To je spojeno s co nejefektivnějším způsobem výroby. V dnešní době bychom bez této součásti nic nevyrobili. Je to neodmyslitelná součást stroje, která zvyšuje výkonnost stroje. Pro optimální obrábění se zadávají druh obráběného materiálu, tloušťka a tvar dílce, pomocí nichž je optimalizován proces obrábění. Podle stále zdokonalujících se softwarů dokážou tyto programy nastavit optimální rychlost posuvu pro požadovanou kvalitu a přesnost řezu. V nynější době lze již měnit parametry obrábění i v průběhu obrábění.

### **5.1 Řídicí systémy**

#### **5.1.1 AsperWin**

Jeden z využívaných řídicích systémů ve spojitosti s technologií vodního paprsku je AsperWin od firmy MicroStep. Toto softwarové vybavení je zvláště určeno pro 2D řezání. Jak uvádí výrobce, zvláště tedy pro řezání plasmou, plamenem, laserem a vodním paprskem. Tento programový prostředek je určen pro tvorbu nářezových plánů a následné generování odpovídajícího řezacího kódu pro řezací stroj. Správnost již může být ověřována v simulačním módu, který je spuštěn na PC (AWAC 2016 a).

Jednotlivé díly jsou navrhovány jako nákresy, které mohou být importovány z užívaného CAD systému, pro bezproblémové fungování je doporučován formát DXF. Části, které jsou vyřezány, mohou být skládány automaticky, nebo je obsluha ukládá manuálně. Důležité technologické vlastnosti jako vstupy a výstupy, směr a pořadí řezání jsou nastavovány uživatelem předem vloženou šablonou. Všechny technologické vlastnosti mohou být ručně upravovány (AWAC, 2016; AWAC 2016 a).

Vstupní formáty akceptovatelné softwarem:

- DXF standardní formát pro popis tvaru dílu systému AutoCAD,
- DC2 standardní formát pro popis tvaru dílu systému DesignCAD,
- CNC NC kód ve smyslu normy DIN,
- ESI NC kód ve smyslu normy ESSI,
- REZ NC kód podle fy MicroStep,

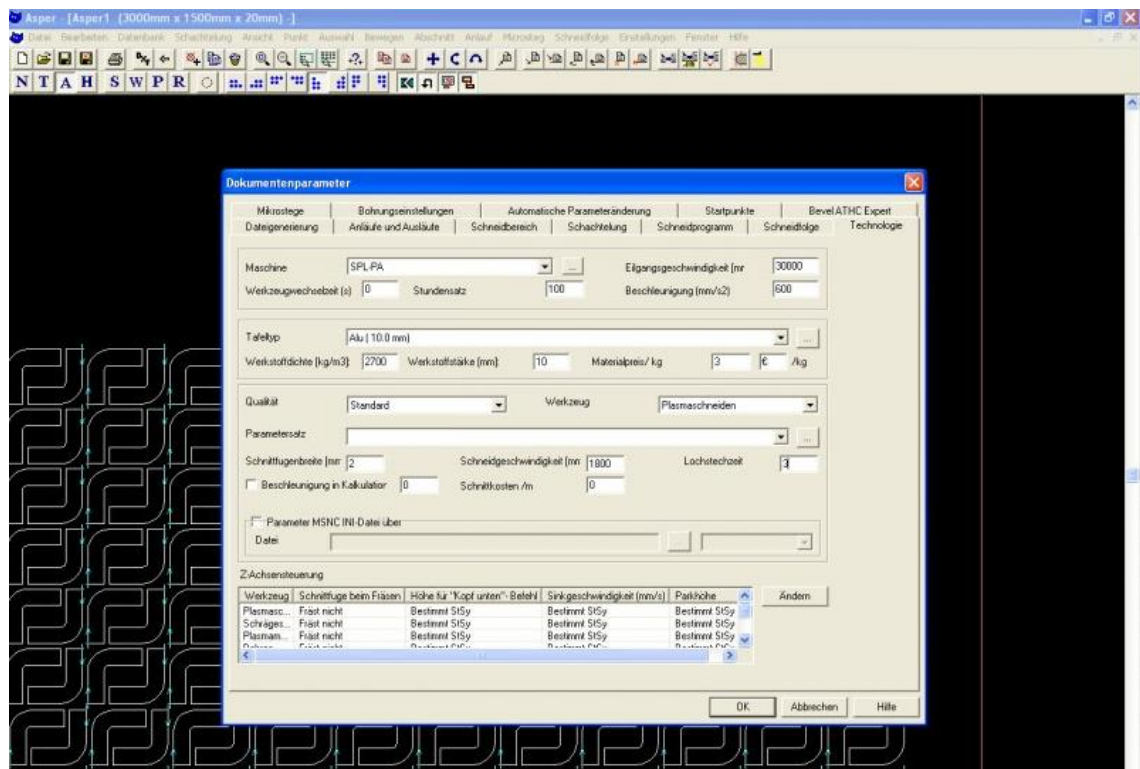
- PLA záznam řezacího plánu, který byl vytvořený ASPERWINEM,
- import dílu z knihovny WSelect, která je standardní součástí dodávky ASPERWINU (AWAC 2016 a).

Podle ústního sdělení zaměstnance firmy AWAC s r. o. Jaroslava Máši (mistr zakázkové výroby, programátor) ze dne 25. ledna 2016 má software AsperWin modulární strukturu. Jeho základní modul se využívá pro manuální skládání u standardních jednonástrojových řezacích strojů.

Funkce AsperWin:

- sekce - funkce, kdy řetězce tvořící jednotlivé části mohou být libovolně rozděleny na části jinak řečeno sekce a lze pro ně definovat různé atributy řezání, k úsekům nářezového plánu automaticky dotvoří nájezdy a výjezdy podle uživatelem nastavených parametrů, je možné je i manuálně modifikovat,
- importované díly - ideálním vstupním formátem je DXF, při využití tohoto formátu je možné převádět technologické atributy do kontur již během procesu navrhování, také software nabízí funkci vyhledávání chyb v designu a jejich následné opravy,
- interaktivní skládání - program obsahuje značné množství funkcí pro manuální umístění jednotlivých částí či libovolných skupin dílů,
- pořadí řezání - pořadí jednotlivých sekcí může být vytvořeno manuálně nebo automaticky, hlavním kritériem pro automatické pořadí je co nejkratší možná vzdálenost řezání při podmínce, že nejprve jsou řezány vnitřní prostory objektu (díry) a pak vnější tvary. Rozlišování děr a kontur je prováděno zcela automaticky,
- automatické skládání (AsperNest) - modul automatického skládání, pro efektivní skládání velkého počtu vyřezávaných dílců,
- knihovna maker - v základním modulu je obsažen systém AsperWin, ten obsahuje více než 50 nejčastějších užívaných tvarů, které nemusí být vytvořeny v CADu, obsluha pouze stanoví rozměry požadovaného tvaru,
- NCSim Simulator - umožňuje řídit NC kód v simulačním modu přímo na PC, jeho funkcí je kontrolovat správnost kódu a umožňuje tak v předstihu zabránit problémům, které by se mohly vyskytnout během řezu, čímž se zvýší výkon

a minimalizují materiálové ztráty, které by způsobily i vyšší finanční nároky (AWAC, 2016).



Obr. 1. Uživatelské prostředí AsperWin (MicroStep 2016 b)

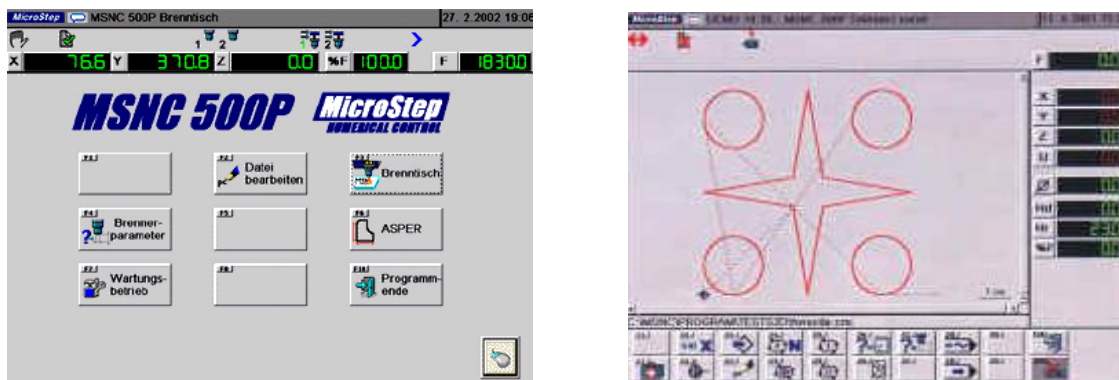
### 5.1.2 MSNC

Podle ústního sdělení zaměstnance firmy AWAC s r. o. Jaroslava Máši (mistr zakázkové výroby, programátor) ze dne 25. ledna 2016 je dalším často využívaným řídicím systémem MSNC firmy MicroStep. Jedná se o univerzální řídicí systém, který zabezpečuje všechny funkce pro spolehlivé a také pohodlné ovládání řezacích strojů. Je tvořen na bázi dvou rychlých PC modulů. Systém je vybaven barevnou obrazovkou s dotykovou folií a průmyslovou prachotěsnou a zároveň voděodolnou klávesnicí. Umožňuje kromě běžných řídicích funkcí zabezpečit dálkovou diagnostiku celého řezacího stroje. Funkce jsou například nastavení toku abraziva, nastavení vzdálenosti řezací hlavy či kalkulace nákladů.

Základní funkce MSNC:

- síťová podpora,
- automatická kalkulace akcelerace a křivek rychlosti,
- integrovaná databáze rozměrů,
- grafické zobrazení řezacích postupů,

- automatické adresování řezací hlavy (AWAC 2016 a; AWAC 2016 b).



Obr. 2. Uživatelské prostředí MSNC (AWAC 2016 b)

## 6 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Díky stále rychlejšímu technologickému vývoji a zvláště informačním technologiím, které rozšiřují stále větší možnosti veškerého uplatnění, ani tato technologie nezůstává pozadu. Technologie, které jsou zaváděny do praxe, dosahují stále lepší výsledků. Hlavně se to týká lepší kvality a přesnosti obráběných obrobků. V posledních několika letech je stále větší zájem o tuto technologii. Jednak je to v pohlížení na globální ekologické problémy ze strany zákazníku, ale také i optimalizování procesu jednotlivých firem. Hojně se začalo využívat řezání vodním paprskem firmami, které mají hlavní náplň obchodování, přípravu a pokládku dlažeb a obkladu vyšší pořizovací hodnoty. Jak mi bylo řečeno zaměstnanci některých firem, kvalita obrábění je mnohonásobně vyšší i s nižší zmetkovitostí.

Jak už bylo uvedeno v kapitolách výše má tato technologie nespočet výhod. Využití se tedy v žádném případě meze nekladou. Použitím vodního abrazivního paprsku je nejen technologicky výhodné, ale zvláště i ekonomicky efektivní. V opačném případě za technicky či ekonomicky nevhodné lze označit ty aplikace vodního abrazivního paprsku, kdy je levnější variantou použití jiných metod dělení materiálu.

Podle ústního sdělení zaměstnance firmy AWAC s r. o. Jaroslava Máši (mistr zakázkové výroby, programátor) ze dne 25. ledna 2016 cena abrazivního materiálu se liší podle druhu a účinnosti na řezný proces. Křemičitý písek je levnější než granát o 30 % a to hlavně z důvodu nižší účinnosti. Cena 1 kilogramu granátu se dnes pohybuje kolem 8–10 Kč. Samozřejmě je cena ovlivněna množstvím odebíraném danou firmou za

rok. Při vyšších spotřebách abraziva se tedy jedná o velmi významný výdaj, který se může snížit a to recyklováním abraziva. Nejčastěji je využíváno recyklačních jednotek. Tyto jednotky pomůžou znovu využít více než 50 % znovupoužitelného materiálu. Dále se tím sníží i výdaje na ekologickou likvidaci abrazivního materiálu. Ceny se samozřejmě pohybují různě vzhledem k umístění provozů. Často se ceny, ale pohybují okolo 1 Kč za 1 kg.

Další významné výdaje jsou spojeny s obměňováním opotřebovaných dílů. Nejčastěji vysokotlaká a nízkotlaká těsnění, vodní a abrazivní trysky a mnoho dalších. Jak již bylo uvedeno výše, životnost závisí na kvalitě používané vody, tlaku kapaliny a materiálu, z něhož jsou vyrobeny.

Podle ústního sdělení zaměstnance firmy AWAC s r. o. Jaroslava Máši (mistr zakázkové výroby, programátor) ze dne 25. ledna 2016 obecně platí, že se ceny komponentů značně liší a to podle výrobce. V Evropě jsou nejvíce zastoupeny společnosti FLOW a KTM. V České Republice jsou pak společnosti, které si stroje samy dokonce vyrábějí. To často, ale nemění nic na tom, že používají většinou trysky do řezacích hlav ve shodných rozměrech.

Co se týče ceny elektrické energie a vody, dochází k jejímu stálému růstu. Často i velice ovlivňuje cenu dlouhodobá smlouva a také umístění provozu.

Vzhledem k velkému počtu možných proměnných pro tvorbu ceny jednoho metru řezu jí nelze zcela objektivně ani taxativně stanovit. Firmy často ceny každé poptávky kalkulují individuálně, protože každý zákazník má jiné nároky na parametry obrábění.

Cena jednoho metru řezu závisí na:

- tloušťce a typu materiálu,
- tvarové složitosti dílce,
- požadované kvalitě obrobené plochy,
- sériovosti a celkovému objemu zakázky.

Obecný příklad výpočtu jednoho metru řezu u foliované překlížované desky jednostranně upravenou protiskluzovou úpravou.

Tab. 4 Přehled nákladů na provoz vysokotlakého čerpadla (PTV, 2015; AWAC, 2016)

název dílu	provozní doba (mth)	cena (Kč/ks)	náklady ( $Kč \cdot mth^{-1}$ )
vysokotlaké těsnění - sada	500	4530	9,06
nízkotlaké těsnění - sada	1000	1450	1,45
vysokotlaký válec	3000	25000	8,3
nízkotlaký válec	2000	5100	2,55
opravná sada (Check Valve)	500	4110	8,22
tělo (Check Valve)	5000	14890	2,97
opravná sada (Bleed Down)	1500	4980	3,32
sada vodních filtrů	200	290	1,45
olejový filtr	2000	2560	1,28
hydraulický olej	4000	8250	2,06
nespecifikované díly (ostatní)	2000	925	0,46
opravná sada On - Off ventilu	1000	4100	4,1
opravná sada ručního ventilu	3000	1625	0,54
abrazivní tryska	130	2630	20,23
řezací hlava s diamantovou vodní tryskou	500	19630	39,26
abrazivní materiál MESH 80	$kg \cdot mth^{-1}$	$Kč \cdot kg^{-1}$	$Kč \cdot mth^{-1}$
	21	7,5	157,5
Voda	$(l \cdot min^{-1})$	$(Kč \cdot m^{-3})$	
	4	40	9,6
	$(kW \cdot h^{-1})$	$(Kč \cdot kWh^{-1})$	
elektrická energie	37	4,25	157,3
Součet			429,65 Kč

Výše uvedené ceny byly přepočítávány z podkladů firem. Provozní doba je odvozena dlouholetým sledováním, ale je velice závislá na kvalitě vody, údržbě, odborných a včasných servisních zásahu do celého zařízení.



## 7 KVALITA ŘEZNÉHO PROCESU

Jedním ze základních odbytových činitelů, jak uvádí Lisičan (1996), je kvalita výrobku. U velké části části dřevařských výrobků lze odvozovat výslednou kvalitu od kvality řezného procesu. V našem případě kvalitou řezného procesu se rozumí výsledek činnosti nástroje na celkovou kvalitu produktu. Podmíněná je třemi druhy přesnosti: tvarové, rozměrové a povrchové.

Tvarová a rozměrová přesnost obrobku je tedy ovlivněna jednak přesností celého řezacího mechanismu stroje, a jednak nástrojem ve formě kapalinového paprsku. Zvláště drsnost obrobeného povrchu je při řezání vodním abrazivním paprskem naprosto specifická. Tato specifická je způsobena hlavně povahou kapalného nástroje. Od místa vstupu do materiálu po místo výstupu se zhoršuje (Barcík a kol., 2012).

Nerovnosti jsou nežádoucí důsledek probíhajících fyzikálních procesů. Nerovnosti vznikající při řezání se zvětšují i s nehomogenní stavbou dřeva. Rozdílné vlastnosti jarního a letního dřeva negativně působí na kvalitu opracování, výsledkem čeho je rozdílně členitý povrch obrobku. Rozdíl u dřeva nastává i u řezání napříč a podél vláken (Zemiar, 2009).

Jak uvedla Šebelová (2014) dalšími možnými pohledy na obrábění je z hlediska minimálních nákladů nebo z hlediska maximální výrobnosti.

### 7.1 Vlastnosti opracovaného povrchu

Při využívání všech vysoce energetických technologií jsou zanechávány viditelné stopy obrábění na ploše, kterou obrábíme. Povrch po řezání lze rozdělit na dvě oblasti. Část s hladkým povrchem (hladká zóna) a oblast s viditelnými rýhami po obráběcím paprsku (rýhovanou zónu). Drsnost povrchu rýhované zóny se zvyšuje se stoupající hloubkou řezu a rychlostí posuvu při řezání (Maňková, 2000).

Z teorie principu řezání vodním paprskem víme, že když vodní paprsek proniká, ztrácí svojí kinetickou energii a vychyluje se a tvoří typické zóny, které lze rozeznat v některých případech i pouhým okem. Hladká část v horní části řezu, je výsledkem řezného opotřebování a druhá rýhovaná zóna ve spodní části řezu vznikla jako důsledek deformačního opotřebení při řezání (Barcík a kol., 2012).

Kvalita povrchu řezu se dělí do pěti skupin podle výsledné kvality obrábění, která přímo souvisí s rychlostí posuvu řezací hlavy. Nejčastěji je využíváno označení pro

nejhorší kvalitu pod číslem 1 a nejlepší 5. Běžné označení kvality se udává v podobě Q1–5.

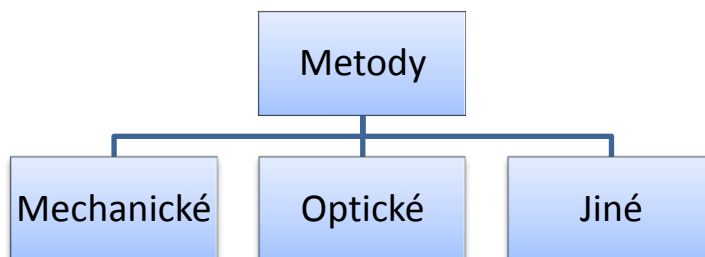
## **7.2 Hodnocení topografie povrchu**

Od počátku roku 1930, kdy vznikly první stroje pro měření topografie povrchů, byl zaznamenán velký pokrok. Jednak v metodách, ale zároveň i v měřicích zařízeních. V šedesátých letech byl pokrokem uplatnění digitálních metod. Tyto metody znamenaly možnost hodnocení povrchu metodou 3D (Bumbálek a kol., 1989).

Kontrola jakosti povrchů z hlediska jejich funkčnosti je velmi důležitá, proto je řízená normami. Normy hodnocení povrchů v oblasti technologie vodního paprsku doposud nebyly zavedeny. Avšak možnost kvantitativního hodnocení drsnosti povrchů, byla přijata evropskou normou ISO 4287, která charakterizuje geometrické specifikace povrchů (Bátora, Vasilko, 2000). Odborníci však doporučují využít normu, jak ČSN EN ISO 4287 tak i ČSN EN ISO 4288 (Pernikář, Tykal, Vačkář, 2001). Je to zvláště z toho důvodu, že tvar mikrogeometrických nerovností obrobených povrchů je velmi rozmanitý.

Podle normy ČSN EN ISO 4287 se rozlišuje základní profil P povrchu, profil vlnitosti W povrchu a profil drsnosti R povrchu. Dá se říci, že základní profil je ideálně hladký. Profil vlnitosti je charakterizován frekvencemi s nízkými a vysokými amplitudami nerovností povrchů. Profil drsnosti je charakterizován vysokými frekvencemi a nízkými amplitudami nerovností povrchu.

### 7.3 Rozdělení metod pro hodnocení topografie povrchu:



Obr. 3. Schematické rozdělení metod pro hodnocení topografie povrchu

#### 7.3.1 Mechanická metoda

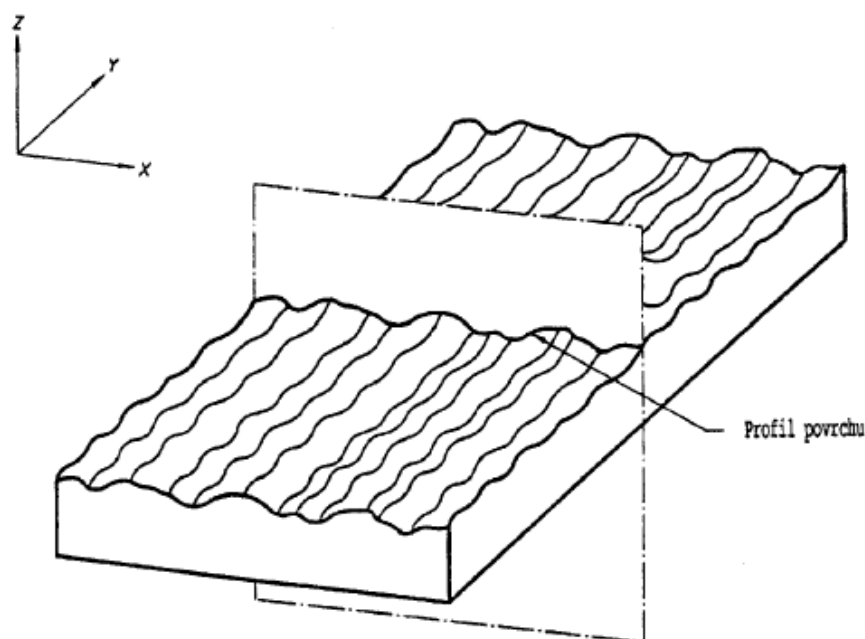
Mechanická neboli dotyková metoda je doposud nejrozšířenější metodou. Zejména je hojně využívána ve strojírenské praxi. Výhodou je její přímé měření a možnost použití pro všechny typy povrchů. Analogový záznam topografie povrchu, který je výsledkem této metody, lze bez problémů převádět do digitální formy pro další zpracování či publikování. V odborné literatuře se naměřené hodnoty touto metodou používají jako srovnávací hodnoty pro jiné metody měření nebo jako vztažné. Hlavní výhodou této metody je její reprodukovatelnost. To znamená, že geometrický profil můžeme změřit opakovaně a identicky. V důsledku tlaku na hrot snímače nicméně dochází k elastické a plastické deformaci v povrchové vrstvě měkčích materiálů. Intenzita deformace povrchu závisí na tvrdosti povrchu snímaného vzorku (Valíček, Hloch, 2008).

#### 7.3.2 Optické metody

Alternativou k měření topografie povrchu k dotykovým profilometrům jsou optické metody. Jedná se o bezdotykové měření, což vylučuje jakékoliv poškození měřeného povrchu. Dotykový hrot je nahrazen světelným svazkem, který se odráží nebo rozptyluje na měřeném povrchu. Interakce mezi světlem a měřeným povrchem závisí hlavně na vlnové délce světla, drsnosti povrchu a na materiálových vlastnostech zkoumaného vzorku. Nevýhodou je, že tyto metody jsou nepřímé. Data získaná experimentálním měřením optickými metodami je nezbytné porovnat s daty získanými kontaktním profilometrem. Při srovnání nemusejí být vždy měřící spektrální rozsahy metod shodné. Tato metoda je vhodná pro situace, kdy nerovnosti nedosahují více než 1  $\mu\text{m}$ . V praxi je ale běžně dosahováno u řezání kovových obrobků drsnosti 1–10  $\mu\text{m}$ . Z toho důvodu byla vyvinuta Institutem fyziky Hornicko-geologické fakulty VŠB-TUO vyvinuta optická stínová metoda (Valíček, Hloch, 2008).

### 7.3.3 Jiné metody

V praxi existuje celá řada metod měření charakteristik topografie povrchu, které pracují na jiném než mechanickém nebo optickém principu. Příkladem je měření nerovnosti povrchu proudem stlačeného vzduchu, RTG difrakční metoda, elektronová difrakce, neutronová difrakce, STM a AFM, MFM (Valíček, Hloch, 2008).



Obr. 4. Profil povrchu (ČSN EN ISO 4287).

## 7.4 Chyby vznikající během řezání

### 7.4.1 Kvalita řezné plochy

Vystupující paprsek z obráběného materiálu se s narůstající vzdáleností od trysky rozpadá. To má za následek zvětšující se šířku paprsku a pokles erozivního účinku v důsledku ztráty kinetické energie. Výsledkem je rozšíření řezné spáry a vzniku odchylek (Krajný, 1998).

Podle ústního sdělení zaměstnance firmy AWAC s r. o. Jaroslava Máši (mistr zakázkové výroby, programátor) ze dne 25. ledna 2016 jsou mezi nečastější odchylky kolmosti (zúžení stěn obrobené plochy):

- odchylka tvaru V - horní část řezné mezery je širší než spodní. Je to způsobeno jako důsledek delšího působení proudu na materiál a jedná se o nejrozšířenější typ odchylky kolmosti v praxi,
- obrácená odchylka kolmosti (reverzní) vyskytuje se nejčastěji u měkkých materiálů a projevuje se jako širší řeznou mezerou ve spodní části obrobku,
- soudkovitá odchylka kolmosti se projevuje širší řezem ve středu materiálu a uší řeznou mezerou v horní a dolní části obrobku (Krajný, 1998).

Tyto odchylky kolmosti úzce souvisí s optimálním nastavením posuvné rychlosti obrábění.

Optimální rovnováha mezi rychlostí řezu, odolností a tloušťkou materiálu je taková, že paprsek je udržen po celou dobu průchodu materiálem ve válcovitém tvaru. Díky tomu tvarové nepřesnosti (úkos) nevznikají. Velmi rychlý nebo řez odolnějším materiálem se projeví zužujícím se tvarem řezné spáry. Parametry obrábění pro některé materiály jsou stále v rámci výzkumu (CHPS s. r. o. 2016).

Dalším častým problémem v provozech je nepravidelná hloubka stopy řezu, jak mi bylo sděleno od zaměstnance firmy AWAC s r. o. Jaroslava Máši (mistr zakázkové výroby, programátor) dne 25. ledna 2016. Neúplné prořezání materiálu. Tento jev vzniká zvláště u konce řezu. Tento úkaz vzniká při výrazném snížení posuvné rychlosti. Ve spodní části dojde k přeskočení proudu a vzniká neprořezaná část obráběného materiálu. Častým označením, pojmenováním toho jevu u zaměstnanců firmy je tzv. „nos“.

#### **7.4.2 Povrchové vady při řezání**

Nejčastějším vznikem povrchových vad jsou rozptýlené částice kapaliny a abraziva otryskávajícího povrch materiálu v blízkosti řezné hrany, jak uvedl zaměstnanec firmy AWAC s r. o. Jaroslav Máša (mistr zakázkové výroby, programátor) dne 25. ledna 2016. Dochází k odstranění povrchové úpravy nebo ke vzhledovým kazům, které jsou nejčastějším problémem. Problém se řeší přiložením měkkého materiálu na povrch řezaného materiálu nejčastěji dřevotřískovou deskou nebo jiným aglomerovaným materiálem.

Může se objevit i situace, kdy kapalina z nádrže při začátku řezání se dostane na povrch obrobku a tím dojde k ušpinění.

## 8 POSOUZENÍ VLIVŮ OBRÁBĚCÍCH PARAMETRŮ

Jak uvedla Šebelová (2014) optimalizace procesu obrábění slouží ke stanovení určitých parametrů obrábění pro dosažení kvalitativního, kvantitativního a ekonomického hlediska výroby.

Tlak pracovního kapaliny je nejdůležitějším parametrem tohoto obrábění. Vzhledem k tomu, že má nejvýznamnější vliv na proces dělení materiálu. Zvyšováním pracovního tlaku stoupá i možná hloubka prováděného řezu. Dále zvýšený tlak také působí na posuvnou rychlost, čím vyšší tlak, tím můžeme zvolit vyšší posuvnou rychlost. Při volbě vyššího tlaku nám klesá spotřeba abraziva, což může tvořit finanční úsporu. Změnou vnitřního průměru trysky pro vodní paprsek se mění průtok kapaliny a zároveň i kinetická energie paprsku. Se zvyšujícím se průměrem trysky se zvyšuje zároveň i energie paprsku. Díky tomu může paprsek pronikat hlouběji do materiálu. Dalším ovlivňujícím faktorem je volba vhodného abrazivního materiálu. Volba materiálu velmi často závisí na ekonomických možnostech dané firmy a také na dopadu na životní cyklu vybraného materiálu ve výrobě. Abrazivum jako takové bychom mohli hodnotit z několika hledisek: z pohledu hustoty, tvrdosti a pevnosti. Tyto parametry jsou velmi důležité pro různé materiály. Abraziva jednoho druhu nemusí být vhodná na obrábění jiných materiálů, které se nám mohou vyskytnout ve výrobě. Zde nastává tedy problém se správným výběrem. Dalším ovlivňujícím parametrem může být tvar a velikost zrn abraziva. Je tedy důležité při výběru nevybírat pouze podle ceny, ale dle vlastností a jednotlivých charakteristik. Dále musíme také zvolit přímo ve výrobním cyklu hmotností tok abraziva. Toto při chybějících zkušenostech zvyšuje nákladovost výroby i zmetkovitost. Při vyšším množství abraziva se zvyšuje hloubka řezu (Barcík a kol., 2012; Krajný, 1998).

Se snižováním posuvné rychlosti výrazně narůstá maximální hloubka řezu i při ponechání nezměněných dalších parametrech. Zlepšuje se také kvalita obrobené plochy. Při volbě menší rychlosti dopadá více abrazivních částic na povrch a narůstá energie potřebná na rozrušování materiálu. Dalším důsledkem změny rychlosti je i změna tvaru řezné plochy. Vzdálenosti trysky od materiálu má značný vliv na rozrušování paprsku, který tím ztrácí svůj tlak a také rychlost kapaliny. Snažíme se tedy o co nejnižší možnou výšku. Důvodem je provzdušňování vody, čili postupné sycení paprsku od povrchu směrem k jádru paprsku okolním vzduchem. Paprsek si zachovává kompaktní jádro proudu tlakové kapaliny s konstantní rychlostí rovnou rychlosti vytékání paprsku

trysky. Jako nejúčinnější a zároveň nejpoužívanější úhel dopadu vodního paprsku na materiál je 90 °. Je hojně využíváno i jiných úhlu, ale pro jiné případy obrábění (Barčík a kol., 2012; Krajný, 1998).

## **9 ČLENĚNÍ TECHNOLOGICKÝCH POSTUPŮ**

Současná strojírenská výroba klade požadavky na komplexnost, úplnost a vysokou úroveň výrobních postupů. Úroveň technologického postupu ovlivňuje konečné kvalitativní výsledky. Pro správné pochopení je to přesnost rozměrů a tvarů i stav povrchu opracovaných ploch a dále kvantitativní výsledky, které ovlivňují ekonomickou stránku řešení. Pro splnění podmínky se technologický postup člení. Podle typu výroby až do čtyř stupňů na jednotlivé operace - úseky - úkony - pohyby

Operace je část procesu, prováděná nepřetržitě při jednom čase, charakterizována stejným výrobním cílem. Je vykonávána na určitém dílci nebo několika stejných dílcích na jednom pracovišti nebo jedním strojem a také často jedním pracovníkem.

Úsek je pouze část operace, kdy se vykonává práce za stejných technologických podmínek, jedním nástrojem nebo skupinou nástrojů pracujících současně na jedné ploše nebo skupině ploch dílce. Často se skládá z několika záběrů a to v případě, že se obrábí tatáž plocha na několikrát.

Úkon je část úseku, charakteristický jednoduchou pracovní činností, organizačně nedělitelnou. Například spuštění stroje nebo zapnutí posuvů. Hlavní úkon je ten, při kterém se realizuje vlastní předepsaná práce.

Pohyb je nejjednodušší část pracovní činnosti, uváděná zvláště v hromadné výrobě a u montážních prací. Je to ten nejmenší měřitelný prvek operace.

Členění technologických postupů u výroby kusové a malosériové se člení zpravidla na operace a úseky. U výroby středně sériové se členění technologické postupy na úkony, zejména u složitých operací. Členění na pohyby se využívá u hromadné výroby, kde se provádí analýza operace tak, aby bylo možné zjistit složky neproduktivní činnosti a automatizovat výrobní proces (Kocman, 2004).

## **10 DÍLČÍ ZÁVĚR**

Technologie řezání vodním abrazivním paprskem je natolik obsáhla, že důkladné shrnutí snad není ani možné. Tento poznatek je ve shodě s použitelností vzhledem k tomu, že tato technologie je víceúčelová a je jí možno využít na většinu dostupných

materiálů. Se stále zvětšujícím se počtem nových materiálů roste i možnost použití. Vzhledem k pokročilému softwaru, který je, každým rokem propracovanější, roste i využitelnost této technologie. V optimalizaci procesu obrábění touto technologií stále dochází k pokrokům každý den. Nejrychleji k tomu dochází u materiálů, které mají homogenní strukturu a jsou vyráběny se stále stejnými vlastnostmi, které se nemění.

## **11 MATERIÁL A METODIKA**

Postup pro návrh metodiky stanovení optimálních řezných podmínek obrábění materiálu foliované vodovzdorné překližované desky vycházel z následujících kritérií:

- různá rychlost posuvu,
- výsledky měření bakalářské práce,
- čas výroby,
- náročnost programování tvarů vzorků,
- podélný a příčný řez desky,
- cena řezání.

### **11.1 Řezací zařízení**

Sledovaný materiál byl obráběn na zařízení firmy AWAC spol. s r. o. s pobočkou v Brně. Zařízení MICROSTEP AQUACUT 1501. 20 W s vysokotlakým čerpadlem KMT STREAMLINE SL - V 50 PLUS. Parametry řezacího stroje jsou: rozměry pracovního stolu 4000 x 2500 mm, zdvih 150 mm, pracovní tlak 380 MPa., řídicí systém MSNC, jedna hlava pro řezání. Přesnost podle DIN 28 206. Vzdálenost trysky od materiálu 2 mm. Čerpadlo KMT STREAMLINE SL - V 50 PLUS je dimenzováno na tlak 414 MPa, výkon 37 kW, maximální průtok čerpadla  $3,79 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  a objem akumulátoru 0,96 l (KMT 2016; MicroStep 2016 a).





Obr. 5. Řezací systém MICROSTEP AQUACUT 1501 (Baymetik 2016)



Obr. 6. Vysokotlaké čerpadlo KMT STREAMLINE SL - V 50 PLUS (KTM 2016)

## 11.2 Materiál

### 11.2.1 Překližovaná deska

Překližovaná deska je tvořena množstvím dých lichého počtu. Musí být zachováno pravidlo symetrie. Pravidlo značí, že od středové vrstvy je stejný počet dých na levé i pravé straně. Jednotlivé dýhy jsou vzájemně slepeny, přičemž směr vláken sousedících vrstev je na sebe kolmý. Lepicí směs je nanášena válcovými nanášečkami v množství  $145 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  (Janák, Král, 2003).

### 11.2.2 Vodovzdorná překližka

Podle Krále a Hrázského (2005) jsou vodovzdorné překližky vyráběny ve dvou provedeních:

- jehličnaté (povrchová dýha z jehličnatých dřevin),
- listnaté (vnitřní dýhy jsou z jehličnatých i listnatých dřevin, avšak povrchové dýhy tvoří listnaté dřeviny).

Vodovzdorné překližky se vyrábí jak v podélném nebo příčném provedení. Dodávají se nebroušené i broušené. Pro své dobré pevnostní vlastnosti, nízkou objemovou hmotnost a rozměrovou stálost se používají na výrobu dřevěných obalů, podlah, ve stavebně - truhlářské výrobě, automobilovém průmyslu a stavebnictví. Překližované desky jsou určeny jako nosná i nenosná deska pro použití ve vlhkém prostředí. Desky lze použít pro třídu ohrožení 1 a 2. Na výrobu se používají vodovzdorné lepidla. Požadavky na lepení jsou takové, aby bylo dosaženo třídy lepení 3 podle ČSN EN 314 - 2. Třída úniku formaldehydu A podle ČSN EN 1084 splňuje podmínky emisní třídy E1. Stupeň hořlavosti C2 - středně hořlavé podle ČSN EN 335 - 3. Všemi těmito podmínkami je charakterizována odolnost jak proti povětrnosti tak i působení tekoucí vody a v neposlední řadě vodní páře obsažené ve vzduchu. Nejčastější tloušťky desek dostupné na trhu jsou následující 4; 5; 6; 8; 9,5; 10; 12; 15; 18; 21; 24; 28; 30 mm, formát desek 250x125 nebo 125x250 cm (tamtéž str. 14).

Ve stavebnictví je nejčastěji využíváno desek o rozměrech 120x120 cm a tloušťky 15 mm s povrchovou folií. Lisování je prováděno při teplotách 140 až 145 °C a doba lisování je odvozena jako u ostatních překližek. Je tedy uvažováno 3 minuty + 1 minuta na každý mm tloušťky překližky do poslední lepené spáry k centrální ose. U překližek třívrstevných a pětivrstevných je lisovací tlak 1 MPa. Sedmi, devíti, a jedenáctivrstevné se lisují 1,5 MPa polovinu lisovacího času, druhá polovina mínus 1 min tlakem 0,8 MPa a poslední minuta tlakem 0,4 MPa (tamtéž str. 179).

### 11.2.3 Foliované vodovzdorné překližované desky

Tento materiál se od běžné vodovzdorné překližky liší tím, že na úpravu povrchu se používá papír impregnovaný fenolformaldehydovou pryskyřicí (fólie). Tloušťka fenolické fólie je vyjádřena v  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ , nejčastěji  $120 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  a protiskluzovou folií  $145 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  (DYAS 2016).

Možné varianty desek:

- Oboustranně hladká:  
TWIN - první dýha pod folií buk nebo celtis, vnitřní dýhy z měkkých dřevin,

KOMBI - první dýha pod folií je buk nebo celtis, vnitřní dýhy podélné z měkkých dřevin, příčné z buku.

- Jednostranně hladká, druhá s protiskluzovou úpravou v provedení KOMBI. Hrany překližek jsou ošetřeny nátěrem proti vnikání vlhkosti (Kráal, Hrázský, 2005).

Překližky s hladkou folií jsou určeny zvláště pro betonářské účely, bočnice přívěsných vozíků. Protiskluzovou úpravu lze požit na ložnou plochu přívěsných vozíků a nákladních vozidel za podmínky, že překližky KOMBI splňují vyšší požadavky na zatížení, než překližky s označením TWIN, vykazují vyšší tuhost a pevnost. Použití překližek na podlahu pro silniční vozidla je přesnost svislého zatížení závislá na vhodném rozložení podpor (podélníku a příčnicku) umístěných v podlaze vozidla (tamtéž str. 14).

Tyto desky jsou vyráběny ve dvou základních jakostech první a druhá jakostní třída. Třída úniku formaldehydu splňující podmínky emisní třídy E1. Stupeň hořlavosti C2 - středně hořlavé podle ČSN EN 335 – 3. Třída ohrožení 3 podle ČSN EN 335 - 3. Mezi nejčastější tloušťky desek patří 8; 10; 12; 15; 18; 21; 25 mm, formát 125x250 cm (tamtéž str. 15).

### **11.3 Metodika stanovení nerovnosti obrobeného povrchu**

Měření nerovnosti obrobeného povrchu bylo prováděno pomocí zařízení Mitutoyo surfest SJ 201P. Zpracování výsledků zařízení bylo provedeno v programu SurfTest SJ201 verze 3.20 s exportem umožněného do programu Excel tabulkového kalkulátoru firmy Microsoft. Systém pracoval v prostředí MS Windows XP Professional.

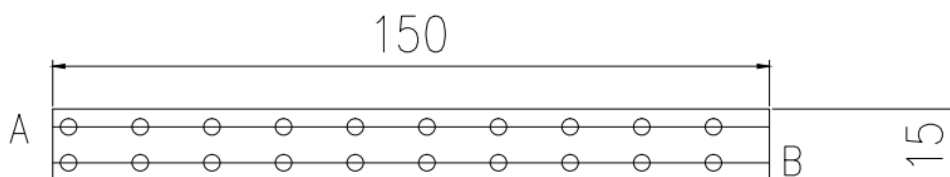
Celý postup stanovení nerovnosti obrobeného povrchu je možno rozdělit do následujících kroků:

1. Příprava zařízení
2. Polohování měřeného vzorku
3. Měření
4. Vytvoření certifikátu měření
5. Export výsledků do tabulkového kalkulátoru Excel

Postup zpracování:

1. Zařízení muselo být zkompletováno a zapojeno dle návodu výrobce. Propojení měřicího zařízení se stolním počítačem bylo provedeno pomocí konektoru RJ45. Nastavení rozsahu měřicího zařízení bylo nastaveno dle manuálu a norem pro měření drsnosti.
2. Typ měřicího zařízení neumožňoval odnímatelnou měřicí jednotku, proto bylo zapotřebí vypodložit měřicí zařízení materiálem stejných rozměrů. Po správném vypodložení zařízení byl umístěn hrot měřicího zařízení do správné polohy

Z literatury víme, že rozdělení hladké a rýhované zóny velice závisí na druhu materiálu a parametrech obrábění. V našem konkrétním případě nešlo jednoznačně určit přechod mezi rýhovanou a hladkou zónou. Byla tedy zvolena osa v polovině tloušťky vzorku, jako pomyslný střed pro přechod jednotlivých zón. Měření probíhalo vždy ve středu jednotlivých zón.



*Obr. 7. Znázornění konkrétních míst měření drsnosti zařízením SJ 201P*

Na Obr. 7. je vyobrazeno míst měření drsnosti povrchu po obrábění vodním abrazivním paprskem. Přímka A označuje pomyslnou polovinu hladké zóny a přímka B polovinu rýhované zóny.

3. Pomocí zařízení bylo uskutečněno měření drsnosti. Dráha jednoho měření byla vždy jiná díky využití normy ČSN EN ISO 4288. V místech, kde skončilo měření, hned navázalo další. Byla přeměřena celá délka vzorku z obou stran. Tento postup byl zvolen z důvodu lepší prokazatelnosti výsledků a vyššího počtu měření pro doložení.
4. Výsledky byly zobrazovány v programu SurfTest SJ20 s možností vytvoření certifikátu měření.
5. Naměřená data byla pomocí schránky exportována do tabulkového kalkulátoru MS Excel, ve kterém je možno provádět další případné zpracování.

## 11.4 Grafické zpracování výsledků nerovnosti obrobeného povrchu

Zpracování výsledků nerovnosti obrobené plochy v závislosti na posuvné rychlosti byly vytvořeny v programu Statistika 12 a to označované jako „2D grafy průměrů s odchylkami“. Zdrojová data pro vytvoření grafů byly vyexportované výsledky z programu SurfTest SJ201 verze 3.20, které byly uloženy v programu MS Excel. V nastavení jednotlivých grafů byly zvoleny následující parametry, střední hodnota - průměr, hodnota krabic - směrodatná chyba, hodnota svorek - interval spolehlivosti (Lisec, 2015).

## 11.5 Metodika měření poškození hrany voděodolné překližky

Měření poškození hrany voděodolné překližky bylo prováděno pomocí systému analýzy a zpracování obrazu NIS – Elements AR, verze 2.30, který sestával z digitální 5 Mpix kamery Nikon DS – Fi 1 s makroobjektivem Navitar, umístěné na stojanu s osvětlovacím zařízením KAISER RB 5000 DL a počítače s programem NIS – Elements AR, verze 2.30 (procesor Intel Pentium 4 CPU, 3.00 GHz, HD 320 GB, RAM 2 GB). Systém pracoval v prostředí MS Windows XP Professional.

Celý postup sledování poškození hrany je možno rozdělit do následujících kroků:

1. Příprava scény
2. Digitalizace
3. Měření
4. Zpracování výsledků

Postup zpracování:

1. Vzorek analyzovaného materiálu byl umístěn na osvětlovací stojan a osvětlen osvětlovačem KAISER RB 5000 DL tak, aby byla k objektivu kamery obrácena vždy ta plocha, která byla při řezání orientována jako spodní.
2. Po zvolení zvětšení, finálním zaostření a vizuální kontrole byla scéna nasnímaná kamerou Nikon Ds – Fi 1 s makroobjektivem Navitar. Před vlastním snímáním byla provedena rozměrová kalibrace systému – do systému byly vloženy reálné rozměry zobrazované scény vzhledem k aktuálnímu zobrazovacímu měřítku. Po zaostření a expozici byla získaná obrazová data uložena na HD jako soubory ve formátu \*.lim. Tento formát umožňuje díky integrované kalibrační konstantě měření okamžitě po otevření snímku (souboru). Kalibrační konstanta je do

souboru zadávána v procesu kalibrace již při jeho ukládání a vyjadřuje skutečné fyzické rozměry (délka, šířka) snímaného objektu. Po otevření snímku se konstanta aktivuje a nastaví odpovídající podmínky měření.

3. Při vlastním zpracování byly výše uvedené soubory otevřeny a obraz samotného poškození hrany byl pomocí segmentace barevného obrazu převeden na tzv. binární obraz, který se používá k měření ploch. Pro všechny vzorky (140, 280, 420, 560, 700) byly použity stejné parametry segmentace. Byla změřena celková plocha uvedeného binárního obrazu.
4. Naměřená data byla pomocí schránky exportována do tabulkového kalkulátoru MS Excel, ve kterém je možno provádět další případné zpracování. Byly zpracovány prezentace, které ukazují velikost poškození příslušné měřené hrany (červeně) sledovaného vzorku (Mazal, 2015).

## **11.6 Grafické zpracování vad desky**

Grafické zdokumentování vad desky probíhalo na digitálním mikroskopu Keyence VHX-5000, který je umístěn v biometrické laboratoři Ústavu hospodářské úpravy lesu a aplikované geoinformatiky. Mikroskop měří topografii povrchu pomocí ostření a rozostření obrazu, tzv. Focus Variation. K měření byl využíván objektiv VH-Z100, který nabízí zvětšení 100-1000x.

## **11.7 Příprava zkušebních vzorků**

### **11.7.1 Tlak řezací kapaliny**

Tlak řezání byl zvolen 385 MPa. Tento tlak byl zvolen zaměstnanci firmy AWAC s r. o. pro bezproblémové nastavení stroje a zkušenostmi s daným materiálem a při obdobném tlaku obrábění.

### **11.7.2 Směr opracování vzorků**

Směr opracování materiálu vycházel ze zkušeností, závěrů bakalářské práce a výzkumu doc. Ing. Štefana Barčíka, CSc. Byl zvolen řez jak podélný, tak i příčný – vztahující se k základnímu délkovému rozměru desky.



*Obr. 8. Zkušební vzorky*

Na výše uvedeném obrázku 8. jsou barevně znázorněny skupiny vzorků. Jednotlivé barvy mají zastupovat i jednotlivé posuvné rychlosti.

### **11.7.3 Posuvná rychlost řezání**

Rychlost obrábění byla zvolena 140, 280, 420, 560, 700 mm · min<sup>-1</sup>. Tato rychlost vycházela ze zkušeností a závěrů bakalářské práce a výzkumu p. doc. Ing. Štefana Barčíka, CSc.

### **11.7.4 Abrasivní materiál**

Jako abrasivní materiál byl zvolen granát MESH 80.

### **11.7.5 Vzorky**

- a) Rozměry zkušebních vzorků: požadovaná šířka zkušebního vzorku:  $\check{s} = 25$  mm, délka vzorku:  $l = 150$  mm.
- b) Tloušťka materiálu 15 mm foliované břízové překližované desky jednostranně upravené protiskluzovou úpravou.

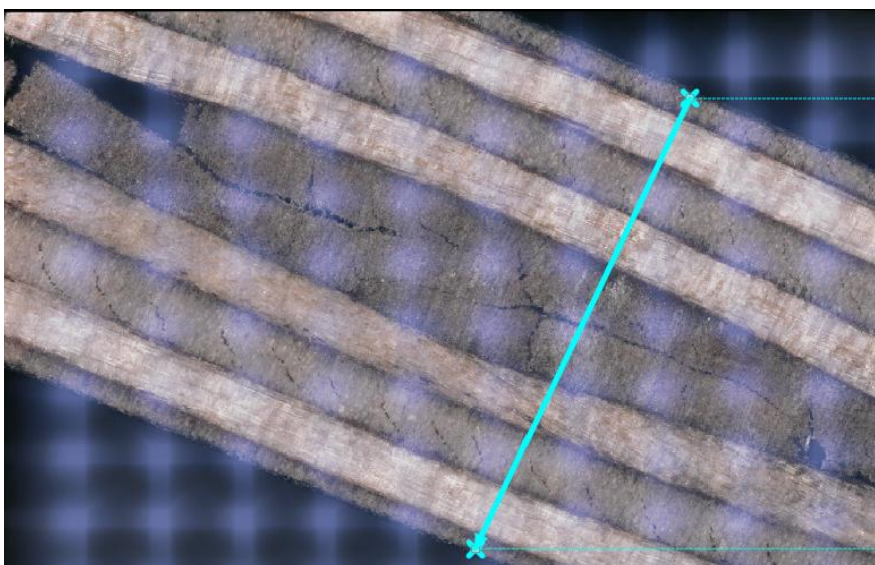
### **11.7.6 Proces řezání**

K dosažení správného výsledku obrábění bylo potřeba nejdříve zařízení správně naprogramovat, to bylo možné při využití zkušeností jednotlivých pracovníků, kteří se již podíleli na řezání vzorků na bakalářské práci se stejným druhem materiálu. Celkem bylo vyřezáno 300 vzorků, z nichž 150 kusů bylo řezáno podélně a 150 kusů příčně. Za pomoci softwaru obsaženého v řezacím zařízení si program sám spočítal optimální dráhu řezu, která byla překontrolována obsluhou zařízení.

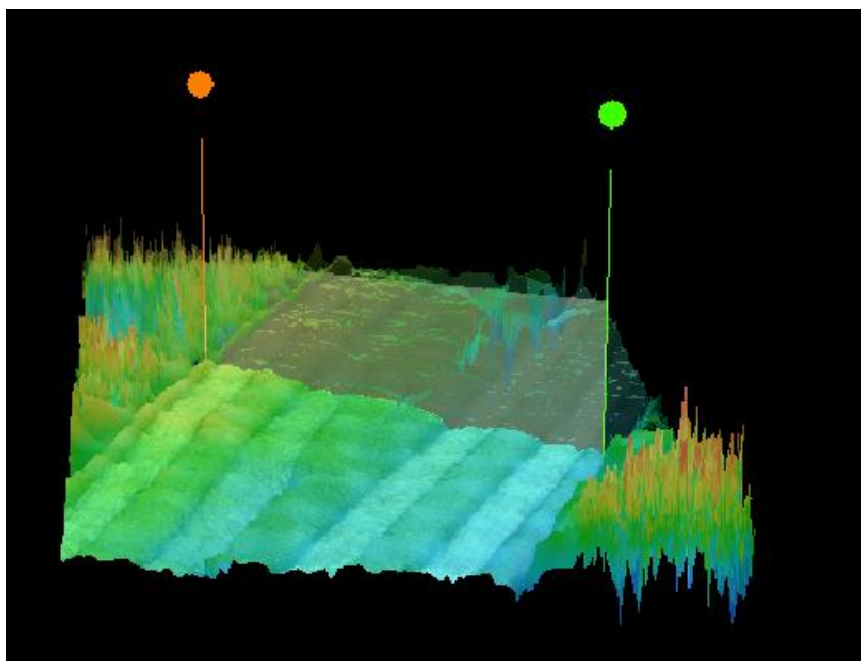
## 12 VÝSLEDKY

Při přípravě zkušebních vzorků bylo zjištěno, že překližovaná deska, která byla použita pro výrobu, obsahovala vady. Bohužel díky těmto vadám došlo k jistému zkreslení výsledků v podobě výkyvů v grafickém zobrazení za využití 2D grafů.

Jedna z vad je znázorněna na níže uvedeném Obr. 9.



*Obr. 9. Vada voděodolné překližované desky*

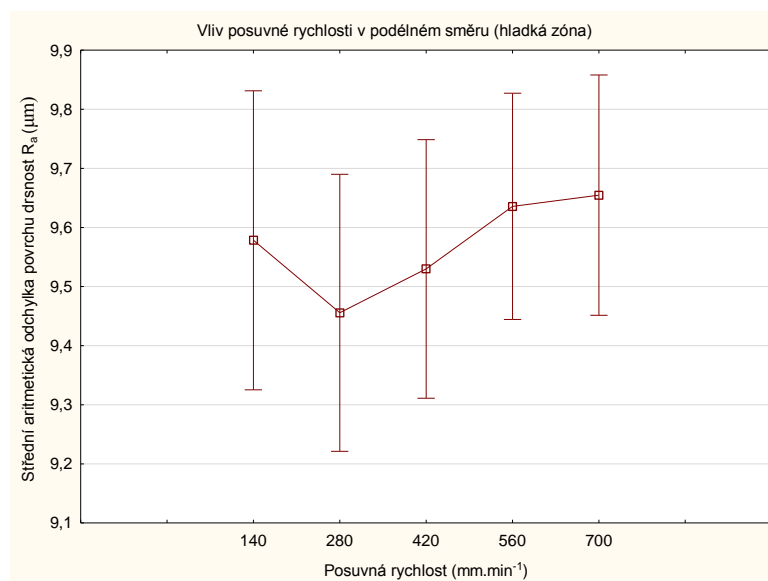


*Obr. 10. Vada voděodolné překližované desky znázorňující povrch*

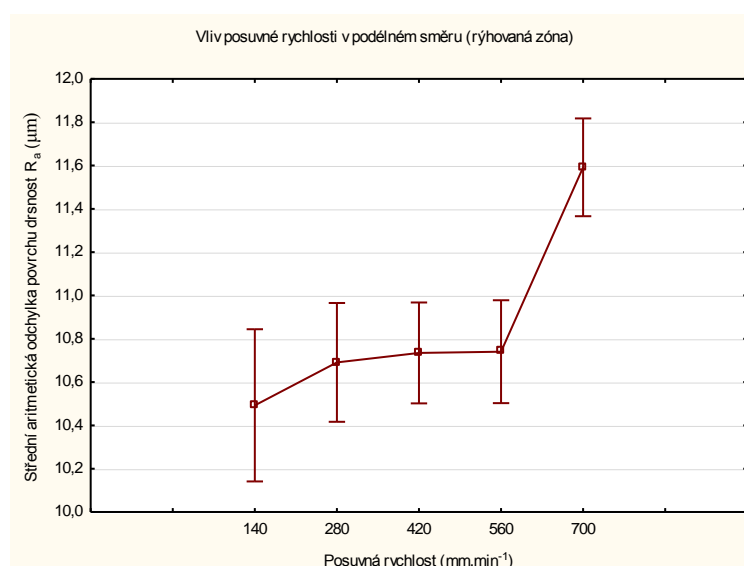
Po provedení měření drsnosti povrchu jsme došli k následujícím výsledkům. Bylo prokázáno, že změna posuvné rychlosti kapalinového abrazivního paprsku ovlivňuje kvalitu obrobenej plochy. Na níže uvedeném Obr. 11. je tento trend graficky znázorněn



jako průběh vzrůstající křivky, která znázorňuje zvyšující se drsnost obrobku v závislosti na zvyšující se posuvné rychlosti. V průběhu měření bylo zjištěno, že jednotlivé dýhy, ze kterých je voděodolná překližovaná deska tvořena, jsou překládány přes sebe a zalisovány. Tím jsou zkresleny výsledky vzhledem k zvolené metodice konstantního drsnoměru. Při posuvné rychlosti  $140 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  v hladké zóně v podélném směru se tyto vady projeví zvýšenou drsností povrchu.



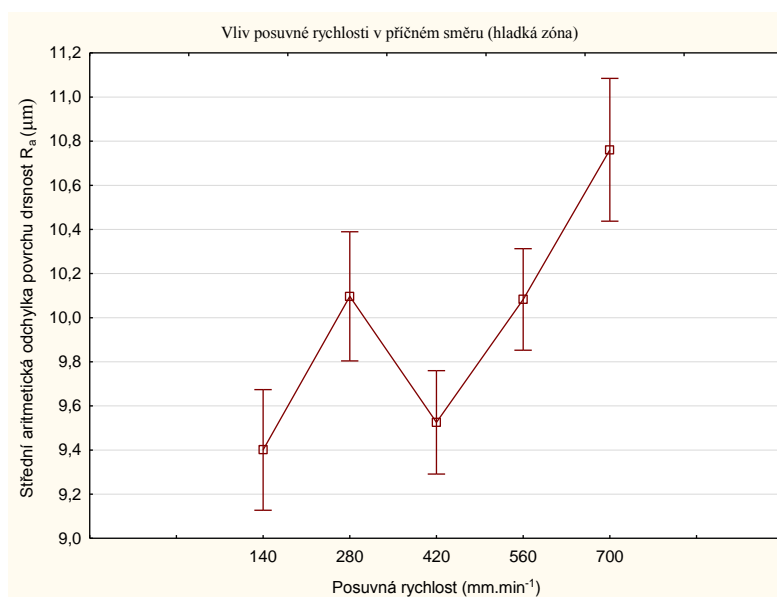
*Obr. 11. Vliv posuvné rychlosti v podélném směru na střední aritmetickou odchylku povrchu drsnosti v hladké zóně*



*Obr. 12. Vliv posuvné rychlosti v podélném směru na střední aritmetickou odchylku povrchu drsnosti v rýhované zóně*

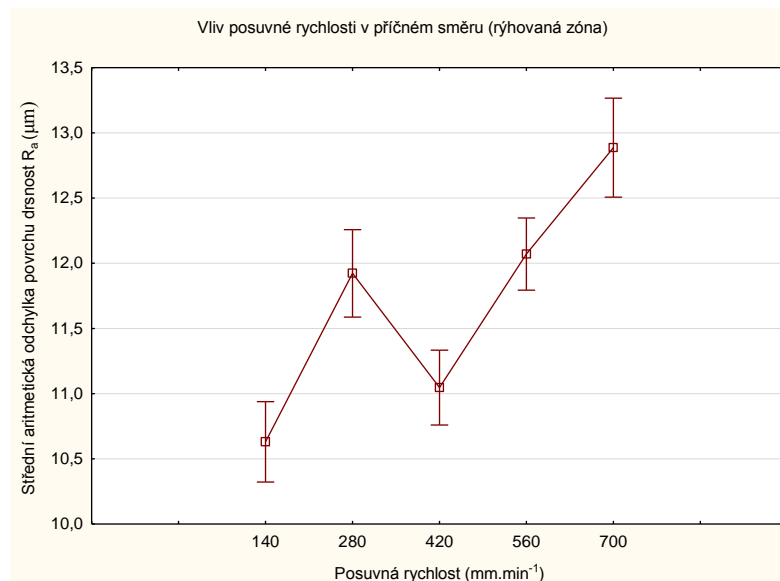
Na výše uvedeném Obr. 12. je graficky znázorněno, že v podélném směru v oblasti rýhované zóny je rostoucí trend drsnosti povrchu v závislosti na zvyšující se posuvné rychlosti. Tento závěr je zcela předvídatelný vzhledem k vypovídajícím výsledkům z hladké zóny v podélném směru graficky vyobrazené na Obr. 11.

Můžeme konstatovat, že ve spodní části obrobku, tedy rýhované zóně je drsnost vyšší. Což je ve shodě s literaturou, která uvádí, že paprsek ztrácí svou kinetickou energii a tím se drsnost zvyšuje.



*Obr. 13. Vliv posuvné rychlosti v příčném směru na střední aritmetickou odchylku povrchu drsnosti v hladké zóně*

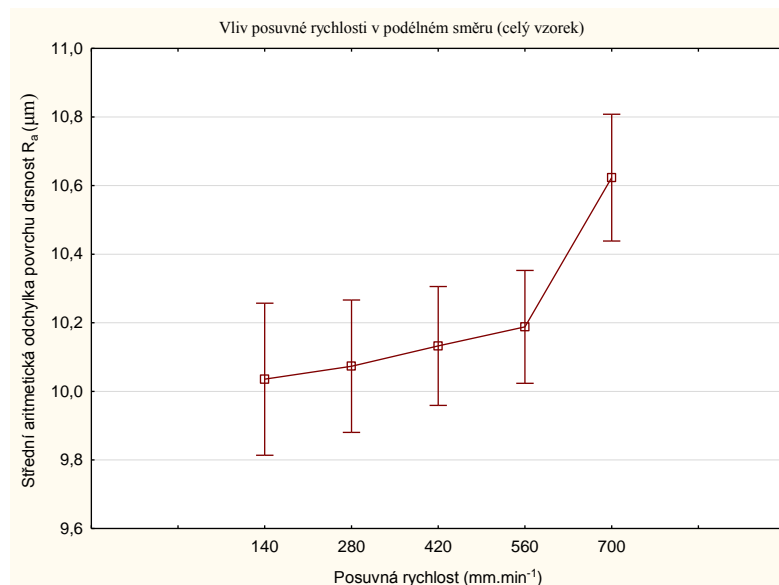
Na výše uvedeném Obr. 13. je graficky znázorněno, že v příčném směru v oblasti hladké zóny je rostoucí trend drsnosti povrchu v závislosti na zvyšující se posuvné rychlosti. Tento závěr je zcela předvídatelný vzhledem k vypovídajícím výsledkům z hladké zóny v podélném směru graficky vyobrazené na Obr. 11. Odchylka, ke které došlo při rychlosti  $280 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  byla způsobena vadami desky.



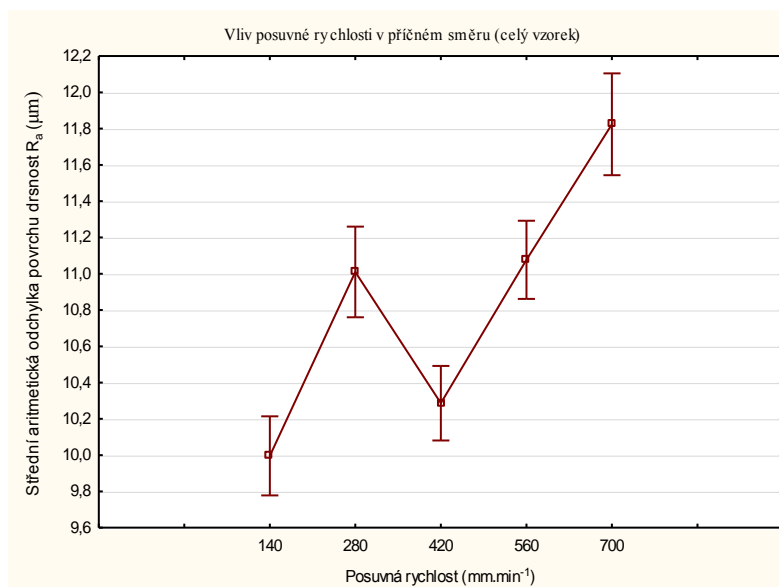
*Obr. 14. Vliv posuvné rychlosti v příčném směru na střední aritmetickou odchylku povrchu drsnosti v rýhované zóně*

Na výše uvedeném Obr. 14. je graficky znázorněno, že v příčném směru v oblasti rýhované zóny je rostoucí trend drsnosti povrchu v závislosti na zvyšující se posuvné rychlosti. Odchylka, ke které došlo při rychlosti  $280 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  byla způsobena vadami desky, taktéž jako na Obr. 13. v hladké zóně.

Na níže uvedeném Obr. 15. je znázorněna drsnost povrchu v závislosti na posuvné rychlosti zkoumaných vzorků v podélném směru při úvaze zapojení jak hladké tak rýhované zóny do jednoho souboru výsledků. Můžeme tedy uvažovat drsnost obrobene plochy jako jednoho celku.



Obr. 15. Vliv posuvné rychlosti v podélném směru na střední aritmetickou odchylku povrchu drsnosti celého vzorku



Obr. 16. Vliv posuvné rychlosti v příčném směru na střední aritmetickou odchylku povrchu drsnosti celého vzorku

Na výše uvedeném Obr. 16. je znázorněna drsnost povrchu v závislosti na posuvné rychlosti zkoumaných vzorků při úvaze zapojení jak hladké tak rýhované zóny do jednoho souboru výsledků. Můžeme tedy uvažovat drsnost obrobené plochy jako jednoho celku. V podélném směru došlo k odchylce při rychlosti  $280 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Ta byla způsobena vadou desky, která se významně projevila do výsledků i do grafického znázornění.

Tab. 5 Průměrné hodnoty střední aritmetické odchyly povrchu drsnosti

průměrné hodnoty střední aritmetická odchyly povrchu drsnosti v podélném směru		
posuvná rychlost (mm · min <sup>-1</sup> )	hladká zóna	rýhovaná zóna
	R <sub>a</sub> (μm)	R <sub>a</sub> (μm)
140	9,57	10,49
280	9,45	10,69
420	9,53	10,73
560	9,64	10,74
700	9,65	11,59
průměrné hodnoty střední aritmetická odchyly povrchu drsnosti v příčném směru		
posuvná rychlost (mm · min <sup>-1</sup> )	hladká zóna	rýhovaná zóna
	R <sub>a</sub> (μm)	R <sub>a</sub> (μm)
140	9,40	10,63
280	10,09	11,92
420	9,53	11,04
560	10,08	12,07
700	10,76	12,88

Tab. 6 Hodnoty binárního poškození obrazu

plocha binárního obrazu poškození podélný směr		
vzorek	obrazu poškození	%
(označení)	(mm <sup>2</sup> )	kontroly
140	1,29	100
280	1,45	112
420	1,33	102
560	1,37	106
700	1,33	103
plocha binárního obrazu poškození příčný směr		
vzorek	obrazu poškození	%
(označení)	(mm <sup>2</sup> )	kontroly
140	1,51	100
280	1,18	74
420	1,36	90
560	1,38	91
700	1,26	83

Tab. 7 Faktorová analýza dat

ANOVA			
zdroj variability	F	Hodnota P	F krit
podélný směr hladká zóna	0,99	0,42	2,39
podélný směr rýhovaná zóna	2,95	0,02	2,38
příčný směr hladká zóna	0,72	0,59	2,39
příčný směr rýhovaná zóna	5,16	0,00043	2,39

Na výše uvedené Tab. 7 můžeme vidět, že v případě podélného a příčného směru v rýhované zóně odmítáme nulovou hypotézu.

## 13 DISKUSE

Kontrola jakosti je charakterizována činností jako měření, zkoumání, zkoušení, porovnávání pevným kalibrem jednoho nebo několika znaků výrobku nebo služby a jejich porovnávání se specifikovanými požadavky s cílem určit shodu. Jedná se o soubor experimentálních pracovních úkonů. Hlavním cílem objektivního, kvalitativního a kvantitativního zjištění hodnoty dané veličiny porovnáním se známou hodnotou téže veličiny (Pernikář, Tykal, Vačkář, 2001).

Z dřívějšího využití nepřímé metody hodnocení, která se následně ukázala jako velice objektivní a názorná při zpracování bakalářské práce, bylo této metody využito i nyní. Poznatky, které byly zjištěny, dokazují, že by tato metoda měla být využívána hojněji než je tomu nyní. Metodu lze efektivně aplikovat v jakémkoliv provozu, vzhledem k nenáročnosti a jednoduchosti. Při využití šablon po prvním měření, lze k výsledkům docházet za několik minut od pořízení fotografie povrchu. Jednotlivé firmy by samy mohly deklarovat kvalitu i při jednotlivých zakázkách. Tím by se zároveň zvýšila i informovanost zákazníků a zároveň právní ochrana firem, jako dokládání jednotlivých kvalit. Z poznatků jsme zjistili, že i přes zvyšující se drsnost obráběné plochy se otřep folie na spodní straně desky procentuálně snížil při příčném směru řezání. To je velice zajímavý poznatek, který by stál za bližší prozkoumání.

Z literatury Krále a Hrázského (2005) víme, že název orientace desky podélné nebo příčné se odvozuje od posledních vrstev dých. Orientace vrchních dých (krajních) jsou vždy orientované stejným směrem díky pravidlu symetrie. Barčík a kol. (2012) uvádí, že rozdíl drsnosti povrchu při volbě řezu v podélném a příčném směru u překližovaných desek je přibližně 1  $\mu\text{m}$ , přičemž hrubší povrch je v příčném směru řezu při využití abrazivního vodního paprsku. Při experimentálním řezání a měření bylo dosahováno obdobných závěrů.

Obsahem této diplomové práce bylo prokázat odlišnou kvalitu obrobené plochy při rozdílné posuvné rychlosti, což se nám podařilo. U testovaných vzorků obrobených pomocí technologie vodním abrazivním paprskem bylo prokázáno, že se zvětšující se posuvnou rychlostí roste i drsnost povrchu. Při porovnávání vlastních výsledků s bakalářskou prací bylo prokázáno, že při všech rychlostech byla střední aritmetická odchylka drsnosti nižší než při využití čistého vodního paprsku. Při stále zvyšujícím se požadavkům firem na stále rychlejší a kvalitnější obrábění je využití této technologie přijatelnější.

Dalším pohledem firem je ekonomická stránka obrábění. Současná doba je velice ovlivněna ekonomikou. Každý chce snížit výrobní náklady na co možná nejnižší úroveň, aby co nejlépe mohl konkurovat na trhu, kde je v nynější době přemíra všeho. Díky tomu se došlo k závěru, že obrábění vodním abrazivním paprskem je velice ekologické, ale za to velmi finančně náročné. Problematika optimalizace parametrů obrábění materiálů na bázi dřeva pomocí vodního abrazivního paprsku je v současné době jen velmi málo prozkoumanou oblastí. Zvýšení informovanosti zaměstnanců firem přispěl doc. Ing. Štefan Barčík, CSc., který v této problematice již publikoval.

Při porovnání využití běžných dřevoobráběcích strojů pro obrábění s běžnými nástroji v podobě řezných kotoučů a dalších je stále technologie vodního abrazivního paprsku dražší.

Firma Flow International Corporation přišla v posledních letech se zajímavými závěry pro obrábění vodním abrazivním paprskem a ekonomikou provozu. Při obrábění abrazivním vodním paprskem představuje abrazivo 65–75% provozních nákladů stroje. Vzhledem k použití abraziva je potřeba menšího tlaku na obrábění a tím se snižuje i energetická náročnost výroby. Při řešení problematiky kvality obrábění firma tvrdí, že se zvyšujícím se tlakem má každá částice mnohem větší dynamiku a řezný výkon, tím je možné zvýšit posuvnou rychlost. Je tedy vyrobeno více kusů za menší časový interval. Bylo prokázáno, že efektivnost obrábění vodním abrazivním paprskem je několikrát vyšší než při výběru technologie čistého vodního paprsku. Což lze potvrdit v porovnání z výsledků bakalářské a diplomové práce.

V současné době se zastoupení vodního abrazivního paprsku v dřevozpracujících firmách nebude nikterak měnit. Domnívám se však, že ve společnostech, které se zabývají například výrobou návěsů pro nákladní automobily, se tato technologie bude dostávat do popředí, vzhledem k její mnohoúčelnosti.

Mohli bychom tuto technologii nazvat jako víceúčelovou a budoucí využití nás teprve čeká se stále nově vyvíjenými materiály.



## 14 ZÁVĚR

Při využití technologie vodního abrazivního paprsku hodnocení kvality obrobené plochy pro dřevěné materiály není zatím nijak definováno ani s definicí kvality povrchu. Nebyly vydány prozatím žádné normy, které by se touto problematikou zabývaly.

Bylo prokázáno, že se stoupající posuvnou rychlostí roste i drsnost povrchu obrobené plochy vodním abrazivním paprskem jak v podélném tak příčném směru řezání foliované vodovzdorné překližované desky. Kvalita obrábění je na prvním místě požadavků zákazníka. Díky využití abraziva při obrábění je dosahováno lepší obrobené plochy v porovnání s čistým vodním paprskem. Podniky v dřevozpracujícím průmyslu nepatří mezi nejziskovější. Jedinou možnou variantou jak zabezpečit kvalitní obrábění a ekonomiku podniku je využití abrazivního vodního paprsku, avšak pořizovací náklady této technologie jsou velmi vysoké.

## 15 SUMMARY

When using abrasive water jet technology assessment surface finish for wood products has not yet been defined and not without the definition of surface quality. So far not issued any standards that would address this issue.

It was found that increasing the feed rate also increases the surface roughness of the machined surface of the water jet abrasive in both longitudinal and transverse direction of the cutting foil waterproof plywood. Machining quality is paramount to customer requirements. Through the use of abrasive machining is achieved at a better surface finish compared with pure waterjet. Enterprises in wood processing industry is not among the most profitable. The only possible option to ensure quality machining and economics is the use of abrasive water jet, but the cost of this technology are very high.

## 16 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Symbol	Jednotka	Název
HV	$N \cdot mm^{-2}$	tvrdost obrobku podle Vickerse
W	kW	příkon
Q	$dm^3 \cdot min^{-1}$	průtok
p	Pa	tlak
-	$Kč \cdot kg^{-1}$	ekonomický ukazatel
-	$kg \cdot mth^{-1}$	ekonomický ukazatel
F	N	síla
-	Mth	motohodina
-	pH	ukazatel kyselosti a zásaditosti
F	N	gravitační síla
MESH	-	velikost zrn sypkých hmot
V	$m^3$	objem
$P_1$	MPa	tlak na píst s menší plochou
$P_2$	MPa	tlak na píst s větší plochou
$S_1$	$m^2$	plocha menšího pístu
$S_2$	$m^2$	plocha většího pístu
i	-	multiplikační konstanta
-	$\eta m$	mechanická účinnost multiplikátoru
A, B, C	-	konstanty závislé na parametrech abrazivního vodního paprsku a na jeho rychlosti posuvu
E	Pa	modul pružnosti,
MSNC	-	řídící system
AsperWin	-	řídící system
Ra	$\mu m$	drsnost povrchu
U	V	napětí

## 17 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

AWAC, spol. s r.o. 2016. Firemní materiály a podklady.

Barčík, Š., 2007. *Progresívna metóda obrábania dreva vodným lúčom*. In Siklienka a kol. *Drevorezné nástroje a obrábanie dreva*. Zvolen, Technická univerzita vo Zvolene, ISBN 80-228-1822-3, s. 3–11.

Barčík, Š., Kvientková, M., Kminiak, R., Zeidler, A., 2012. *Řezání dřeva a dřevěných kompozitních materiálů abrazivním vodním paprskem*. Praha, Powerprint, 240 s. ISBN 80-87415-60-3.

Bátora, B., Vasilko, K., 2000. *Obrobené povrchy – technologická dědičnost, funkčnost*. Trenčín, Trenčínská univerzita, 184 s. ISBN 80-88914-19-1.

Benešová, M., Satrapová, H., 2011. *Odmaturuj z chemie*. Brno, Didaktis, 208 s. ISBN 80-86285-56-1.

Bumbálek, B., Odvody, V., Ošťádal, B., 1989. *Drsnost povrchu. 1. vyd.* Praha, Státní nakladatelství technické literatury, 338 s.

Brym, R., 2008. *Trendy vývoje obrábění vodním paprskem*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 73 s.

ČSN EN ISO 4287: *Geometrické požadavky na výrobky (GPS)-Struktura povrchu: Profilová metoda-Termíny, definice a parametry struktury povrchu*, 1998.

Hashish, M., 1991. *Optimalization Factors in Abrasive Waterjet In Journal of Engineering of Industry. Machining*. ASME Transaction, , 113 s. 29–37.

Janák, K., Král, P., 2003. *Technologie 1. : pro studijní obor Nábytkářství*. Praha, Informatorium, 204 s. ISBN 80-7333-003-2.

Krajný, Z., 1998. *Vodný lúč v praxi*. Bratislava, EPOS, 250 s. ISBN 80-8057-091-4.

Krajný, Z., 2001. *Vodný lúč v praxi - WJM*. Bratislava, EPOS, 384 s. ISBN 80-8057-091-4.

Král, P., Hrázský, J., 2005. *Kompozitní materiály na bázi dřeva část 2: Dýhy a vrstvené masivní materiály. 1. vyd.* Brno, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 206 s. ISBN 80-71157-878-9.

Kulekci, M. K., 2002. *Processes and apparatus developments in industrial waterjet applicative Effect*. International Journal Of Machine Tools and Manufacture. ISSN 0890-6955.

- Kocman, K., 2004. *Speciální technologie obrábění*. Olomoučany, CERM, 227 s. ISBN 80-214-2564-8.
- Lipa, Z. *Nekonvenční způsoby obrábění*. In Janáč a kol. (eds.) 2001. *Technologie obrábění*. Bratislava, STU, 288 s. 230–238.
- Lisec, J., 2015. *Obrábění vodním paprskem. Bakalářská práce*. Brno: Mendelova univerzita v Brně, Lesnická a dřevařská fakulta. 48 s.
- Lisičan, J., 1996. *Teória a technika spracovania dreva*. Zvolen, MAT-CENTRUM, 626 s. ISBN 80-967315-6-4.
- Mazal, P., 2015. *Metodika měření poškození hrany vodovzdorné dřevotřísky*
- Maňková, I., 2000. *Progresívne technologie*. Košice, Vienala, 275s. ISBN 80-7099-430-4.
- Morávek, R., 1999. *Nekonvenční metody obrábění*. Plzeň, Západočeská univerzita, 102 s. ISBN 55-088-99.
- Neckářová, J. *Potrubi a armatury*. In Bolek, A., Kochman, J., (eds.) 1990. *Části strojů*. 5., Praha, Státní nakladatelství technické literatury, 707 s. 618–683.
- Pernikář, J., Tykal, M., Vačkář, J., 2001. *Jakost a Metrologie*. Brno, Akademické vydavatelství CERM, 151 s. ISBN 80-214-1997-0.
- PTV, spol. s r.o. 2015. *Firemní materiály a podklady*
- Řasa, J., Pokorný, P., Gabriel, V., 2005. *Strojírenská technologie 3-2. díl*. Praha, Scientia, spol. s r. o., 221 s. ISBN 80-7183-336-3.
- Slaný, M. *Nekonvenční technologie obrábění*. In Piška a kol. (eds.) 2009. *Speciální technologie obrábění*. Brno, Akademické nakladatelství CERM, s. r. o., ISBN 80-214-4025-8, s. 232–236.
- Šebelová, E., 2014. *Optimalizace parametrů obrábění materiálů na bázi dřeva*. Disertační práce. Brno: Mendelova univerzita v Brně, Lesnická a dřevařská fakulta, 128 s.
- Šimůnek, J. *Hydraulické akumulátory a multiplikátory*. In Pivoňka a kol. (eds.) 1969. *Průručka hydraulických pohonů*. Praha, SNTL, 475 s. 168–215.
- Valíček, J., Hloch, S., 2008. *Měření a řízení kvality povrchů vytvořených hydroabrazivním dělením*. Ostrava, ÁMOS, ISBN 80-254-3588-5, 127s.
- Zemiar, J. *Príprava povrchu*. In Zemiar a kol. (eds.) 2009. *Technológia výroby nábytku*. Zvolen, Technická univerzita vo Zvolene, ISBN 80-228-2064-6, s. 137–148.

Zýma, J. *Ucpávky a těsnění*. In Bolek, A., Kochman, J. (eds.) 199. Části strojů. 5., Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 707 s. 684–704.

## Internetové zdroje

AB JET spol. s r.o. [online] citováno 7. září 2016. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.abjet.cz/serv01.htm>>.

AWAC, spol. s r.o. [online] citováno 15. listopadu 2016 a. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.awac.cz/cz/3-Prodej-a-servis-br-CNC-delicich-stroju-br/7-Prodej-delicich-stroju/15-Ridici-systemy/0-51->>.

AWAC, spol. s r.o. [online] citováno 15. listopadu 2016 b. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.awac.cz/cz/3-Prodej-a-servis-br-CNC-delicich-stroju/7-Prodej-delicich-stroju/15-Ridici-systemy/0-52>>.

Baymetik [online] citováno 15. listopadu 2016. Dostupné na World Wide Web: <<http://bymetic.deal.by/p9904336-ustanovki-gidroabrazivnoj-rezki.html>>.

CHPS s. r. o. [online] citováno 21. listopadu 2016. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.chps.cz/vodni-paprsek/geometrie-rezu>>.

DYAS. EU, a. s. [online] citováno 16. prosince 2016. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.dyas.eu/produkty/dyas-film-birch>>.

KMT Waterjet Systems Inc. [online] citováno 9. listopadu 2016. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.kmtwaterjet.com/KMT%20Streamline%20SL-V%20Pumps%20Catalog.pdf>>.

MicroStep spol. s r.o. [online] citováno 9. listopadu 2016 a. Dostupné na World Wide Web: <[http://www.microstep.eu/products/machines/waterjet\\_machines/aquacut/](http://www.microstep.eu/products/machines/waterjet_machines/aquacut/)>.

MicroStep spol. s r.o. [online] citováno 9. listopadu 2016 b. Dostupné na World Wide Web: <[http://www.microstep.eu/products/software/asperwin/asperwin\\_basic/](http://www.microstep.eu/products/software/asperwin/asperwin_basic/)>

PTV, spol. s r.o. [online] citováno 7. září 2016 a. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.ptv.cz/nahradni-dily/nahradni-dily-flow/filtry/>>.

## 18 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Uživatelské prostředí AsperWin (MicroStep, 2016 b)	29
Obr. 2. Uživatelské prostředí MNSC (AWAC 2016 b)	30

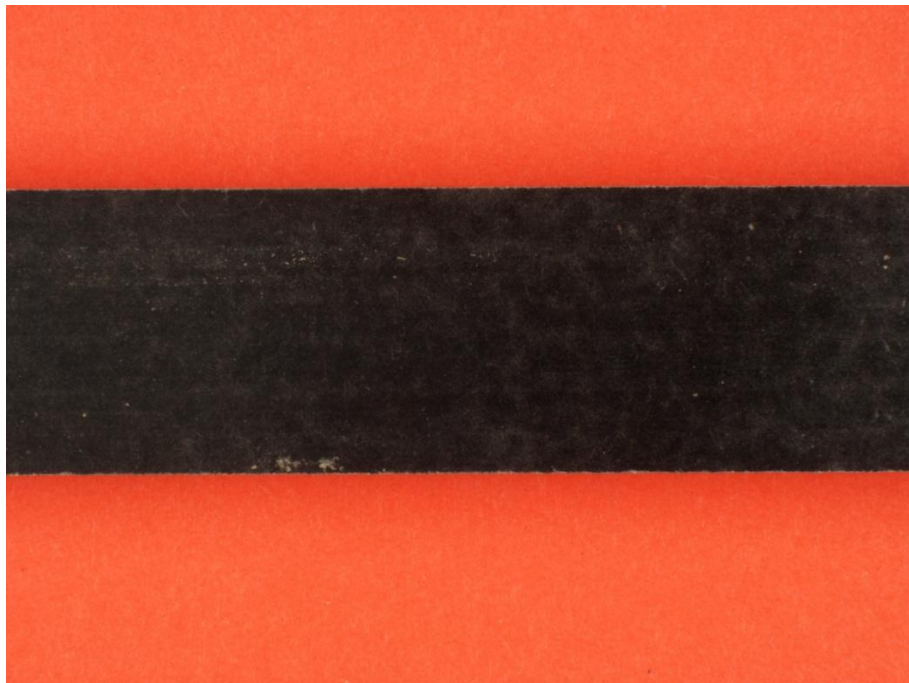
Obr. 3. Schematické rozdělení metod pro hodnocení topografie povrchu	35
Obr. 4. Profil povrchu (ČSN EN ISO 4287)	36
Obr. 5. Řezací systém MICROSTEP AQUACUT 1501 (Baymetik 2016)	41
Obr. 6. Vysokotlaké čerpadlo	
KMT STREAMLINE SL – V 50 PLUS (KTM 2016)	41
Obr. 7. Znázornění konkrétních míst měření drsnosti zařízením SJ 201P	44
Obr. 8. Zkušební vzorky	47
Obr. 9. Vada voděodolné překližované desky	48
Obr. 10. Vada voděodolné překližované desky znázorňující povrch	48
Obr. 11. Vliv posuvné rychlosti v podélném směru na střední aritmetickou odchylku povrchu drsnosti v hladké zóně	49
Obr. 12. Vliv posuvné rychlosti v podélném směru na střední aritmetickou odchylku povrchu drsnosti v rýhované zóně	49
Obr. 13. Vliv posuvné rychlosti v příčném směru na střední aritmetickou odchylku povrchu drsnosti v hladké zóně	50
Obr. 14. Vliv posuvné rychlosti v příčném směru na střední aritmetickou odchylku povrchu drsnosti v rýhované zóně	51
Obr. 15. Vliv posuvné rychlosti v podélném směru na střední aritmetickou odchylku povrchu drsnosti celého vzorku	52
Obr. 16. Vliv posuvné rychlosti v příčném směru na střední aritmetickou odchylku povrchu drsnosti celého vzorku	52

## **19 SEZNAM TABULEK**

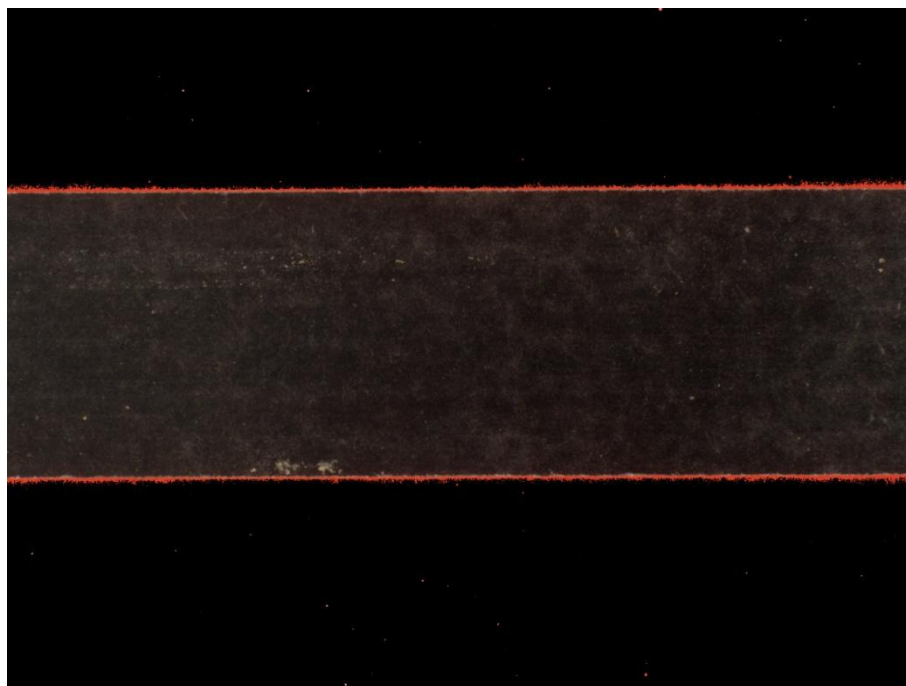
Tab. 1 Vlastnosti používaných abrazivních materiálů (Barcík a kol., 2012)	19
Tab. 2 Chemická struktura Granát Barton (Barcík a kol., 2012)	19
Tab. 3 Chemická struktura Olivín 24 (Barcík a kol., 2012)	20
Tab. 4 Přehled nákladů na provoz vysokotlakého čerpadla	
(PTV, 2015; AWAC, 2016)	32
Tab. 5 Průměrné hodnoty střední aritmetické odchylky povrchu drsnosti	53
Tab. 6 Hodnoty binárního poškození obrazu	53
Tab. 7 Faktorová analýza dat	54

## 20 PŘÍLOHY

Příloha I.: Skutečná podoba jednoho z mnoha měřených vzorků v podélném směru nepřímé metody posuvné rychlosti  $140 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$



Příloha II.: Znárodnění poškození binárního obrazu nepřímé metody vzorek  $140 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  v podélném směru



Příloha III.: Skutečná podoba jednoho z mnoha měřených vzorků v podélném směru nepřímé metody posuvné rychlosti  $280 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$



Příloha IV.: Znázornění poškození binárního obrazu nepřímé metody vzorek  $280 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  v podélném směru

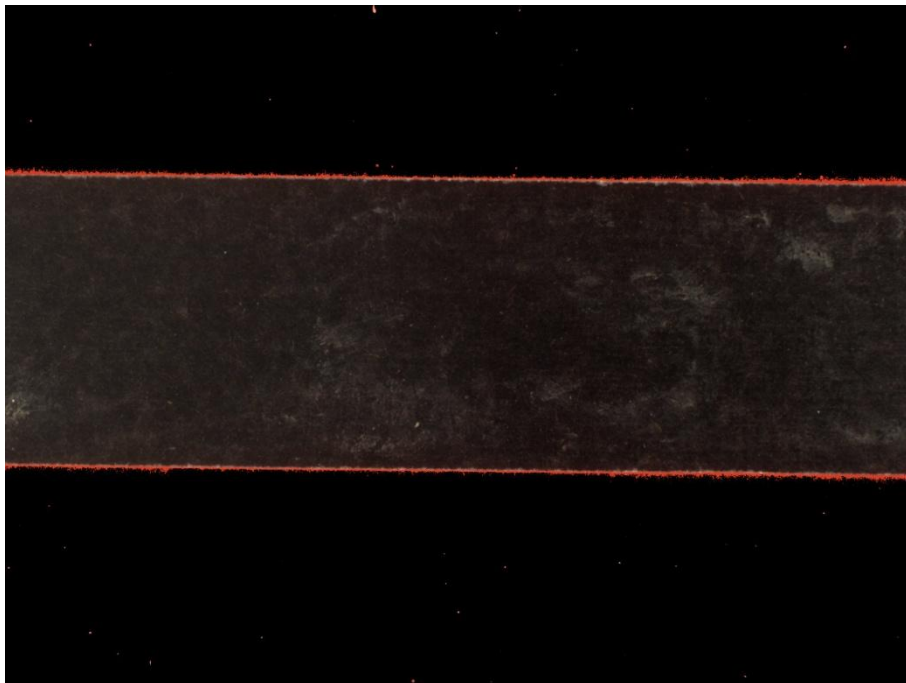




Příloha V.: Skutečná podoba jednoho z mnoha měřených vzorků v podélném směru nepřímé metody posuvné rychlosti  $420 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$



Příloha VI.: Znázornění poškození binárního obrazu nepřímé metody vzorek  $420 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  v podélném směru



Příloha VII.: Skutečná podoba jednoho z mnoha měřených vzorků v podélném směru nepřímé metody posuvné rychlosti  $560 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$



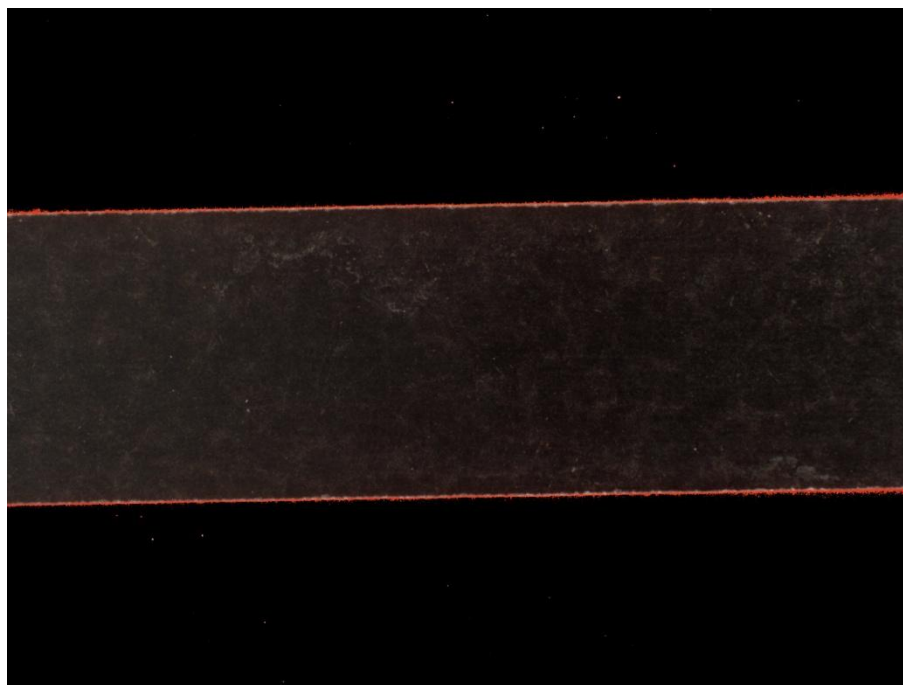
Příloha VIII.: Znázornění poškození binárního obrazu nepřímé metody vzorek  $560 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  v podélném směru



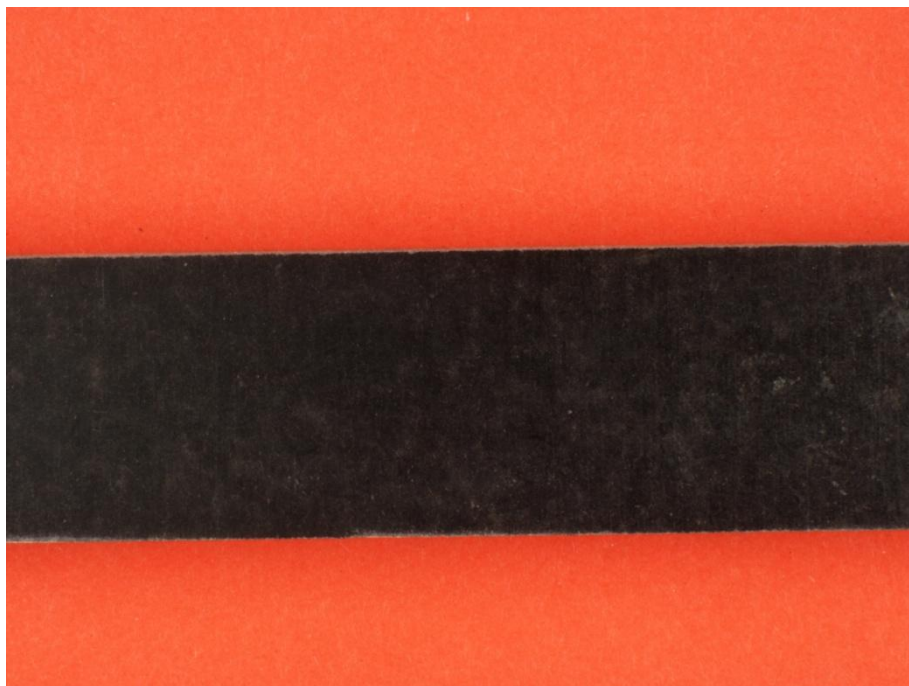
Příloha IX.: Skutečná podoba jednoho z mnoha měřených vzorků v podélném směru nepřímé metody posuvné rychlosti  $700 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$



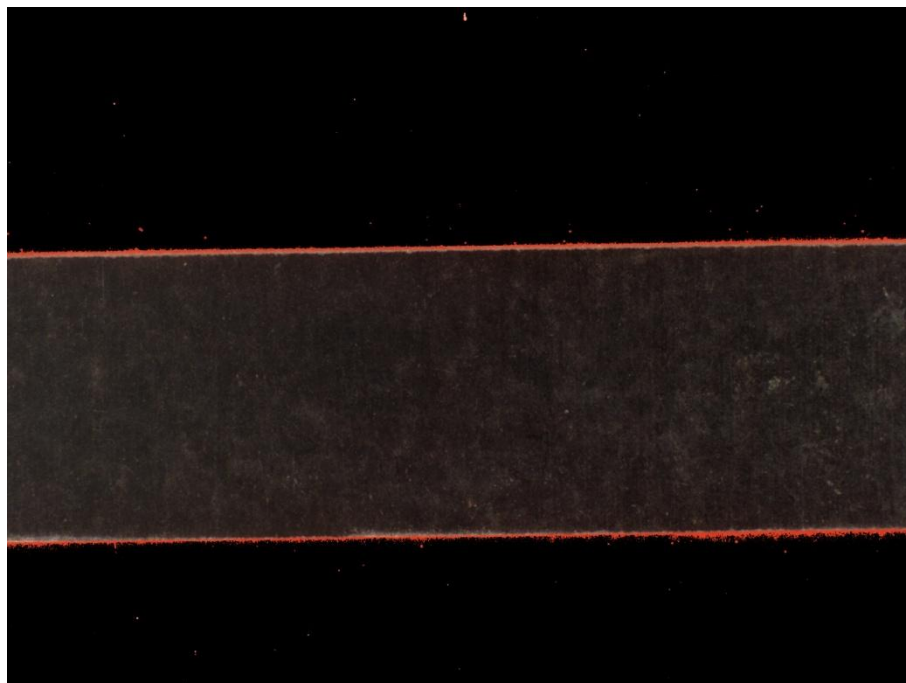
Příloha X.: Znázornění poškození binárního obrazu nepřímé metody vzorek  $700 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  v podélném směru



Příloha XI.: Skutečná podoba jednoho z mnoha měřených vzorků v příčném směru nepřímé metody posuvné rychlosti  $140 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$



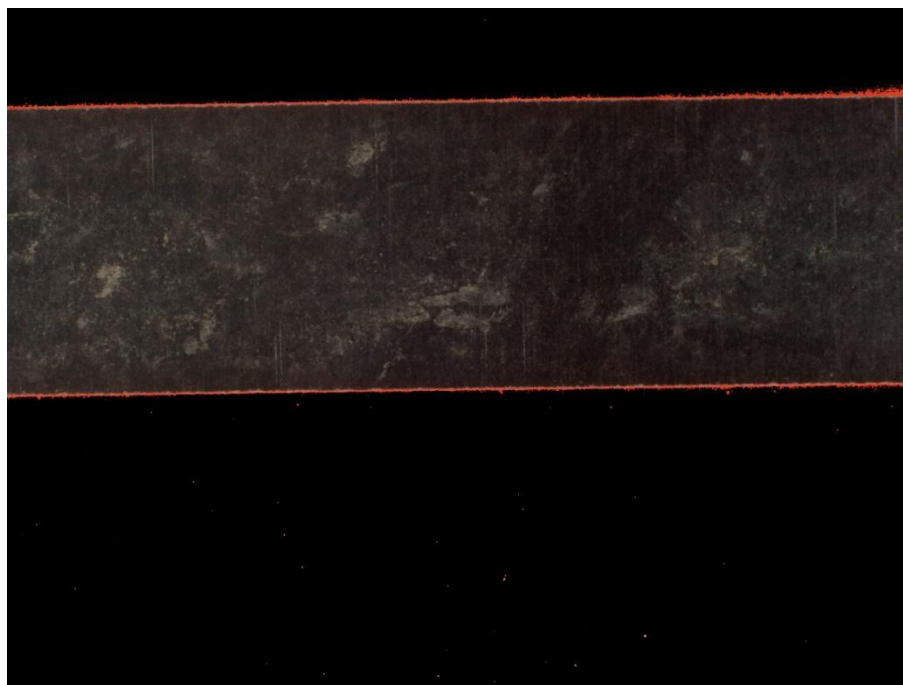
Příloha XII.: Znázornění poškození binárního obrazu nepřímé metody vzorek  $140 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  v příčném směru



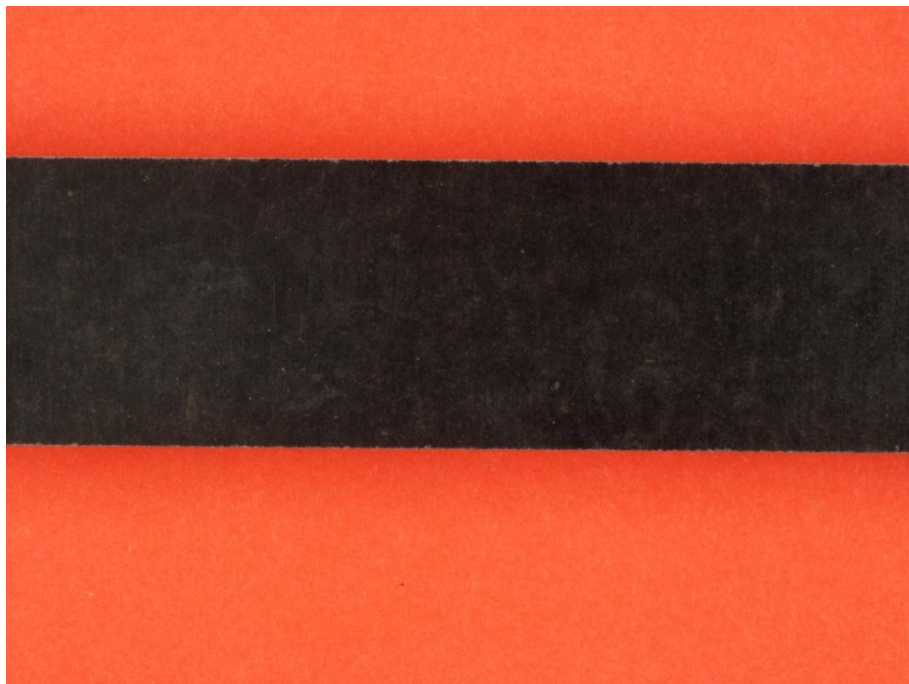
Příloha XIII.: Skutečná podoba jednoho z mnoha měřených vzorků v příčném směru nepřímé metody posuvné rychlosti  $280 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$



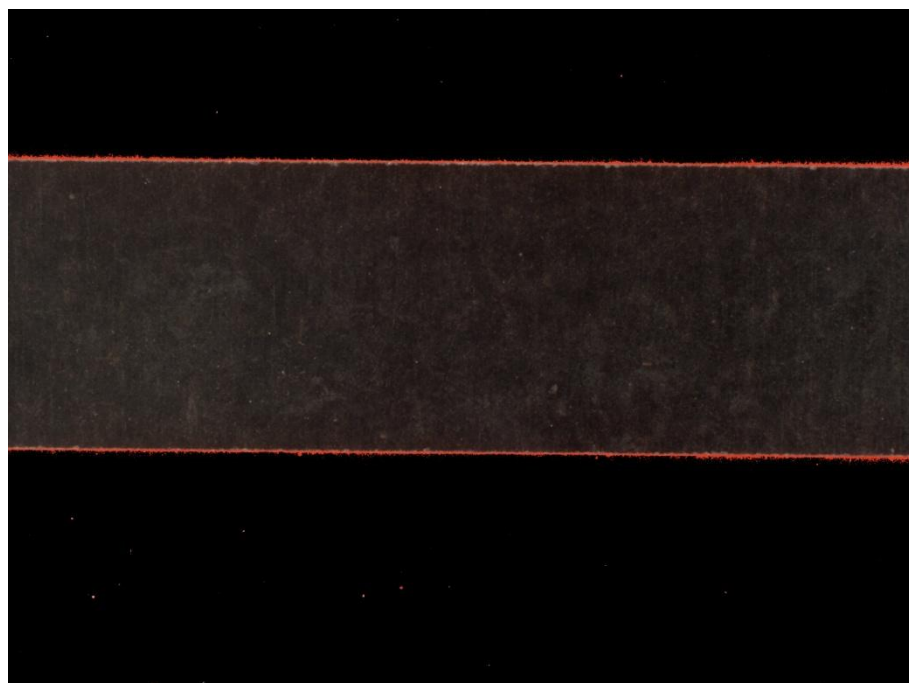
Příloha XIV.: Znázornění poškození binárního obrazu nepřímé metody vzorek  $280 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  v příčném směru



Příloha XV.: Skutečná podoba jednoho z mnoha měřených vzorků v příčném směru nepřímé metody posuvné rychlosti  $420 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$



Příloha XVI.: Znázornění poškození binárního obrazu nepřímé metody vzorek  $420 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  v příčném směru



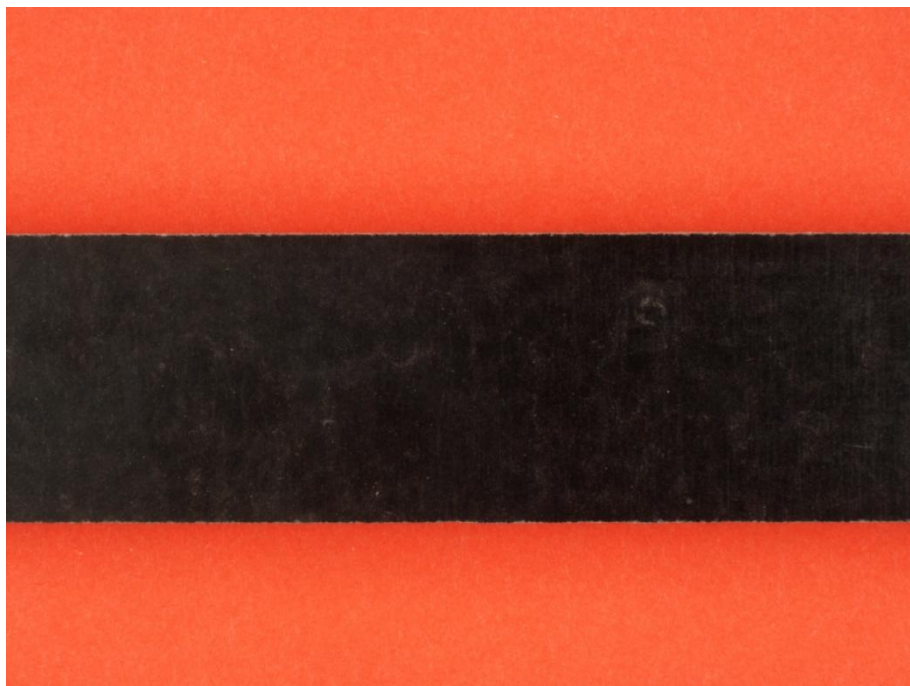
Příloha XVII.: Skutečná podoba jednoho z mnoha měřených vzorků v příčném směru nepřímé metody posuvné rychlosti  $560 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$



Příloha XVIII.: Znázornění poškození binárního obrazu nepřímé metody vzorek  $560 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  v příčném směru



Příloha XIX.: Skutečná podoba jednoho z mnoha měřených vzorků v příčném směru nepřímé metody posuvné rychlosti  $700 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$



Příloha XX.: Znázornění poškození binárního obrazu nepřímé metody vzorek  $560 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  v příčném směru

