

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



Obrábění vodním paprskem

Bakalářská práce

2015

Jakub Lisec

Zadání bakalářské práce:

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem práci: Obrábění vodním paprskem zpracoval 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 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 bakalářské 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 paprsku spojené s nejčastějšími problémy, úskalími výroby a cenné zkušenosti z praxe při řezání vodním paprskem. V neposlední řadě bych rád poděkoval RNDr. Pavlu Mazalovi, Ph.D. za možnost laboratorního měření a vyhodnocení nepřímé metody poškození. Velké díky patří i mé rodině za podporu během celého studia.

Jakub Lisec

Obrábění vodním paprskem

Water beam machining

ABSTRAKT

Práce je zaměřena na využití nekonvenční technologie vodního paprsku pro řezání foliovaného vodovzdorného překližovaného materiálu. Práce je rozdělena do několika částí: na stručný vývoj technologie, podstatu procesu obrábění, analýzu zařízení, kvalitu řezného procesu, ovlivnění kvality řezu a experimentální část. Ve výsledcích práce pojednává, jaké ovlivnění kvality řezného povrchu nastává při rozdílných vstupních parametrech obrábění foliované vodovzdorné překližované desky čistým vodním paprskem. V závěru práce se snažím poukázat na problematiku hodnocení kvality obrábění a zdůvodnění, proč metoda řezání čistým vodním paprskem nebude mít v dřevozpracujícím průmyslu takové zastoupení.

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

ABSTRACT

The work is focused on the use of unconventional technology of water jet cutting foil waterproof plywood material. The work is divided into several parts: a brief development of technology, the nature of the machining process, analysis equipment, the quality of the cutting process, affecting the quality of the cut and the experimental part. In the results, the work aims to evaluate what effects on the quality of the cut surface occurs when different input parameters machining foil waterproof plywood pure waterjet. In conclusion, I try to highlight the issue of evaluating the quality of machining and justification why the method of cutting a pure waterjet not will have in the woodworking industry, such representation.

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

Obsah

1	Úvod	11
2	Cíl práce	12
3	Analýza technologie	12
3.1	Historie	12
3.2	Dělení materiálu	13
3.2.1	Obrábění čistým vodním paprskem	13
3.2.2	Abrazivní vodní paprsek v procesu obrábění	14
3.3	Způsoby vytváření abrazivního vodního paprsku	15
3.3.1	Nepřímé vstřikování abraziva	15
3.3.2	Přímé vstřikování abraziva (DIAJET-Direct Injection Abrasive Jet)	15
4	Druhy vodních paprsků	16
5	Vlastnosti pracovního media	16
5.1	Chemické a fyzikální vlastnosti vody	18
5.2	Specifikace vody	19
5.3	Způsoby úpravy vody	19
5.3.1	Mechanická úprava vody	19
5.3.2	Změkčování	20
5.3.3	Deionizace	20
5.3.4	Zpětná osmóza	20
5.3.5	Fyzikální úprava	20
5.3.6	Biologická úprava vody	21
6	Analýza konstrukčního zařízení pro řezání vodním paprskem	21
6.1	Zařízení s multiplikátorem	22
6.2	Zařízení s triplexový plunžrem	23
6.3	Použití metody a dosahované parametry	23
7	Kvalita řezného procesu	24

7.1	Vlastnosti opracovaného povrchu	24
7.2	Hodnocení topografie povrchu	27
7.3	Chyby vznikající během řezání.....	27
7.3.1	Kvalita řezné plochy.....	27
7.3.2	Povrchové vady při řezání	28
8	Posouzení vlivů obráběcích parametrů	28
9	Dílčí závěr	30
10	Materiál a Metodika.....	30
10.1	Řezací zařízení	30
10.2	Materiál	31
10.2.1	Překližovaná deska.....	31
10.2.2	Vodovzdorná překližka	31
10.2.3	Foliované vodovzdorné překližované desky	32
10.3	Metodika stanovení nerovnosti obrobeného povrchu.....	32
10.4	Grafické zpracování výsledků nerovnosti obrobeného povrchu	34
10.5	Metodika měření poškození hrany voděodolné překližky	34
10.6	Příprava zkušebních vzorků	35
10.6.1	Tlak řezací kapaliny	35
10.6.2	Směr opracování vzorků.....	36
10.6.3	Posuvná rychlost řezání.....	36
10.6.4	Vzorky	36
10.6.5	Proces řezání	36
11	Výsledky	37
12	Diskuse.....	40
13	Závěr	42
14	Summary	42
15	Seznam použité literatury	43

Přílohy	46
---------------	----

Seznam obrázků

- Obr. 1. Řezací hlava pro vodní paprsek
- Obr. 2. Trysky obrábění abrazivním paprskem
- Obr. 3. Schematické znázornění druhů kapalinových paprsků
- Obr. 4. Základní schéma zesilovačů tlaků
- Obr. 5. Trajektorie paprsku
- Obr. 6. Kvalitativní skupiny řezů vodním paprskem
- Obr. 7. Geometrie řezné spáry
- Obr. 8. Tvary dostupných trysek
- Obr. 9. Řezací systém MACH 4
- Obr. 10. Vysokotlaké čerpadlo HYPERJET 94i
- Obr. 11. Znázornění konkrétních míst měření drsnost zařízením SJ 201P
- Obr. 12. Zkušební vzorky
- Obr. 13. Vliv posuvné rychlosti v podélném směru na střední aritmetickou odchylku povrchu drsnosti v hladké zóně
- Obr. 14. Vliv posuvné rychlosti v podélném směru na střední aritmetickou odchylku povrchu drsnosti v rýhované zóně
- Obr. 15. Nepřímá metoda detekce poškození v podélném směru vzorek 140
- Obr. 16. Nepřímá metoda detekce poškození v podélném směru vzorek 420
- Obr. 17. Nepřímá metoda detekce poškození v podélném směru vzorek 700

Seznam tabulek

- Tab. 1 Orientační popis užívaných stupňů kvality řezu se základní charakteristikou
- Tab. 2 Průměrné hodnoty střední aritmetické odchylky povrchu drsnosti
- Tab. 3 Hodnoty binárního poškození obrazu

Seznam příloh

- Příloha I.: Skutečná podoba měřeného vzorku nepřímé metody posuvné rychlosti $140 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

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

Příloha III.: Skutečná podoba měřeného vzorku nepřímé metody posuvné rychlosti $420 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

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

Příloha V.: Skutečná podoba měřeného vzorku nepřímé metody posuvné rychlosti $700 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

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

1 ÚVOD

Nejstarší využití vody pro proces obrábění je přičítáno přírodě. Názorným příkladem je největší kaňon světa, který vznikl díky řece Colorado ve státě Arizona. Za pomoci eroze a nárazů vody vytvořila Grand Canyon, který dosahuje místy hloubky, až 1600 m. Příroda nás má stále co učit a každým dnem to dokládá.

Technologie vodního paprsku, kdy se využívá kapalinového media jako nástroje obrábění je známa necelé jedno století. Velký rozmach této technologie nastal v posledních několika desetiletích, kdy některé firmy viděly v tomto způsobu obrábění budoucnost a zkoumaly jeho možné průmyslové využití.

Základem 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. Levnější provoz, jednodušší zařízení, široká využitelnost pro různé druhy materiálů, jednoduchá obsluha a rychlá výroba.

Díky technologickému pokroku jsou každým rokem nabízeny další a další materiály. Díky těmto skutečnostem není možné pro všechny ani najít odpovědi na optimální parametry obrábění, zvláště vodním paprskem. Ani výrobci strojů a nástrojů neotálejí. Snaží se vždy na trh nabídnout co nejlepší variantu pro obrábění právě nově uváděných materiálů.

Kvalita opracovaného povrchu je velmi důležitá. Jednak pro výrobce, který tím prezentuje, že jeho práce je kvalitní a pečlivá, ale také pro uživatele, který výrobek používá. Kvalitně obrobený materiál neznámá pouze krásnější vzhled. Můžou se s tím spojovat i další činnosti, jako jsou například povrchová úprava pomocí nátěrových hmot, lepší vlastnosti pro lepení a mnoho dalších. Některé součástky v zážehových a vznětových motorech musí být vyrobeny na desetiny milimetru přesně. Se všemi takovými proměnnými hledáme co nejlepší podobu obrobené plochy pro další použití. V této bakalářské práci se budeme právě kvalitou obrobené plochy zabývat, konkrétně jak změna posuvné rychlosti ovlivňuje kvalitu obrobené plochy pro využití výrobku.

Ze seznamu literatury, která je uvedena v závěru samotné práce, jsem nejvíce využíval knihu 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.

2 CÍL PRÁCE

Cílem bakalářské práce bylo experimentálně prokázat, jak rozdílné vstupní parametry, konkrétně rozdílná posuvná rychlost čistého vodního paprsku ovlivňuje kvalitu obrobené plochy foliované vodovzdorné překližované desky.

3 ANALÝZA TECHNOLOGIE

Prokeš (1978) uvádí, že obrábění je technologický proces, kterým získává obrobek požadovaný tvar příslušných rozměrů, geometrie a jakosti obrobených ploch.

Obrábění pomocí vodního paprsku označujeme jako progresivní technologii. Nepoužívají se tedy běžné nástroje, ale vlastní proces dělení se realizuje pomocí kapalinového paprsku. Hydrodynamické obrábění využívá kapalinu k odebrání materiálu mechanickým účinkem dopadu úzkého kapalinového proudu s vysokou rychlostí a kinetickou energií na jednotku plochy (Barcík a kol., 2012; Řasa a kol., 2001).

Z hlediska použití pracovního media můžeme rozlišovat dva základní typy:

- WJM – Water Jet Machining – čistý vodní paprsek,
- AWJ – Abrasive Waterjet Machining – obrábění abrazivním vodním paprskem (Maňková, 2000).

3.1 Historie

První pokusy využití vodního paprsku jako nástroje byly zkoumány v roce 1936 americkými a sovětskými inženýry. Pokoušeli se o využití energie proudící vody nejen na transport, ale i na dobývání uhlí v Rusku (Barcík a kol., 2012).

V roce 1949 se paprsek začal využívat na odbourávání minerálů v USA. Pokusy byly prováděny při tlaku vody až 2000 barů na ředění horniny roku 1956. Použití technologie mimo důlní průmysl se datuje roku 1961. V USA bylo popsáno a patentováno řezání oceli, niklu a titanu vysokorychlostními paprsky oleje. Po roce 1970 se začínají přidávat aditiva v podobě dlouhých řetězců polymerů do paprsku vody. První komerční použití vodního paprsku (WJM), bylo využíváno na řezání vrstevného kartonu pro nábytkářský průmysl roku 1971 (tamtéž str. 16)

Konečný převrat v této technologii přinesl až rok 1974. Firma Boeing, která se zabývala výrobou letadel a kosmických dopravních prostředků přispěla k hromadnému rozšíření této technologie (Řasa a kol., 2001).

Firmy Boeing s firmou Flow ve spolupráci zahájily řezání vláknitých kompozitních materiálů pomocí vodního paprsku. Tato spolupráce byla zlomová pro vývoj této technologie (Barcík a kol., 2012).

Německá spolková republika roku 1977 se pokusila o využití technologie na velký projekt hydromechanickou těžbu uhlí. Počátkem 1987 bylo v USA vytvořeno první pracoviště pro obrábění rotačních součástí soustružením a vrtáním vodním paprskem. Na výstavě ROBOT 98 v Brně byla technologie poprvé představena i občanům Československé republiky (tamtéž str. 17).

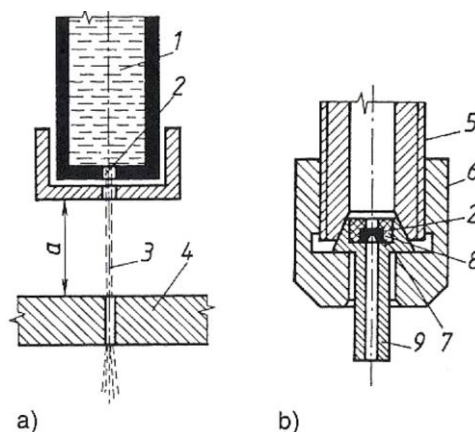
3.2 Dělení materiálu

3.2.1 Obrábění čistým vodním paprskem

Při obrábění čistým vodním paprskem se využívá skutečnosti, že kapalina vystupující z trysky velmi malého průměru (cca. 0,3 mm), pod vysokým tlakem (cca. 200–700 MPa) je nositelem velké kinetické energie (Řasa a kol., 2001; Valíček, Hloch, 2008). Z pohledu účinku kinetické energie na materiál by se kapalinový paprsek dal považovat až za tuhé těleso. Při kontaktu paprsku s povrchem rozrušovaného materiálu se naakumulovaná kinetická energie v kapalinovém paprsku uvolní a dojde k jejímu působení na daný materiál. Projeví se to náhlým nárůstem napětí v kontaktní zóně, při kterém dojde až k porušení jeho celistvosti. Rozsah porušení materiálu je závislý na jeho mechanických vlastnostech a také na velikosti působícího napětí (Krajný, 1998).

K základním druhům rozrušení materiálu patří: poškození následkem plastické deformace, šíření napěťových vln, příčného roztékání proudu a pronikání kapaliny do nitra materiálu mezi jeho strukturu. Působením jednoho nebo více uvedených mechanismů dochází nejprve k poškození a až později k odnosu materiálu, na který kapalina působila (Barcík a kol., 2012).

Nejvýznamnější vliv má hlavně plastická deformace. Ta je důsledkem působení velké kinetické energie na velmi malou plochu. Vzdálenost trysky od materiálu je 2–70 mm. V případě, že vnitřní napětí v materiálu přesahuje pevnostní charakteristiky řezaného materiálu, způsobí to vznik trhlin v řezaném materiálu, které se v důsledku dynamického zatížení velice rychle šíří a spojují (Barčík a kol., 2012; Morávek, 1999).



Obr. 1. Řezací hlava pro vodní paprsek; a) schéma, b) provedení vodní trysky: 1 – tlaková kapalina, 2 – výstupní tryska, 3 – kapalinový paprsek, 4 – obrobek, 5 – potrubí, 6 – matice, 7 – lůžko trysky, 8 – držák trysky, 9 – stabilizátor, a – vzdálenost trysky od povrchu (Řasa a kol., 2001)

3.2.2 Abrazivní vodní paprsek v procesu obrábění

Rozdíl mezi čistým vodním paprskem a abrazivním vodním paprskem je v přidávání brusiva do proudu vody. Abrazivní řezné medium je usměrněné do úzkého paprsku s vysokou řeznou účinností. Přidáváním abraziva se zvyšuje výkon řezání (Barčík 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 používané abraziva se používá 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 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 částičky do paprsku. Vzhledem k vysoké kompaktnosti paprsku se v podstatě pouze připojí na povrch vodního sloupce a vytvoří pomyslný obal paprsku. Nedokonalost 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).

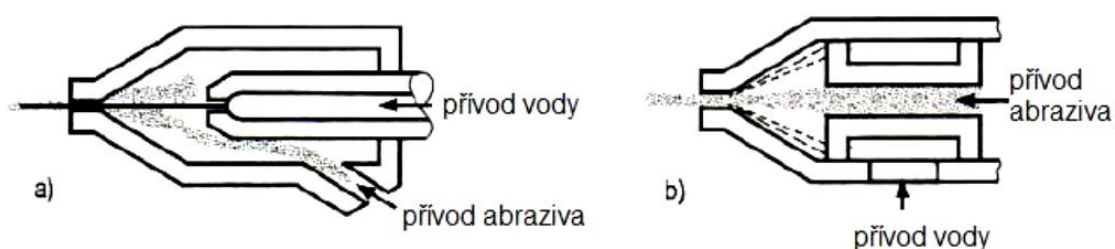
Abrazivní vodní paprsek se označuje mnoha výhodami:

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

3.3 Způsoby vytváření abrazivního vodního paprsku

3.3.1 Nepřímé vstřikování abraziva

Abrazivní částičky jsou ze zásobníku vedeny do směšovací komory, kde jsou strhávány rychlostí vody. Směs je urychlována přes abrazivní trysku. Množství abraziva je $0,5\text{--}20 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$ (Barcík a kol., 2012).



Obr. 2. Trysky pro obrábění vodním abrazivním paprskem: a) tryska s radiálním přívodem brusiva, b) tryska s axiálním přívodem brusiva (Máňková, 2000)

3.3.2 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 a množství abraziva může překročit i $20 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$. Paprsek takto vzniklý je označován jako ASJ tj. Abrasiv Suspension Jet. Při posuzování

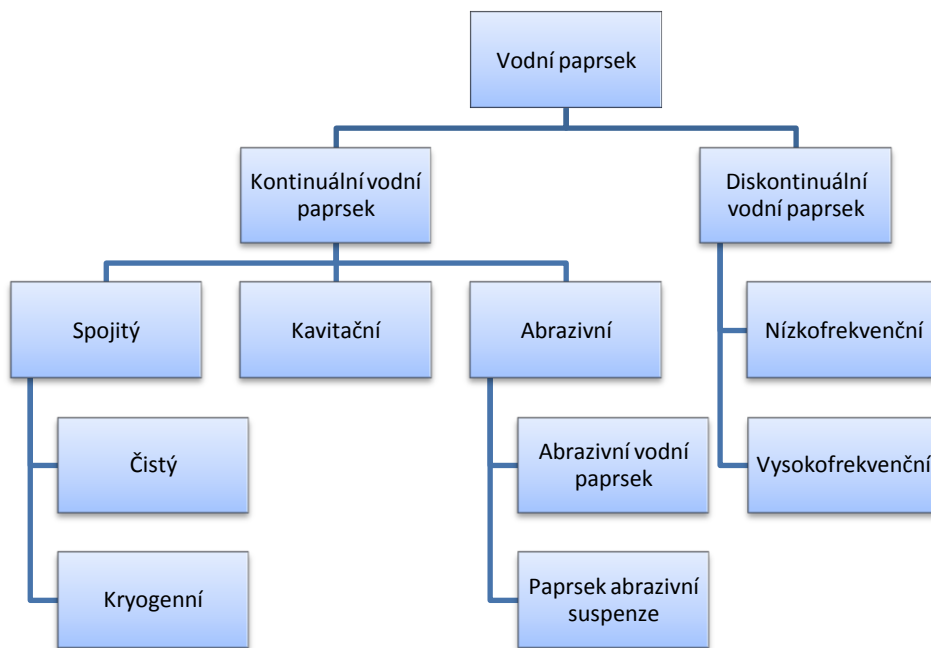
abrazivního paprsku je třeba brát v úvahu, že jeho složení je třífázové (pevné, kapalné a plynné skupenství).

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 (Barčík, 2007).

4 DRUHY VODNÍCH PAPERKŮ

V nynější době se při laboratorním testování objevují následující typy kapalinových paprsků.



Obr. 3. Schematické znázornění druhů kapalinových paprsků (Barčík a kol., 2012)

5 VLASTNOSTI PRACOVNÍHO MEDIA

Pracovní kapalina pro obrábění vodním paprskem musí mít následující vlastnosti:

- nízkou viskozitu, zabezpečující malé ztráty výkonu toku kapaliny při průchodu potrubím a zejména tryskou,
- minimální agresivitu s ohledem na kovové části celého zařízení,
- malou toxicitu, kapalina nesmí dráždit pokožku, dýchací cesty a zrak obsluhy,

- běžnou dostupností,
- nízkou cenu,
- schopnost splňovat hydrodynamické charakteristiky vysokorychlostního paprsku,
- schopnost zajišťovat maximální produktivitu,
- schopnost zajišťovat nejlepší kvalitu obrábění při nejmenších energetických ztrátách na formování paprsku (Krajný, 1998; Kocman, 2004).

Jako pracovní médium se nejčastěji používá voda přímo z vodovodního řádu nebo zbavená minerálních látek. Je to nejdostupnější a nejlevnější kapalina bez vlivu na životní prostředí i na obsluhu. Vodě můžeme přičítat pouze dva nedostatky pro náš záměr: korozivní účinek na kovové materiály, negativní vliv na technologické parametry procesu obrábění (Barcík a kol., 2012).

V závislosti na řezaném materiálu je možné použít i další látky, jako jsou líh, mléko, kakao, minerální oleje a mnoho dalších. Zařízení našlo široké uplatnění v různých odvětvích, jako například v potravinářském a medicínském (tamtéž str. 30).

Korozivní účinek na samotné hydraulické zařízení je možné omezit výrobou zařízení z nerezavějící oceli. Technologické parametry procesu obrábění čistým vodním paprskem lze vylepšit přimícháváním aditiv polymerů. Účinkem přidávaných polymerů se paprsek stává kompaktnějším před i po styku s materiálem, a tím je energie koncentrovanější na menší plochu. V důsledku soustředění energie se vodní paprsek s přidavkem aditiv stává účinnějším ve srovnání s čistou vodou (tamtéž str. 29).

Bylo prokázáno, že používání polymerů má negativní vliv na obsluhu strojů, kdy v důsledku víření drobných částic právě polymerů ve vzduchu se zvyšuje procento onemocněných rakovinou. Díky těmto poznatkům se používání polymerů omezilo na minimum (Krajný, 1998).

Dalším hlediskem bylo také to, že polymery byly zvyšující provozní položkou. Tekutiny s polymery musí být provozovány v uzavřeném cyklu, což je jak technicky tak i finančně náročné. Díky tomu obyčejná voda patří stále mezi nejrozšířenější pracovní média v dřevozpracujícím průmyslu. V oblastech jako je medicína, potravinářský nebo strojní průmysl jsou na řezné kapaliny kladeny specifické požadavky. V medicíně při operacích a řezání léků jsou vysoké nároky na sterilitu řezné kapaliny, proto se využívá líh a alkohol. Potravinářský průmysl využívá pro řezání potravin, aby nebyla dotčena

chuť výrobku kakao, mléko, máslo, glycerin, rostlinné oleje apod. Strojírenský průmysl má zase vysoké nároky, aby medium působilo antikorozivně, využívá tedy čisté minerální oleje, antikorozivní roztoky a emulze (Barcík a kol., 2012).

Řezné oleje sice hoří, ale za podmínek, za kterých se v provozu používají, netvoří zápalné ani výbušné směsi. Nevznítí se ani při styku s otevřeným plamenem. K jejich vznícení dochází až při teplotách nad 400 °C. Samozřejmě je více druhů olejů, proto si musíme technické listy vyžádat přímo od výrobce. Dalším problémem je zdravotní nezávadnost. Některé oleje mohou tvořit výpary s některými přísadami, které se uvolňují teplem, působí nepříznivě na dýchání (Kocman, 2004).

Ochrana životního prostředí má vzrůstající význam po celém světě. Při strojírenském obrábění se vyskytují četné ekologické problémy. Výrobní metody, které budou šetrné k životnímu prostředí, budou v budoucnosti hrát klíčovou roli při hospodaření podniku (Mádl, 2000).

5.1 Chemické a fyzikální vlastnosti vody

Voda je sloučenina prvků vodíku a kyslíku v atomovém poměru 2 : 1 jinak také známa jako H₂O, které jsou vázány kovalentní vazbou H – O – H. Voda v přírodě není chemicky čistá, ale obsahuje i množství organických a anorganických složek a také mikroorganismů. Chemicky čistá voda je bez barvy, chuti a zápachu. Vždy 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).

Svou hustotu mění voda v závislosti na teplotě. Při teplotě 4 °C dosahuje maximální hustoty a je nejtěžší. Tato anomálie vody se projevuje tím, že voda 4 °C klesá v nádrži na dno, zatímco teplejší nebo chladnější voda stoupá k povrchu (Barcík a kol., 2012).

Důležitou fyzikální vlastností vody z hlediska použití jako řezného média je kompresibilita. Změna hodnoty kompresibility (stlačitelnosti vody) při změně tlaku o 10 MPa je 4 %, což představuje stažení pracovní kapaliny na tlak 400 MPa až 15 %. Tuto 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 optimální těsnost a životnost vysokotlakých těsnění multiplikátoru (Barcík a kol., 2012).

5.2 Specifikace vody

Díky velké variabilitě vody a různým způsobům její úpravy si jednotlivé firmy zavedly specifikace vody, aby předešly problémům ohledně reklamací stojů. 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, ventilů, těsnění a pístů (Krajný, 1998).

5.3 Způsoby úpravy vody

Úprava vody zabraňuje předčasnému opotřevení trysek před usazováním příměsí obsažené ve vodě a tím prodlužuje jejich životnost. Byly stanoveny tři základní postupy úpravy vody, kterých by se mělo využívat v praxi:

- mechanická (filtrace),
- fyzikálně – chemická,
- biologická (Barcík a kol., 2012).

5.3.1 Mechanická úprava vody

Filtrace se zakládá na mechanickém zachycení pevných látek na překážce – filtru. Při obrábění vodním paprskem se používá hluboký filtr. Filtr je složen z několika vrstev dokáže zadržet částice, až do velikosti 1 μm . 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 obráběním vodním paprskem vyžaduje medium bez zápachu a chuti, proto 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).

5.3.2 Změkčování

Je brán jako předúpravny 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 záklopy. Voda stéká přes pryskyřičné řečiště, plastický materiál skládající se 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 na zrnkách se uvolní a jsou vypuštěny z vody. Iontová výměna probíhá v poměru 1 : 1 (Krajný, 1998).

5.3.3 Deionizace

Je proces podobně založený jako změkčování na výměně iontů s tím rozdílem, že při deionizaci se kromě katiiontové využívá aniontová pryskyřice (Barcík a kol., 2012).

5.3.4 Zpětná osmóza

Nazývá se také reverzní, je to proces produkující 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).

Účinnost reverzní osmózy je u všech částic, bakterií a dalších mikroorganismů vysoká. Udává se účinnost až 95 % (Barcík a kol., 2012).

5.3.5 Fyzikální úprava

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,
- přechodem přes elektromagnetické střídavé pole,
- přechodem přes elektrostatické vysokonapěťové pole,
- přechodem přes galvanický iontový článek-polarizátor (tamtéž st. 36).

5.3.6 Biologická úprava vody

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

6 ANALÝZA KONSTRUKČNÍHO ZAŘÍZENÍ PRO ŘEZÁNÍ VODNÍM PAPSKEM

Zařízení na řezání kapalinovým paprskem se skládají z následujících částí:

- Lapač, je umístěn proti řezací trysce pod obráběným materiálem. Jeho úkolem je zachycovat a ničit energii paprsku, který projde skrz materiál. Nejčastěji má podobu vany o výšce 800 mm, která je naplněna keramickými kuličkami. Dalším možným způsobem je použití trubky dlouhé minimálně 300 mm, která je naplněna speciálním přípravkem pro pohlcení zbytkové energie paprsku. Lapač je synchronně veden s řezací tryskovou hlavou (Moravek, 1999).
- Přívod pracovní kapaliny.
- Čistící filtry, jejichž funkcí je odstraňovat nečistoty z přiváděné pracovní kapaliny a současně přivádět kapalinu do vysokotlakého čerpadla.
- Nízkotlaké čerpadlo, které umožňuje regulaci výstupního tlaku a ovládá zároveň vysokotlaké čerpadlo.
- Zásobník tlakové pracovní kapaliny, který slouží k vyrovnání a udržení konstantního pracovního tlaku kapaliny, vystupující z vysokotlakého čerpadla.
- 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 a kol., 2001).

- Pracovní řezací hlava, která se liší v závislosti na použité pracovní kapalině. Velikost trysek zajišťuje různou kinetickou energii paprsku. Může také určovat počet pracovišť, které je možné současně napájet z jednoho zdroje. Životnost trysek je závislá na množství minerálů obsažených ve vodě a je v rozmezích 50–500 hodin (Morávek, 1999).
- 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 na ruku robota nebo jako souřadnicový stůl.
- Vysokotlaké potrubí, které přivádí tlakovou pracovní kapalinu k pracovní řezací hlavě.

V těle řezací hlavy pro čistý kapalinový paprsek je ve spodní části umístěna safírová tryska, která má výstupní průměr 0,1–0,4 mm (Řasa a kol., 2001).

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

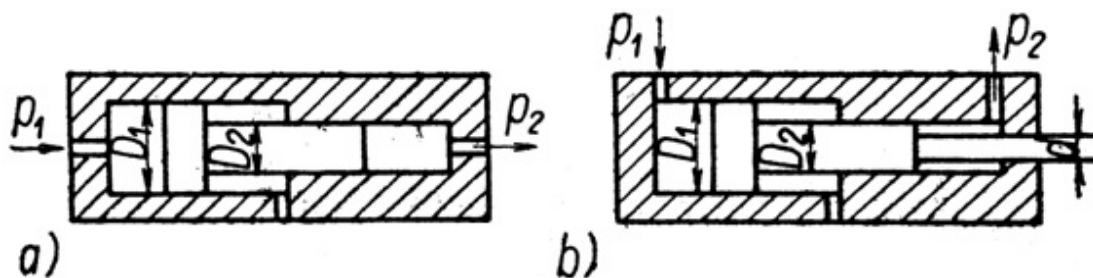
6.1 Zařízení s multiplikátorem

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. Převážně se jedná o zvýšení tlaku, nazýváme toto zařízení všeobecně zesilovači. 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 na generování vysokorychlostního paprsku s multiplikátorem je tvořen ze dvou okruhů:

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

Vysokotlaký okruh (sekundární) je řízen nízkotlakým (primárním) okruhem prostřednictvím tlaku řídicí kapaliny hydraulické jednotky (Krajný, 1998).



Obr. 4. Základní schéma zesilovačů tlaků: a) pro nižší stupeň zesílení, b) pro vyšší stupeň zesílení (Šimůnek 1969)

6.2 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. Zařízení je charakteristické přímým řízením mechanismu s jednoduchou konstrukcí klikového zařízení. Generování tlaku je zajištěno paralelním způsobem s válci s jednočinnou pístnicí (Barčík a kol., 2012).

6.3 Použití metody a dosahované parametry

Čistý kapalinový paprsek se používá hlavně pro řezání měkkých a málo houževnatých materiálů. Maximální tloušťka řezaného materiálu je závislá na druhu materiálu obrobku, na tlaku pracovní kapaliny, rychlosti řezání a také na vzdálenosti řezací trysky od povrchu obrobku. Šířka řezné spáry je 0,1–0,3 mm (Řasa a kol., 2001).

Rychlost řezání je pro lamináty, až $5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, papír a lepenky $400 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ (Kocman, 2011).

Materiály jako jsou například kůže, guma, všechny umělé hmoty, potraviny $10\text{--}100 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, uhlíkové kompozity, kevlar $0,5\text{--}10 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ (Morávek, 1999).

Abrazivní kapalinový 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 podle tloušťky a druhu materiálu od $5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ pro kovy. Drsnost obrobeného povrchu $R_a = 2,5\text{--}12 \mu\text{m}$, podél tloušťky řezaného materiálu se mění. Nejlepší je na straně vstupu paprsku do řezaného materiálu, 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 a kol., 2001).

Přesnost řezaných tvarů a rozměrů 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 složité a málo tuhé obrobky (tamtéž str. 184).

Dalším možným 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 (Maňková, 2000).

Také frézování vodním abrazivním paprskem, využívá se pro tvarově složité 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.

Využití technologie vodního paprsku je natolik obsáhlá, že by zpracování pouze této oblasti stačilo na samostatnou práci (tamtéž str. 83).

7 KVALITA ŘEZNÉHO PROCESU

Kvalitou řezného procesu se rozumí výsledek činnosti nástroje na celkovou kvalitu produktu. Podmíněné je třemi druhy přesnosti: tvarové, rozměrové a povrchové (Lisičan, 1996).

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

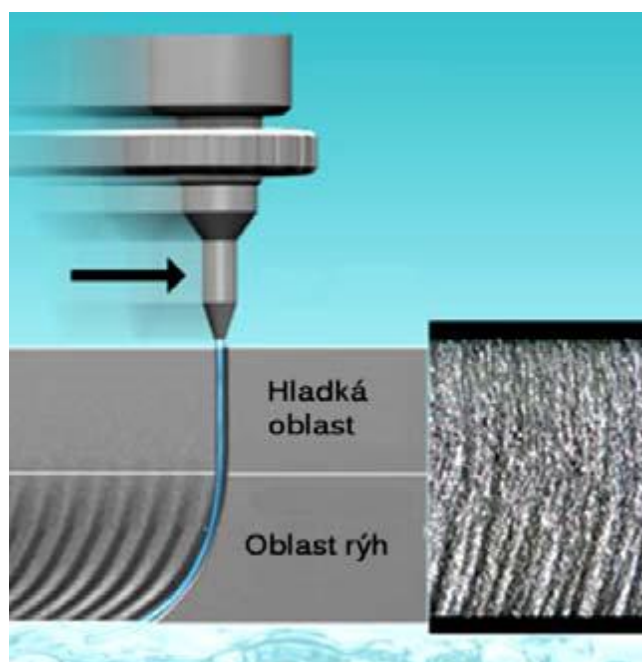
Nerovnosti jsou nežádoucí důsledek probíhajících fyzikálních procesů. Nerovnosti vznikající při řezání se zvětšují i nehomogenní stavbou dřeva. Rozdílné vlastnosti jarního a letního dřeva negativně působí na kvalitu opracování, výsledkem čeho je rozdílně členitý povrch obrobku (Zemiar, 2009).

7.1 Vlastnosti opracovaného povrchu

Při využívání všech vysoce energetických technologií jsou zanechávány viditelné stopy obrábění na obrobené ploše. Povrch po řezání bychom mohli rozdělit do dvou oblastí. 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. Hladká část v horní části řezu, je výsledkem řezného opotřebování a druhá rýhovaná zóna ve spodní části řezu vznikla jako důsledek deformačního opotřebování při řezání (Barcík a kol., 2012).



Obr. 5. Trajektorie paprsku (ELNA Servis s. r. o., 2015)

Na výše uvedeném obrázku můžeme vidět odklonění paprsku díky snižující se kinetické energii paprsku. Dále je viditelný přechod z hladké zóny do rýhované.

Kvalita povrchu řezu se dělí do pěti skupin podle výsledné kvality obrábění, která přímo souvisí s rychlostí posuvu řezací hlavy. Na níže uvedeném obrázku je graficky rozpoznatelné rozdílné kvality řezu. Nejhorší kvalita je vyobrazena pod číslem 1 a nejlepší 5. Běžné označení kvality se udává v podobě Q1–5 (ELNA Servis s. r. o., 2015).



Obr. 6. Kvalitativní skupiny řezů vodním paprskem (ELNA Servis s. r. o., 2015)

Tab. 1 Orientační popis užívaných stupňů kvality řezu se základní charakteristikou (CHPS s. r. o., 2015)

kvalitativní stupeň	základní charakteristika	drsnost Ra (μm) v horní kontuře	drsnost Ra (μm) ve spodní kontuře	tvarová přesnost (mm) v horní kontuře	tvarová přesnost (mm) ve spodní kontuře
Q5	nejlepší řez	< 3,2	3,2	+/- 0,1	+/- 0,1
Q4	kvalitní řez	3,2	6,3	+/- 0,1	+/- 0,2
Q3	střední řez	4	< 12,5	+/- 0,15	dle typu a síly materiálu
Q2	hrubý řez	4	< 25	+/- 0,2	dle typu a síly materiálu
Q1	dělicí řez	4,0–6,3	< 40	+/- 0,2	výrazně nepřesné

Hodnoty ve výše uvedené tabulce jsou orientační a zcela závisí na druhu materiálu.

7.2 Hodnocení topografie povrchu

Od 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).

Jednou z možností jak hodnotit kvalitu povrchu je použití mechanické metody. K tomuto účelu se používají speciální zařízení. Na plochách, které byly řezány vodním paprskem, vzniká typická textura, která je popsána parametrem vlnitosti W a průměrnou aritmetickou úchylkou R_a (Valíček, Hloch, 2008).

Kontrola jakosti povrchům hlediska jejich funkčnosti je velmi důležitá, proto je řízená normami. Normy hodnocení povrchů v oblasti technologie vodního paprsku doposud nebyly zavedeny. Odborníci však doporučují využít normy ČSN EN ISO 4287 a ČSN EN ISO 4288 (Pernikář a kol., 2001).

Jako jeden z nejdůležitějších ukazatelů je považována průměrná aritmetická odchylka posuzovaného profilu označována jako R_a (ČSN EN ISO 4287).

7.3 Chyby vznikající během řezání

7.3.1 Kvalita řezné plochy

Vystupující paprsek z obrobku se s narůstající vzdáleností od trysky rozpadá, což má za následek zvětšující 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 19. března 2015 jsou 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,
- 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 širším řezem ve středu materiálu a uší řeznou mezerou v horní a dolní části obrobku (Krajný, 1998).

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, jak je znázorněno na obrázku 7 napravo. Velmi rychlý nebo řez odolnějším materiálem se projeví zužujícím se tvarem řezné spáry (CHPS s. r. o., 2015).



Obr. 7. Geometrie řezné spáry (CHPS s. r. o., 2015)

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 19. března 2015. Neúplné prořezání materiálu u konce řezu. Tento jev 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“.

7.3.2 Povrchové vady při řezání

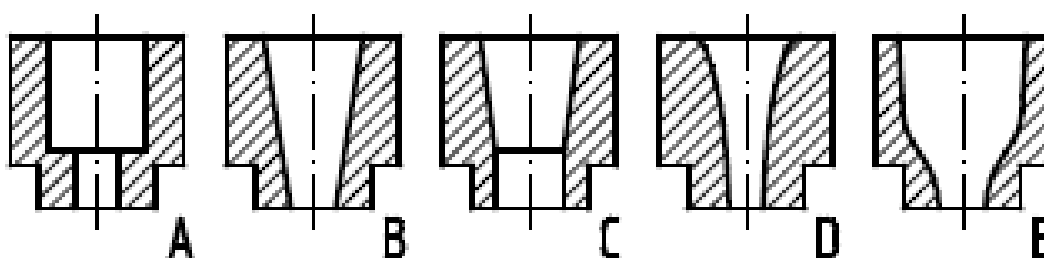
Nejčastějším vznikem povrchových vad jsou rozptýlené částice kapaliny a abraziva otrýskávající povrch materiálu v blízkosti řezné hrany, jak uvedl zaměstnanec firmy AWAC s r. o. Jaroslav Máša (mistr zakázkové výroby, programátor) dne 19. března 2015. Dochází k odstranění povrchové úpravy nebo ke vzhledovým kazům. Problém se řeší přiložením měkkého materiálu na povrch řezaného materiálu nejčastěji dřevotřískovou deskou.

8 POSOUZENÍ VLIVŮ OBRÁBĚCÍCH PARAMETRŮ

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

Tlak pracovního kapaliny je nejdůležitějším parametrem obrábění, který má vliv na proces dělení materiálu. Zvyšováním pracovního tlaku stoupá i možná hloubka prováděného řezu. Zvyšování tlaku dále také působí na posuvnou rychlost, čím vyšší tlak, tím můžeme zvolit vyšší posuvnou rychlost. Při volbě vyššího tlaku nám klesá spotřeba abraziva. Změnou vnitřního průměru trysky pro vodní paprsek se mění průtok kapaliny a zároveň i kinetická energie paprsku. Se zvyšující 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. Typ abraziva jednoho druhu nemusí být vhodný na obrábění jiných materiálů, které se nám mohou vyskytnout ve výrobě. Dalším ovlivňujícím parametrem může být tvar a velikost zrn abraziva. Při výběru vyhovujícího materiálu musíme také dále zvolit přímo ve výrobním cyklu hmotností tok abraziva. Při zvyšujícím se množství abraziva se zvyšuje hloubka řezu (Barcík a kol., 2012; Krajný, 1998).



Obr. 8. Tvary dostupných trysek: a – válcová, b – kuželová, c – kombinovaná, d – konická, e – složená (Krajný, 1998)

Se snižováním posuvné rychlosti výrazně narůstá maximální hloubka řezu i při ponechání nezměněných dalších parametrech. Zlepšuje se také kvalita obrobenej 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. 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° (Barcík a kol., 2012; Krajný, 1998).

9 DÍLČÍ ZÁVĚR

Technologie řezání vodním paprskem je natolik obsáhla, že důkladné shrnutí není ani možné. Tento poznatek je ve shodě s použitelností vzhledem k tomu, že tato technologie je víceúčelová a využitelnosti se meze nekladou. Se stále zvětšujícím se technologickým pokrokem a množstvím nových materiálů roste i možnost použití. Stále zdokonalující software je jeden z hlavních důvodů zvyšující se použitelnosti této technologie.

10 MATERIÁL A METODIKA

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

- různá rychlost posuvu,
- kvalita povrchu Q1–5,
- možnost výroby tvarově složitějších tvarů,
- čas výroby,
- náročnost programování tvarů vzorků,
- cena řezání.

10.1 Řezací zařízení

Sledovaný materiál byl obráběn na zařízení firmy AWAC spol. s r. o. s pobočkou v Brně s konkrétním zařízením Flow MACH 4c SERIES M – 412 s vysokotlakým čerpadlem HYPERJET 94i. Parametry řezacího stroje jsou lineární přesnost polohování $0,025 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-1}$, maximální posuvná rychlost $36 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a maximální řezná rychlost $25 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. HyperPressure čerpadlo Flow, nazvané HYPERJET 94i, je dimenzováno na tlak 648 MPa a poskytuje nepřetržitý provozní tlak až 600 MPa. S použitím HYPERJET 94i čerpadlem je možnost dosahovat rychlosti paprsku až 4 Mach. Řezací hlava pro obrábění čistým vodním paprskem byla zvolena safírová tryska průměru 0,305 mm. Vzdálenost trysky od materiálu 2 mm (Flow, 2015 c).



Obr. 9. Řezací systém MACH 4 (Flow 2015 a)



Obr. 10. Vysokotlaké čerpadlo HYPERJET 94i (Flow 2015 b)

10.2 Materiál

10.2.1 Překližovaná deska

Překližovaná deska je tvořena množstvím dých lichého počtu. Musí být zachováno pravidlo symetrie. Toto pravidlo znamená, 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 (Janák, Král, 2003).

10.2.2 Vodovzdorná překližka

Podle Krále a Hrázského (2005) vodovzdorné překližky se vyrábí 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 v podélném nebo příčném provedení. Dodávají se nebroušené nebo broušené. Překližované desky jsou určeny jako nosná i nenosná deska pro použití ve vlhkém prostředí. Desky lze použít pro třídu ohrožení 1 a 2. Nejčastějším

využitím jsou obaly, stavebnictví, automobilový průmysl. 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 vůči povětrnosti a působení tekoucí vody nebo vodní páry obsažen 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).

10.2.3 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 $120 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ (Demos, 2015).

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 (Král, Hrázský, 2005).

Tyto desky jsou vyráběny ve dvou 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. Nejčastější tloušťky desek 8; 10; 12; 15; 18; 21; 25 mm, formát 125x250 cm (tamtéž str. 15).

10.3 Metodika stanovení nerovnosti obrobeného povrchu

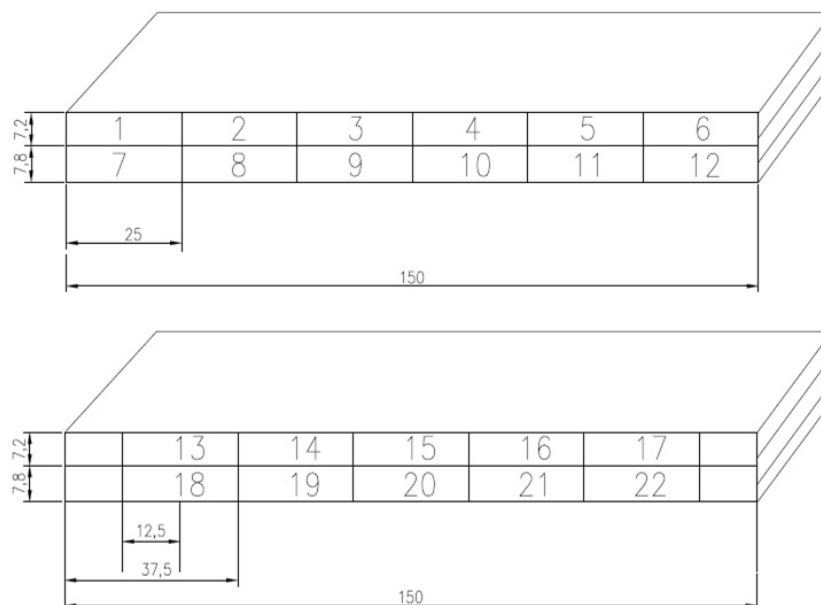
Měření nerovnosti obrobeného povrchu bylo prováděno pomocí zařízení Mitutoyo surfTest SJ 201P. Zpracování výsledků zařízení bylo provedeno v programu SurfTest SJ201 verze 3.20 s exportem umožněného do programu Excel tabulkového kalkulátoru firmy Microsoft. Systém pracoval v prostředí MS Windows XP Professional.

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 přiloženého u přístroje na maximální hodnotu 350 μm .
2. Typ měřicího zařízení neumožňovat odnímatelnou měřicí jednotku, proto bylo zapotřebí vypodložit měřicí zařízení materiálem stejných rozměrů. Po správném vypodložení zařízení byl umístěn hrot měřicího zařízení do správné polohy. V našem konkrétním případě byla zvolena trajektorie odpovídající polovině hladké i rýhované zóně po obou stranách podélných obrobených ploch vzorků. Oblasti hladkých a rýhovaných zón byly určeny pomocí posuvného měřítka na vzorku s největší posuvnou rychlostí, kde přechody byly nejlépe viditelné. Tyto zjištěné hodnoty byly přiřazeny pro všechny zkoumané vzorky. Šířka hladké zóny byla určena na 72 mm. Rýhovaná oblast má tedy šíři 78mm. Vycházíme ze skutečnosti 150 mm silné vodovzdorné překližované desky.



Obr. 11. Znárodnění konkrétních míst měření drsnosti zařízením SJ 201P

Na Obr. 11. je graficky znázorněno jednotlivých průběhů měření drsnosti povrchu po obrábění vodním paprskem. Číslice 1–6 znázorňují hladkou plochu, 7–12 rýhovanou. Dále číslice 13–22 jsou měřená místa, která odpovídají přechodu mezi měřením 1–12.

3. Pomocí zařízení bylo uskutečněno měření drsnosti. Dráha jednoho měření byla vždy 25 mm dle nastavení přístroje. Vždy byly měřeny obě podélné plochy od začátku vzorku do konce. Tento postup byl zvolen z důvodu lepší prokazatelnosti výsledků.
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.

10.4 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.

10.5 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 nasnímána kamerou Nikon Ds – Fi 1 s makroobjektivem Navitar. Před vlastním snímáním byla provedena rozměrová kalibrace systému – tzn. do systému byly vloženy reálné rozměry zobrazované scény vzhledem k aktuálnímu zobrazovacímu měřítku (delší strana snímku reprezentovala skutečnou velikost 80, 95 mm, velikost 1 pixelu byla 0,03 mm). 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, 420, 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. Do obrázků bylo vloženo rovněž grafické měřítko zobrazení (Mazal 2015).

10.6 Příprava zkušebních vzorků

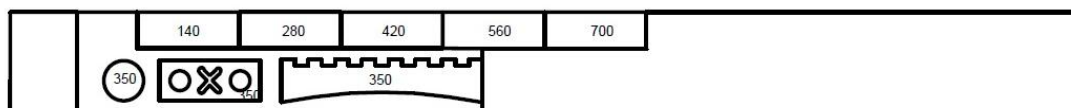
10.6.1 Tlak řezací kapaliny

Tlak řezání byl zvolen 380 MPa. Tento tlak byl zvolen zaměstnanci firmy AWAC s r. o. pro bezproblémové nastavení stroje. Hlavním důvodem bylo, že pobočka uvedené firmy v Brně je zaměřena na řezání kovových materiálů. Záměna abrazivní

řezací hlavy za hlavu pro čistý paprsek byla tedy možná, ale kalibrace pro maximální tlak zařízení nikoliv.

10.6.2 Směr opracování vzorků

Směr opracování materiálu byl zvolen jako podélný – vztahující se k základnímu délkovému rozměru desky.



Obr. 12. Zkušební vzorky

10.6.3 Posuvná rychlost řezání

Jako hlavním kritériem prokazatelnosti rozdílné kvality opracování foliované vodovzdorné překližované desky byla rozdílná posuvná rychlost. Díky specifickému softwaru firmy Flow International Corporation, který je součástí řezacího zařízení byly softwarem vypočítány rychlosti 140, 280, 420, 560, 700 mm · min⁻¹. Podle softwaru by tyto rychlosti měli odpovídat kvalitě Q1–5.

10.6.4 Vzorky

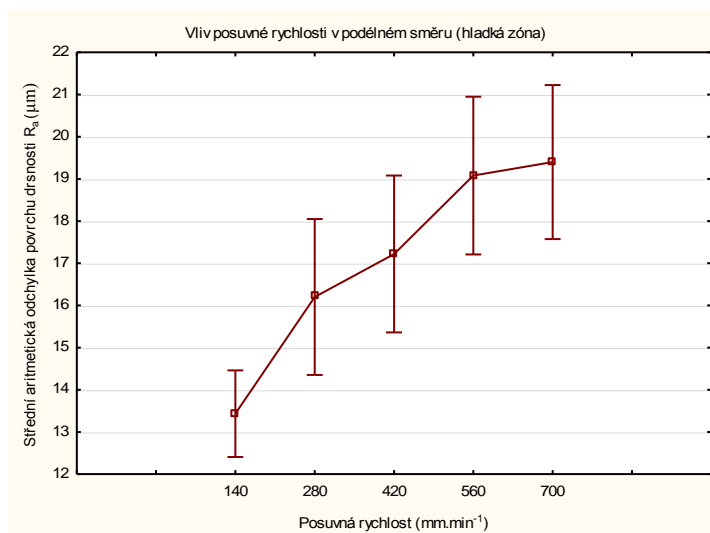
- Rozměry zkušebních vzorků: požadovaná šířka zkušebního vzorku: $\delta = 50$ mm, délka vzorku: $l = 150$ mm.
- Tloušťka materiálu 15 mm foliované břízové překližované desky oboustranně hladké.
- Byly vytvořeny také tři vzorky, které nesouvisely s experimentálním měřením. Tyto vzorky byly vyřezány pouze jako ukázka možné výroby složitějších tvarů.

10.6.5 Proces řezání

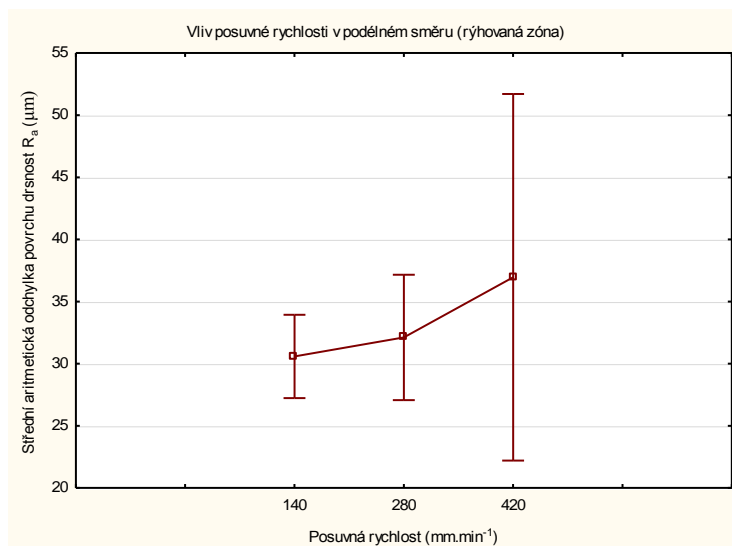
K dosažení správného výsledku obrábění bylo potřeba nejdříve zařízení správně naprogramovat, to bylo možné po řadě experimentů na okraji desky, kde byly zkoumány průstřely a maximální možné parametry obrábění. Celkem bylo vyřezáno 8 vzorků, z nichž 3 kusy jsou ukázkou možných složitějších tvarů. Zbylých 5 kusů jsou zkoumané vzorky různých posuvných rychlostí. Za pomoci softwaru obsaženého v řezacím zařízení si program sám spočítal optimální dráhu řezu. U pěti zkoumaných vzorků bylo nastaveno kritérium, aby paprsek dosahoval požadované rychlosti po celé délce podélné plochy řezaných vzorků, jak je vyobrazeno výše na Obr. 12.

11 VÝSLEDKY

Po provedení několika desítek měření drsnosti povrchu jsme došli k následujícím výsledkům. Bylo prokázáno, že změna posuvné rychlosti kapalinového paprsku významně ovlivňuje kvalitu obrobenej plochy. Na níže uvedeném Obr. 13. je tento trend graficky znázorněn jako průběh vzrůstající křivky, která znázorňuje zvyšující se drsnost obrobenej plochy obrobku v závislosti na zvyšující se posuvné rychlosti.



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



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

Na výše uvedeném Obr. 14. 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 graficky vyobrazené na Obr. 13. Vzhledem k tomu, že měřící zařízení drsnosti má své rozsahy měření, nebyli jsme schopni změřit u dalších dvou vzorků posuvné rychlosti 560 a 700 mm · min⁻¹ drsnost povrchu na rýhované zóně. V případě měření vzorku 420 mm · min⁻¹ bylo velice obtížné změřit trajektorii udanou metodikou. Určité úseky byly nad možný měřený rozsah zařízení. Díky tomu vznikala velká variabilita měřených hodnot. Průměrné hodnoty střední aritmetické odchylky povrchu drsnosti jsou v níže uvedené Tab. 2.

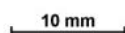
Tab. 2 Průměrné hodnoty střední aritmetické odchylky povrchu drsnosti

průměrné hodnoty střední aritmetická odchylka povrchu drsnosti		
posuvná rychlost (mm · min ⁻¹)	hladká zóna	rýhovaná zóna
	R _a (μm)	R _a (μm)
140	13,43	30,58
280	16,20	32,11
420	17,22	36,95
560	19,08	-
700	19,40	-

Nepřímá metoda detekce poškození

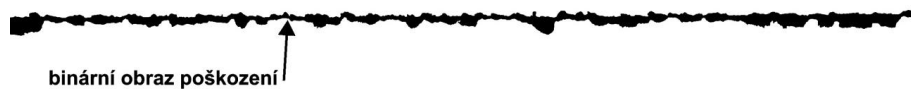
Posuvná rychlost 140 mm.min⁻¹

10 mm



Obr. 15. Nepřímá metoda detekce poškození v podélném směru vzorek 140

Na Obr. 15.–17. je graficky znázorněno binární poškození obrazu, ke kterému došlo na spodní straně řezaných vzorků. Pouhým okem lze rozeznat stoupající tendence. Přesné hodnoty poškození jsou v Tab. 3.



Posuvná rychlost 420 mm.min⁻¹



Obr. 16. Nepřímá metoda detekce poškození v podélném směru vzorek 420



Posuvná rychlost 700 mm.min⁻¹



Obr. 17. Nepřímá metoda detekce poškození v podélném směru vzorek 700

Tab. 3 Hodnoty binárního poškození obrazu

plocha binárního obrazu poškození		
vzorek (označení)	obrazu poškození (mm ²)	% kontroly
140	0,47	100
420	1,02	218
700	1,73	370
celková délka měřené hrany 161,9 mm		

12 DISKUSE

Při řešení této problematiky bylo zjištěno, že velkým nedostatkem při využití této technologie je nedostatečná kontrola jakosti povrchu obrobených ploch. Prozatím není možné provádět kontrolu s kontinuálním řízením (on – line) při výrobě. Tato skutečnost je zatím technickým problémem, která se prokázala při výrobě zkoumaných vzorků.

Vzhledem k tomu, že na trhu je velké množství materiálů bude velice problematické pro všechny zformulovat závěry. Domnívám se, že by bylo vhodné rozdělit jednotlivé materiály do normovaných skupin, z kterých by mohli výrobci čerpat jak při výrobě tak i při hodnocení kvality. Toto rozdělení by mohlo sloužit i pro lepší odvolatelnost při vzniku soudních sporů.

Při využití nepřímé metody hodnocení, která byla zařazena pouze jako kontrolní metoda tří vzorků, se následně ukázala jako velice objektivní a názorná. Je otázka tedy, zda by se tato metoda neměla objevit i v budoucích běžných způsobech hodnocení? Jedinou překážkou by mohla být náročnost zpracování jednotlivých vzorku a potřeba odborného pracovníka pro zpracování výsledků.

Z poznatků 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 překlížovaných desek je přibližně 1 μm , přičemž hrubší povrch je v příčném směru řezu při využití abrazivního vodního paprsku. Díky omezenosti měřícího zařízení tyto poznatky nemůžeme potvrdit ani vyvrátit.

Tato skutečnost mě vede k závěru, že prokazování kvality řezu v podélném a příčném směru u překlížovaných desek není již potřebné. Použitá metodika a statistické zpracování výsledků tuto oblast velice dobře dokumentuje (tamtéž str. 75–98, 196–200).

Obsahem této bakalářské práce bylo prokázat odlišnou kvalitu obrobené plochy při rozdílné posuvné rychlosti, což se nám podařilo. U testovaných vzorků obrobených pomocí technologie čistým vodním paprskem bylo prokázáno, že se zvětšující se posuvnou rychlostí roste i drsnost povrchu. Při porovnávání vlastních výsledků s firmou CHPS s. r. o. (2015) stupňů kvality řezu nebylo dosaženo stejných hodnot kvality, které byly vypočítány softwarem firmy Flow International Corporation. Problematika

stanovení optimalizace obrábění spojené s výslednou kvalitou je prozatím velkým problémem.

Dalším pohledem 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 čistým vodním paprskem je velice ekologické, ale za to velmi finančně náročné. Problematika optimalizace parametrů obrábění materiálů na bázi dřeva pomocí čistého vodního paprsku je v současné době jen velmi málo prozkoumanou oblastí.

Firma Flow International Corporation přišla se zajímavými závěry pro obrábění vodním paprskem a ekonomikou provozu. Při obrábění abrazivním vodním paprskem představuje abrazivo 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. Díky těmto skutečnostem vyvinuly nové druhy čerpadel, které mají ušetřit, až 50 % nákladů na řezání, označována jako „HyperPressure“ čerpadla. Již mnoho let firma provádí řadu výzkumů a měření. Bylo prokázáno, že efektivnost obrábění vodním abrazivním paprskem je několikrát vyšší než při výběru technologie čistého vodního paprsku.

Kvalitativně lepší úroveň obrobení prokázal Barcík a kol. 2012 při obrábění abrazivním vodním paprskem řady materiálů, které obsahovaly i překližovanou desku. Obsahem experimentů bylo i velice zajímavé zjištění. Prokázalo se, že se zvětšující se posuvnou rychlostí abrazivní vodního paprsku dochází ke kvalitativně lepšímu povrchu a tedy menší drsnosti povrchu. Při porovnání s vlastními výsledky z experimentálního řezání se tedy obrátil trend, že se zvětšující se posuvnou rychlostí roste i drsnost povrchu.

Rozdílné nahlížení na řeznou plochu bude z pohledu výrobce a jiné z pohledu uživatele nebo strojníka, který součást musí dále zakomponovat do stroje. Dalším proměnnou je, kde výrobky vyrobené zmíněnou technologií budou využívány. Jiné požadavky budou na plochy válců, kde musí být zajištěn co nejhladší povrch oproti nášlapnému plechu u schodů v exteriéru.

13 ZÁVĚR

Hledání optimálních parametrů obrábění je pro tuto technologii stále velkým problémem. Při využití technologie vodního paprsku hodnocení kvality obrobené plochy není pro jednotlivé materiály 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 čistým vodním paprskem v podélném směru řezání foliované vodovzdorné překližované desky. Kvalita obrábění je na prvním místě požadavků zákazníka. Vzhledem ke stále zvyšujícím se cenám energií se stává technologie obrábění čistým vodním paprskem finančně náročnou. Zvýšení produktivity práce je možné dosáhnout využitím abraziva. Zvýší se posuvná rychlost a kvalita obrábění při stejných parametrech v porovnání s čistým vodním paprskem se také zvýší. Podniky v dřevozpracujícím průmyslu nepatří mezi nejziskovější. Jedinou možnou variantou jak zabezpečit kvalitní obrábění a ekonomiku podniku je využití abrazivního vodního paprsku.

14 SUMMARY

Finding the optimum machining parameters for this technology is still a major problem. When using water jet technology assessment surface quality for each material is not yet defined or not defined surface quality. Have been issued so far no standards that would address this issue.

It was demonstrated that with increasing sliding speed increases and the surface roughness of the machined surface of the fluid jet in the longitudinal direction of the cutting. The quality of machining is first customer requirements. Given the ever-rising energy prices is becoming a machining technology with pure waterjet financially demanding. Increasing labor productivity can be achieved by using abrasives. Sliding will increase the speed and quality of processing, the same parameters in comparison with the pure water jet is also increased. Enterprises in the woodworking industry are not among the most profitable. The only possible option to ensure quality machining and economics is the use of abrasive waterjet.

15 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

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.

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.

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

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

Kocman, K., 2004. *Speciální technologie. Obrábění*. Brno, Akademické nakladatelství CERM, s. r. o., 227 s. ISBN 80-214-2562-8.

Kocman, K., 2011. *Technologické procesy obrábění*. Brno, Akademické nakladatelství CERM, s. r. o., 329 s. ISBN 80-7204-722-2.

Krajný, Z., 1998. *Vodný lúč v praxi*. Bratislava, EPOS, 250 s. ISBN 80-80570-91-4.

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.

Lisičan, J., 1996. *Teória a technika spracovania dreva*. Zvolen, MAT-CENTRUM, 626 s. ISBN 80-967315-6-4.

Mádl, J., 2000. *Řezné kapaliny v současné technologii obrábění*. In Bilík a kol. *Strojírenská technologie-Knihovnička Ekologie obrábění*. Ústí nad Labem, Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, 98 s. ISBN 80-7044-232-8.

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.

Pernikář, J., Tykal, M., Vačkář, J., 2001. *Jakost a Metrologie*. Brno, Akademické vydavatelství CERM, 151 s. ISBN 80-214-1997-0.

PROKEŠ, S., 1978. *Obrábění dřeva a nových hmot ze dřeva*. 2., přeprac. vyd. Praha, Státní nakladatelství technické literatury, 583 s.

Řasa, J., Pokorný, P., Gabriel, V., 2001. *Strojírenská technologie 3-2. díl*. Praha, Scientia, spol. s r. o., 221 s. ISBN 80-7183-227-8.

Slaný, M., 2009. *Nekonvenční technologie obrábění*. In *Píška a kol. 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., 1969. *Hydraulické akumulátory a multiplikátory*. In *Pivoňka a kol. Příručka 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., 2009. *Príprava povrchu*. In *Zemiar a kol. Technológia výroby nábytku*. Zvolen, Technická univerzita vo Zvolene, ISBN 80-228-2064-6, s. 137–148.

Internetové zdroje

CHPS s. r. o. [online] citováno 31. března 2015. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.chps.cz/vodni-paprsek/kvalita-a-cena>>.

Démos trade, a. s. [online] citováno 17. dubna 2015. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.demos.cz/plosny-material/preklizkove-desky/vodeodolna-foliovana.html>>.

ELNA Servis s. r. o. [online] citováno 31. března 2015. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.elnaservis.cz/voda.htm>>.

Flow International Corporation [online] citováno 31. března 2015 a. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.flowwaterjet.com/en/waterjet-cutting/cutting-systems/mach-4/cutting%20systems/Mach%204c%20Models.aspx>>.

Flow International Corporation [online] citováno 31. března 2015 **b**. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.flowwaterjet.com/en/waterjet-cutting/uhp-pumps/hyperjet.aspx>>.

Flow International Corporation [online] citováno 18. dubna 2015 **c**. Dostupné na World Wide Web: <http://www.flowwaterjet.com/~media/pdfs/Brochure/Cutting/Mach-4/Mach_4_Brochure_2012_02.ashx?la=en>.

VY – TECH steel s. r. o. [online] citováno 31. března 2015. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.vytech.cz/clanky/technologie/>>.

PŘÍLOHY

Příloha I.: Skutečná podoba měřeného vzorku nepřímé metody posuvné rychlosti $140 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$



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



Příloha III.: Skutečná podoba měřeného vzorku nepřímé metody posuvné rychlosti
 $420 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$



Příloha IV.: Znárodnění poškození binárního obrazu nepřímé metody vzorek $420 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$



Příloha V.: Skutečná podoba měřeného vzorku nepřímé metody posuvné rychlosti
 $700 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$



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

