

NETISKNOUT!
Titulní list

NETISKNOUT!
Zadání

ABSTRAKT

Předkládaná práce na téma „Integrita povrchu po řezání vodním paprskem“ se zabývá popisem problematiky progresivní nekonvenční technologie řezání hydroabrazivním paprskem, zkoumá integritu povrchu po řezání AWJ a rozebírá vybrané vlivy na výsledek řezného procesu. Zvláštní pozornost je pak věnována vyhodnocení integrity povrchu z hlediska jeho kvality. Následně je věnována pozornost faktorům vstupujících do procesu dělení a ovlivňujících topografii povrchu.

Klíčová slova

AWJ, technologie, řezání, povrch, faktory

ABSTRACT

This thesis on subject "Surface integrity after waterjet cutting process" describes problem of the progressive advanced technology, unconventional hydroabrasive jet cutting, examines the integrity of the surface after cutting AWJ and discusses selected factors on the outcome of the cutting process. Also, there are mentioned accompany effects of cutting process and the various applications of AWJ. A special attention is devoted to the surface integrity evaluation in terms of its quality. Next was attention to factors entering into the process of division and affecting the surface topography.

Key words

AWJ, technology, cutting, surfaře, factors

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PEŠATA, Jan. *Integrita povrchu po řezání vodním paprskem: Bakalářská práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, fakulta strojního inženýrství, 2010. 40s. Vedoucí práce Ing. Jaromír Dvořák, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Integrita povrchu po řezání vodním paprskem vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Vlastnoruční podpis bakaláře

.....

Jméno a příjmení bakaláře

Poděkování

Děkuji tímto Ing. Jaromíru Dvořákovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

Abstrakt	3
Prohlášení	4
Poděkování	5
Obsah	6
Úvod	7
1. Progresivní nekonvenční technologie dělení materiálů	8
1.1. Základní rozdělení nekonvenčních metod obrábění.....	8
2. Princip obrábění vodním paprskem	9
2.1. Zařízení pro obrábění vodním paprskem	11
2.2. Charakteristika obrábění AWJ.....	12
2.3. Vznik nástroje pro AWJ	13
2.3.1. Kapalina	13
2.3.2. Úprava a filtrace vody	13
2.3.3. Komprese.....	14
2.3.4. Rozvod vysokotlaké kapaliny	15
2.3.5. Vodní tryska	15
2.3.6. Generování abrazivního paprsku	16
2.3.7. Abrazivo	16
2.3.8. Zaostřovací trubice.....	17
2.4. Působení nástroje	18
2.4.1. Šíření paprsku mezi tryskou a materiálem	18
2.4.2. Interakce s materiálem.....	18
2.4.3. Útlum paprsku	21
3. Integrita povrchu obráběného AWJ technologií	22
3.1. Hodnocení povrchu	22
3.2. Parametry profilu povrchu	23
3.2.1. Drsnost povrchu	25
3.3. Trendy vedoucí k lepší kvalitě povrchu	26
3.4. Metody hodnocení povrchu	27
3.4.1. Mechanická metoda	28
3.4.2. Optické metody	29
3.4.3. Ostatní metody	29
4. Technologické faktory	30
4.1. Přímé faktory dělení	32
4.2. Hydraulické faktory.....	34
4.3. Směšovací faktory.....	34
4.3. Abrazivní faktory.....	35
Závěr	36
Seznam použitých zdrojů	37
Seznam použitých zkratk a symbolů	39

ÚVOD

Tato práce se zabývá studiem nekonvenční technologie řezání vodním paprskem s příměsí abraziva se zaměřením na oblast integrity vytvořeného povrchu a rozбором vlivu vybraných parametrů na výsledek rezného procesu.

Nekonvenční metody obrábění se používají v důsledku vývoje nových konstrukčních materiálů, které mají vysokou pevnost, tvrdost a houževnatost, a hlavně které lze standardními konvenčními metodami nevýhodně neekonomicky nebo složitě obrábět. Nekonvenční metody využívají především energetického úběru materiálu použitím čistě chemické, elektrochemické nebo tepelné reakce. Do nekonvenčních metod lze také zařadit řezání hydroabrazivním paprskem (AWJ – Abrasive water jet).

Zařízení pro řezání vodním paprskem je v současné době řazeno mezi nejflexibilnější řezací obráběcí stroje a paletu možných využití doplňují stále nové oblasti. Metoda řezání vysokotlakým vodním paprskem je moderní přesnou technologií pro dělení materiálů jako (kov, plast, pryž, sklo, kámen, keramika atd.). Tato technologie byla vyvíjena od přelomu sedmdesátých a osmdesátých let. Od té doby se tato výrobní technologie prudce rozrůstá do všech oblastí průmyslu, jelikož nabízí celou řadu výhod zejména pak vysokorychlostní kapalinový paprsek s přísadou silně abrazivních látek. Vysoká rychlost vytékajícího proudu vody s příměsí abraziva umožňuje obrábět intenzivně, ekonomicky a přitom ekologicky. Jde tedy o velmi aktuální technologii právě pro její univerzálnost, ekologičnost a bezpečnost.

Do procesu hydroabrazivního dělení zasahuje také celá řada faktorů, které ovlivňují nejen výslednou kvalitu povrchu dělicích stěn, ale také celkovou efektivitu úběru materiálu dělicího procesu. Faktory ovlivňující rezný proces obecně dělíme na přímé a nepřímé. Přímé faktory generují topografii plochy řezu. Nepřímé faktory ovlivňují především kvalitu a energetickou účinnost výchozího nástroje. Nepřímé faktory jsou to hydraulické, směšovací a abrazivní

1. Progresivní nekonvenční technologie dělení materiálů

Dělení materiálů patří mezi základní technologické operace obrábění. Rozdělujeme je mezi *konvenční* a *nekonvenční*. Mezi nejpoužívanější konvenční procesy dělení materiálů můžeme zahrnout rozřezávání (rozbrušovacím kotoučem, pilovým lisem), stříhání, lámání a další. U nekonvenčních metod obrábění se nepoužívá standardní rezný nástroj, u kterého můžeme definovat pracovní části nebo nástrojové úhly a při obrábění se netvoří třísky jako u standardních metod obrábění (soustružení, frézování, vrtání atd.), protože u progresivních technologií dochází především k mechanickým, elektrickým, tepelným a chemickým procesům, které se využívají k úběru materiálu. Nekonvenční metody obrábění se používají v důsledku vývoje a používání nových konstrukčních materiálů s vysokou pevností, tvrdostí a houževnatostí, které nelze standardními metodami hospodárně obrábět (titanové slitiny, keramika, superslitiny, slinuté karbidy, plastické hmoty, silikony atd.). (1,8,9)

1.1. Základní rozdělení nekonvenčních metod obrábění

Nekonvenční metody obrábění lze dělit z různých hledisek, ale nejvíce užívané a nejrozšířenější dělení nekonvenčních metod je z hlediska hlavního energetického úběru materiálu. Z tohoto hlediska je možné metody rozdělit do následujících hledisek:

- elektrochemické a elektrické,
- chemické,
- tepelné a elektrotepelné,
- mechanické. (1,8)

Mezi mechanické metody patří například obrábění hydrodynamickým a hydroabrazivním paprskem (WJM,AWJ), obrábění ultrazvukem (USM). Mezi chemické metody můžeme zařadit chemické nebo fotochemické leptání (CM,PCM). Ve skupině metod elektrických a elektrochemických jsou procesy využívající elektrolýzu jako například elektrochemické obrábění nebo broušení (ECM,ECG). Skupina tepelných a elektrotepelných metod zahrnuje obrábění laserem (LBC), plazmou (PAM), elektrojiskrové obrábění (EDM), nebo také svazkem elektronů (EBM). Toto je pouze stručný výčet metod, kterých je mnohem více. (1,4)

2. Princip obrábění vodním paprskem

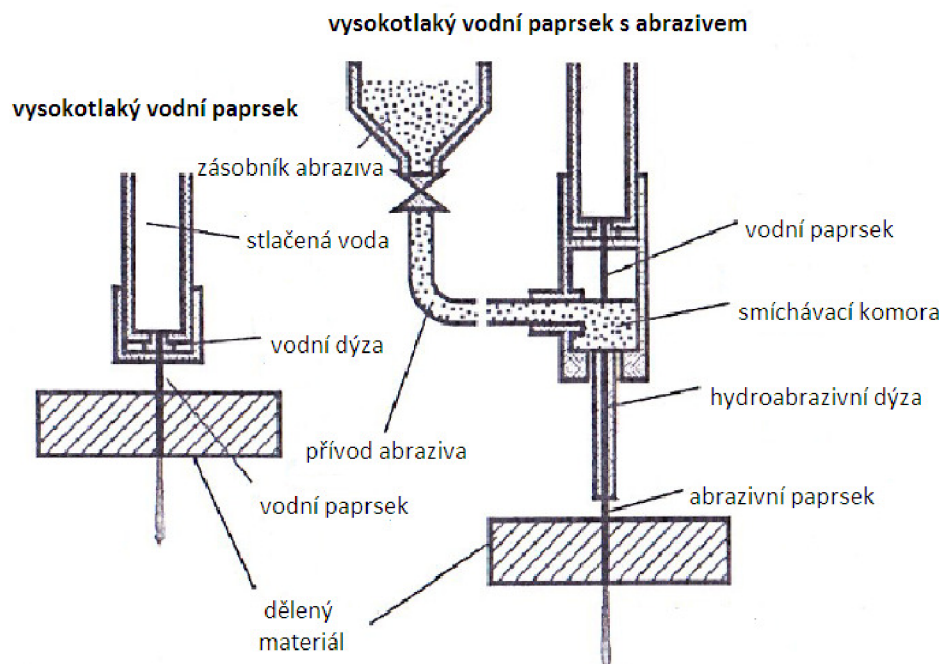
Obrábění vodním paprskem nebo také hydrodynamické obrábění využívá mechanicko – fyzikální podstatu úběru materiálu. Jako řezný nástroj je použit paprsek vody o velké rychlosti ($600 - 900 \text{ m s}^{-1}$) a pracovního tlaku ($400 - 690 \text{ MPa}$ v závislosti na strojním zařízení), který protéká tryskou malého průměru a tím získává velmi vysokou kinetickou energii. Čistý vodní paprsek je nejlépe využitelný na řezání nekovových materiálů jako (plasty, dřevo, papír, textil atd.).

V případě, že do vodního paprsku je přidán abrazivní materiál, tak se mechanický účinek při řezání znásobuje a tudíž je možné tuto metodu použít i pro řezání velmi tvrdých a houževnatých materiálů jako (slitiny, sklo, železné i neželezné kovy).

Hydroabrazivní paprsek odebírá materiál vysokorychlostním erozivním procesem, v důsledku použití abrazivních částic v toku usměrněného do úzkého paprsku. Pracovní tlak je u hydroabrazivního obrábění nižší než u čistého vodního paprsku ($60 - 400 \text{ MPa}$). (2,6)

V praxi používáme k dělení materiálu především 2 typy řezání, která z hlediska použití pracovního média dělíme na:

- WJM – Water Jet Machining (obrábění vodním paprskem nebo také hydrodynamické obrábění),
- AWJ – Abrasive Water Jet Machining (obrábění vodním paprskem s příměsí abraziva nebo také hydroabrazivní obrábění). (2)



Obr.2.1 Zjednodušený model technologie WJM a AWJ (1)

Výhody technologie řezání vodním paprskem:

- vysoká rychlost řezání a energetická účinnost,
- v místě úběru částic není materiál tepelně ovlivněný,
- studený řez umožňuje řezat materiály citlivé na teplo,
- minimální deformační napětí,
- úzký řez i u materiálů větších tlouštěk lze klást dílce vedle sebe, což přináší úsporu materiálu ,
- v kvalitnějším řezu většinou již není nutné žádné další opracování,
- proces je bezprašný a nevznikají žádné plyny nebo páry,
- tvarové omezení řezu je dáno pouze kruhovitým průřezem paprsku je tedy možno řezat i velice detailní kontury,
- zařízení je flexibilní ,
- jakost obrobené plochy je dobrá i při více násobných řezech,
- úběr materiálu závisí na mechanických vlastnostech materiálu (tvrdosti, pevnosti apod.) jen minimálně,
- při řezu se neporuší ani případná povrchová úprava jako leštění broušení a jiné,
- minimální silové působení paprsku na dělený materiál tedy nedochází ke vzniku mikrotrhlin ,
- možnost řezu jakýchkoli materiálů včetně kovů a slitin i kalených či jinak modifikovaných, těžko opracovatelné materiály (sklolamináty, sklo, gumotextil), pryže, plasty apod.(2,6,8)

Nevýhody technologie řezání vodním paprskem:

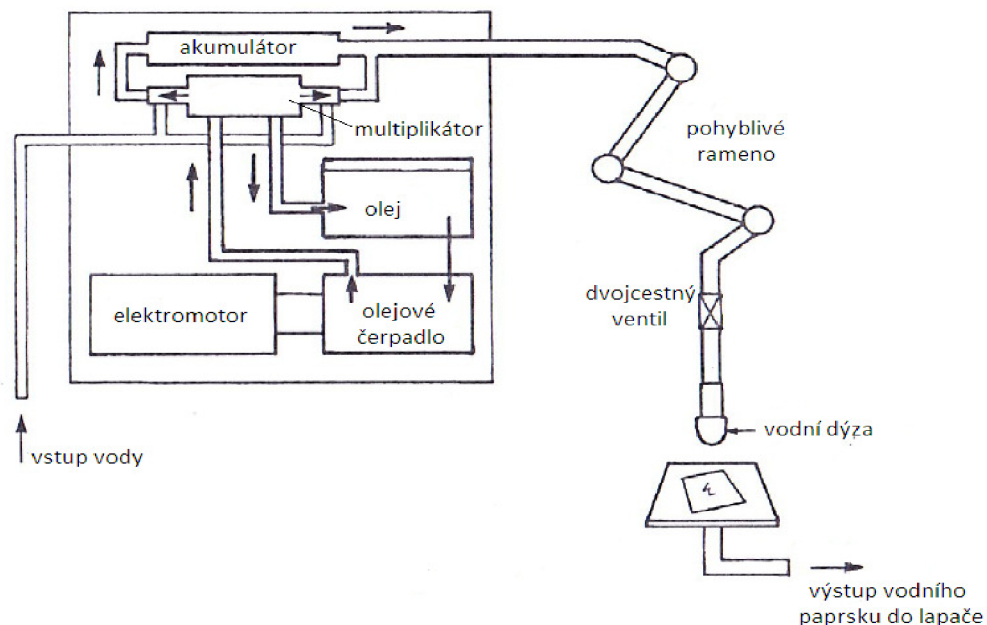
- kontakt s vodou a při AWJ i s abrazivním materiálem (nutnost ošetření ploch kvůli povrchové korozi u nasákavých materiálů delší doba vysoušení, možná změna barvy, znečištění apod.),
- při horších kvalitativních stupních řezu u silnějších materiálů dochází k výběhu paprsku (deformaci kontury řezu ve spodní hraně materiálu),
- vysoká hlučnost,
- omezená možnost výroby malých dílců – možno řešit můstky.(2,6)



Obr.2.2 Použití můstků při řezání drobných dílců z nerezi tl. 9 [mm] (6)

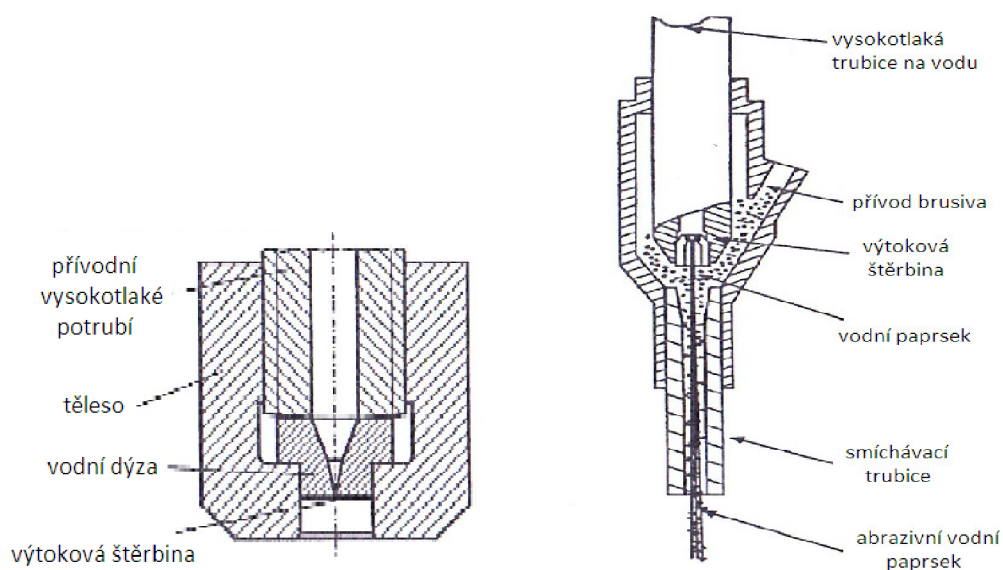
2.1. Zařízení pro obrábění vodním paprskem

Hlavní prvky zařízení pro řezání vodním paprskem jsou hydraulická jednotka s čerpadlem a multiplikátorem (násobičem tlaku), filtry, potrubí na rozvod vody, ventily, dýza, nádoba na zachytávání vody (lapač vody), přísady na úpravu vody.(1,8)



Obr.2.3 Hlavní komponenty zařízení (1)

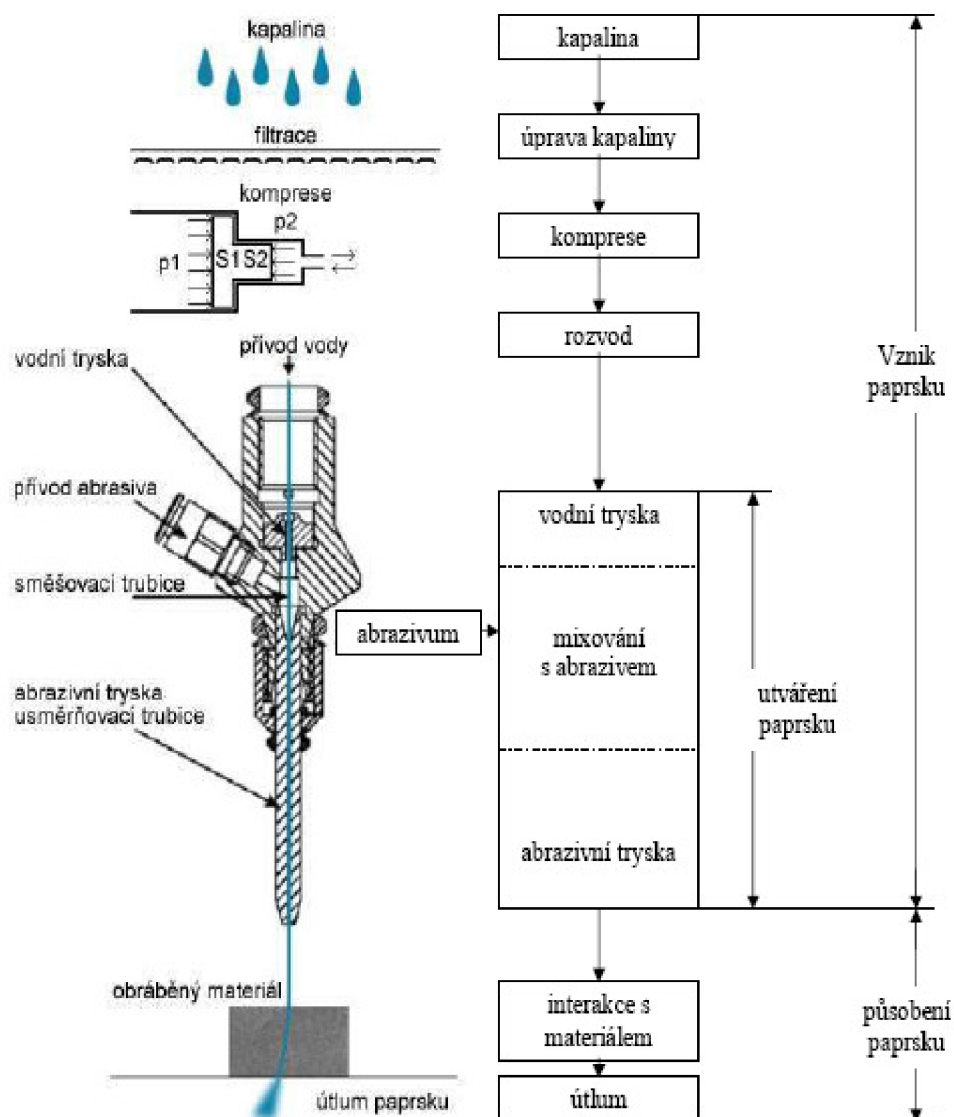
Rozdíl v zařízení pro hydrodynamické a hydroabrazivní řezání je v konstrukci vodní dýzy. Pro AWJ je dýza navržena tak, aby přes různé mechanismy bylo přidáno jemné brusivo do proudu vody. (1)



Obr.2.4 Příklad konstrukce dýzy pro WJM a AWJ. (1)

2.2. Charakteristika technologie AWJ

Na schematicém Obr.2.5 jsou vyznačeny hlavní oblasti vzniku, utváření a působení nástroje na obráběný materiál. (5)



Obr.2.5 Schéma vzniku utváření a působení nástroje (5)

Jednotlivé etapy vzniku, utváření a působení hydroabrazivního paprsku na obráběný materiál jsou popsány v následující kapitole.

2.3. Vznik nástroje pro AWJ

2.3.1. Kapalina

Základním faktorem ovlivňující efektivnost technologie je správný výběr druhu pracovní kapaliny, která musí splňovat určité požadavky jako např.:

- nízká viskozita (ta zabezpečí malé ztráty výkonu toku kapaliny při průchodu hadicemi, potrubím apod.),
- dobrou přístupnost a nízkou cenu,
- minimální ovlivnění korozi (kovových částí zařízení),
- schopnost zabezpečit nejlepší jakost obrábění při nejmenších energetických ztrátách na formování paprsku. (9)

Tyto uvedené požadavky nejlépe splňuje voda, která je nejdostupnější, nejlevnější a je ekologická. Přitom ale její kvalita a vlastnosti velmi ovlivňují životnost vodní trysky a součástek multiplikátoru. Voda by měla splňovat zejména tyto požadavky:

- kyselost PH v rozmezí 6-8,
- nízká tvrdost vody (nízký obsah rozpuštěných pevných částic jako např. Ca, CaO, Mg, MgO, Fe, Mn, Si a další). (4)

Pokud voda neodpovídá určitým požadavkům, je třeba ji před použitím podrobit úpravám tak aby byla vyhovující. (4)

2.3.2. Úprava a filtrace kapaliny

Správná filtrace vstupní kapaliny je hlavním předpokladem pro dlouhodobý chod zařízení. V kapalině jsou přítomny pevné částice, které urychlují opotřebením zařízení (stěny trubek nebo válců), ucpávají ventily nebo v kontaktu s těsněním omezují jeho správnou funkci. Způsob úpravy vody je závislý od kvality používané vody. Voda je nejprve filtrována pomocí filtrů vyrobených z bavlny nebo syntetických vláken. Tyto filtry zabrání průstupu nečistot až do velikosti 0,5 μm . Pokud i po filtraci je obsah rozpuštěných pevných látek příliš vysoký, následují další procesy úprav vody jako je změkčování nebo deionizace vody. (1,4)

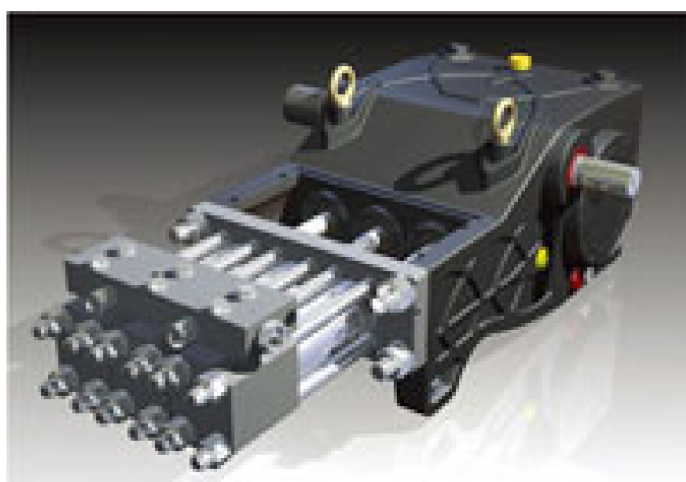


Obr.2.6 Vodní filtry (7)

2.3.3. Kompresce

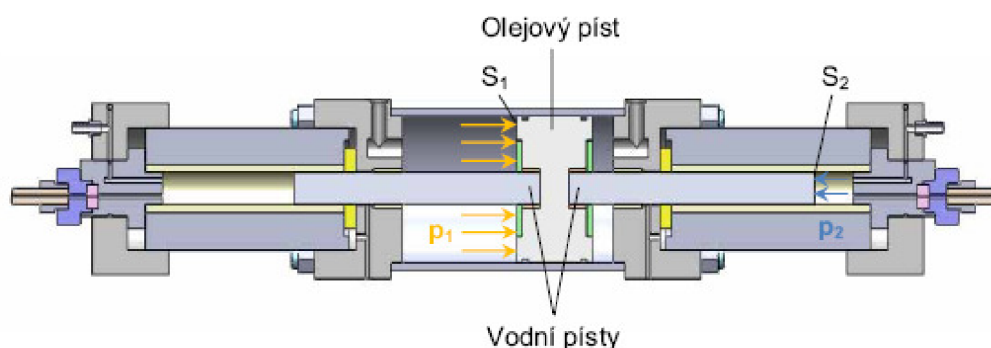
Vytvoření paprsku s vysokou řeznou účinností je úlohou tlakového systému zařízení, který plynule generuje tlak kapaliny. K tomuto účelu se používají dva druhy zařízení generující vysokotlaký vodní paprsek a to plunžrová a multiplikátorová čerpadla. (4)

Plunžrová čerpadla – jsou vývojově starší. Dříve se používaly převážně k odstraňování nečistot a starých nátěrů z různých povrchů, k sanaci betonových konstrukcí atd. Pracovní tlak kapaliny nepřevyšoval 200 MPa, ale v současnosti plunžrová čerpadla dosahují pracovního tlaku až 350 MPa, což umožňuje jejich použití také pro dělení materiálů. (4,9)



Obr.2.7 Plunžrové čerpadlo (4)

Multiplikátorová čerpadla – tato čerpadla byla vyvinuta speciálně pro účely řezání a vyvíjí tlak kapaliny 300 – 700 MPa. Využívají tzv. multiplikátor což je zařízení ke znásobení tlaku. Činnost zařízení je založena na rovnováze sil působících na odlišně velké plochy diferenciálního pístu. Zesílení tlaku je dáno poměrem ploch dvou spojených pístů v hydraulickém okruhu. (4,9)



Obr.2.8 Multiplikátor (4)

2.3.4. Rozvod vysokotlaké kapaliny

Stlačená kapalina je přivedena přes vysokotlaké potrubí k řezací hlavě, která je umístěná na portálu stolu. Na výrobu potrubí a armatur pro rozvod vysokotlaké kapaliny se používají nejčastěji vysokopecní nerezové materiály. Konstrukce potrubí je přizpůsobeno pohybům řezací hlavy. (1,9)

2.3.5. Vodní tryska

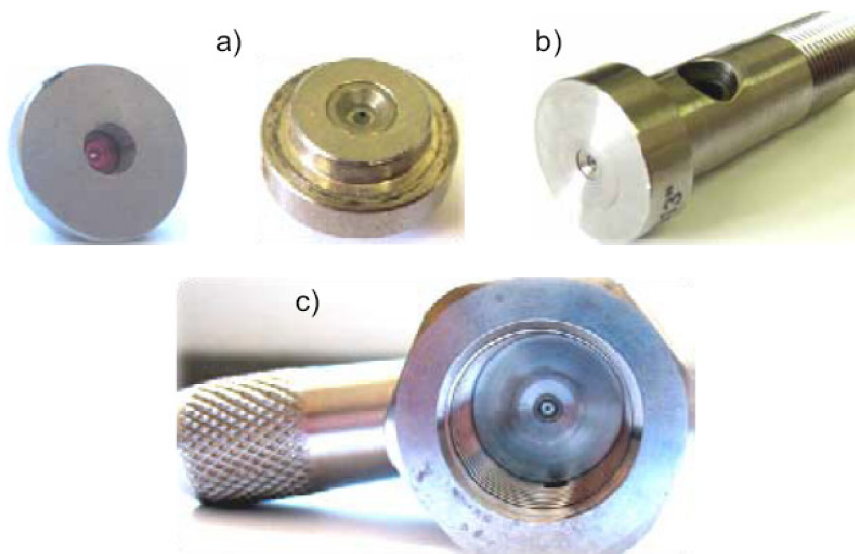
Vodní tryska je umístěna na vstupu do řezací hlavy. Vodní tryska vytváří a formuje vodní paprsek a současně zvyšuje výtokovou rychlost proudící kapaliny. Při průchodu kapaliny tryskou dochází k přeměně potenciální energie kapaliny na dynamickou (kinetickou) energii vodního paprsku. Kvalita a způsob této transformace mají zásadní vliv na celkovou účinnost nástroje. Úroveň přeměny potenciální energie na kinetickou závisí především na kvalitě opracování dýzy vodní trysky a její životnosti.

Vodní trysky se využívají pro oba typy řezných hlavic tedy jak pro dělení hydrodynamickým paprskem tak pro hydroabrazivní dělení materiálů.

Materiál ze kterého jsou trysky vyrobeny je rozdílný. Závisí především na požadovaném tlaku. Pro nižší pracovní tlaky asi do 150 MPa se používají trysky kovové, po případě ze slinutých karbidů. Trysky pro tlaky do 250 MPa z keramiky a pro vyšší pracovní tlaky nad 250 MPa potom ze safíru rubínu nebo polykrystalického diamantu, ale jde pouze o malý „korálek“ materiálu vetknutý do pouzdra, vyměnitelné vložky nebo přímo do těla řezací hlavy.

Trysky se vyrábějí v různých průměrech, tedy lze použít vhodnou trysku s využitím různé energie proudu a tedy můžeme z jednoho tlakového zdroje napájet současně více trysek.

Životnost vodní trysky především závisí na druhu materiálu ze kterého je tryska vyrobena, na kvalitě vody proudící tryskou a na pracovním tlaku kapaliny. (1,4,9)



Obr.2.9 a) safírová a diamantová vodní tryska v montážním lůžku, b) diamantová tryska ve vyměnitelné vložce, c) diamantová tryska vetknutá v těle řezací hlavy. (4)

2.3.6. Generování abrazivního paprsku

Mísení abraziva s čistým vodním paprskem je složitý proces, který probíhá v tzv. směšovací komoře, umístěné uvnitř řezací hlavy a pokračuje v abrazivní trysce. Směšovací komora má svůj specifický tvar i velikost. Kapalinový paprsek do ní vstupuje rychlostí řádově stovek $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ a v komoře dochází k podtlaku, kterým je přisáváno spolu se vzduchem abrazivo ze zásobníku do komory, kde dojde ke smísení s čistým paprskem. Abrazivní částice jsou vlivem předávání kinetické energie čistého paprsku urychlovány a po průchodu do tzv. zaostřovací trubice vytvářejí abrazivní kapalinový paprsek. (9)

2.3.7. Abrazivo

Bez použití abraziva by nebylo možné řezat tvrdší materiály, protože částičky abraziva přimísené do vodního paprsku zvyšují jeho mechanický účinek. (1)



Obr.2.10 Koncentrát připravený z granátu almanidu (3)

Výběr správného abraziva je velmi důležitý, jelikož náklady na něj jsou největší položkou při dělení AWJ. Při výběru vhodného druhu abraziva musíme nejprve zvážit některé faktory a to zejména:

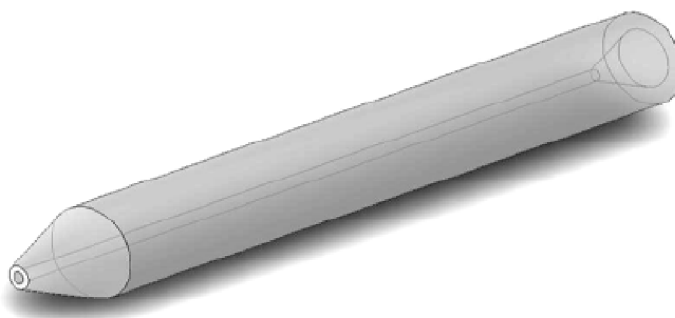
- Cena abraziva – náklady na abrazivo představují značnou část celkových provozních nákladů.
- Tvrdość abraziva - je dána jeho chemickým složením a mechanicko – fyzikálními vlastnostmi. Tvrdší abraziva mají vyšší účinnost při dělení materiálů, ale způsobují rychlejší opotřebení hydroabrazivní trubice.

- Velikost abrazivních zrn – při řezání s většími částicemi dochází ke zhoršení jakosti povrchu, ale zkrátí se čas potřebný k prořezání materiálu.
- Tvar abrazivních zrn – ovlivňuje jakost obrobeného povrchu i dosahovanou hloubku řezu. Zrna se vyznačují svou kruhovitostí a kulatostí. Kulatějšími zrny docílíme menší drsnost povrchu na úkor hloubky řezu.
- Hmotnostní tok abraziva – se zvyšujícím se hmotnostním tokem se zvyšuje kinetická energie paprsku a tudíž i dosahovaná hloubka řezu. Při překročení kritického hmotnostního toku abraziva dosahovaná hloubka řezu klesá a může dojít i k ucpání hydroabrazivní trubice.
- Ekologičnost abraziva – užívaná abraziva by měla splňovat požadavky zdravotní a ekologické nezávadnosti.
- Recyklovatelnost – možnost opětovného využití abraziva (jeho části), které již bylo používáno. (1,3,8,9)

Abraziva, která nejlépe splňují tyto faktory se v praxi nejčastěji používají a ve větších výrobcích se také recyklují. Jedná se převážně o granátová abraziva a olivínové písky. (8)

2.3.8. Zaostřovací trubice

Zaostřovací trubicí prochází hydroabrazivní paprsek do místa dělicího řezu. Při průchodu trubicí se vytváří koherentní vodní paprsek, který tvoří směs kapaliny, vzduchu a abrazivních částic. Vlastnosti vystupujícího abrazivního paprsku určují průměr a délka zaostřovací trubice. (4,9)



Obr.2.11 Zaostřovací trubice (4)

Základním požadavkem při výrobě směšovací trubice je vysoká míra otěruvzdornosti. Trubice jsou vyráběny práškovou metalurgií a liší se délkou, vnitřním i vnějším průměrem a materiálem. I přes velkou materiálovou odolnost trubice postupem času dochází vlivem směsi vody, vzduchu a abraziva k jejímu opotřebení. To se projevuje nesoudržností vystupujícího paprsku. (9)

Tab.2.1 Životnost směšovací trubice (9)

Materiál	Životnost	Popis
Standardní karpid wolframu	4-6	Nízká výkonnost a poměr cena/hodina. Mají tendenci k mimosovému opotřebení. Požadují velmi častou výměnu.
Levný kompozitní karpid	35-60	Vhodné pro hrubé dělení materiálů.
Střední životnost kompozitní karpid	80-90	Vhodné pro všechny druhy aplikací dělení materiálů.
Premium kompozitní karpid	100-150	Nejlepší vlastnosti, vykazuje předvídatelné osově opotřebení. Vhodné pro přesné řízení i každodenní práce.

2.4. Působení nástroje

2.4.1. Šíření paprsku mezi tryskou a materiálem

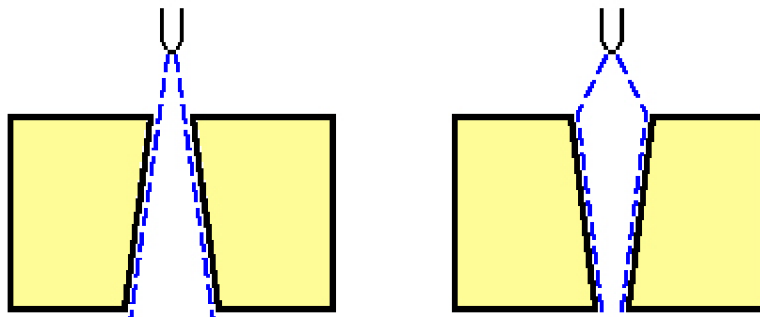
Ihned po výstupu paprsku ze zaostřovací (hydroabrazivní) trubice abrazivní paprsek ztrácí svou kinetickou energii v důsledku kontaktu s okolním vzduchem. Paprsek se částečně rozděluje na vnitřní jádro a vnější obal. Jádro paprsku si zachovává svou koherenci téměř až do kontaktu s materiálem, ale vnější obal ztrácí svou rychlost a oddělují se od něj jednotlivé kapky vody a částičky abraziva a vychylují se z původního směru v závislosti na výtokové rychlosti paprsku. Toto vychýlení může narušovat vrchní řezné hrany obrobku a z toho důvodu se neustále vyvíjí snaha minimalizovat vzdálenost mezi výstupem paprsku ze zaostřovací trubice a děleným materiálem. (9,10)

2.4.2. Interakce s materiálem

Technologie dělení materiálu hydroabrazivním paprskem je erozivní proces. Zahrnuje 2 různé mechanismy eroze v závislosti na vlastnostech materiálu jestli je křehký nebo tvárný. Křehká eroze se popisuje jako lámání. Materiál je odebírán tvorbou, množením a protínáním prasklin, které vznikají okolo abrazivních částic. Tvárná eroze se definuje jako proces řezání. Částice materiálu jsou postupně odřezávány nebo odlupovány zrnkami abraziva. Ve skutečnosti je řezání AWJ technologií kombinací těchto dvou mechanismů opotřebení jen nepůsobí jednotlivě, ale v různých kombinacích.

Výsledkem působení těchto mechanismů vzniká řezná spára, jejíž tvar, geometrie a velikost závisí na vstupních hodnotách parametrů. Na výsledný tvar a velikost řezné spáry mají především vliv posunová rychlost a vzdálenost hydroabrazivní trubice od obrobku. Při nižších posuvech dochází k vychylování abrazivních částic z přímého směru dopadu a ty pak naráží do

děleného materiálu mimo hlavní oblast směru a tím rozšiřují spáru do tvaru kužele. Při zvýšení rychlosti posuvu se naopak dochází k rozšíření řezné spáry do tvaru „V“ z důvodu, že paprsek nesetrvává dostatečně dlouho na jednom místě. (4,9,23,25)

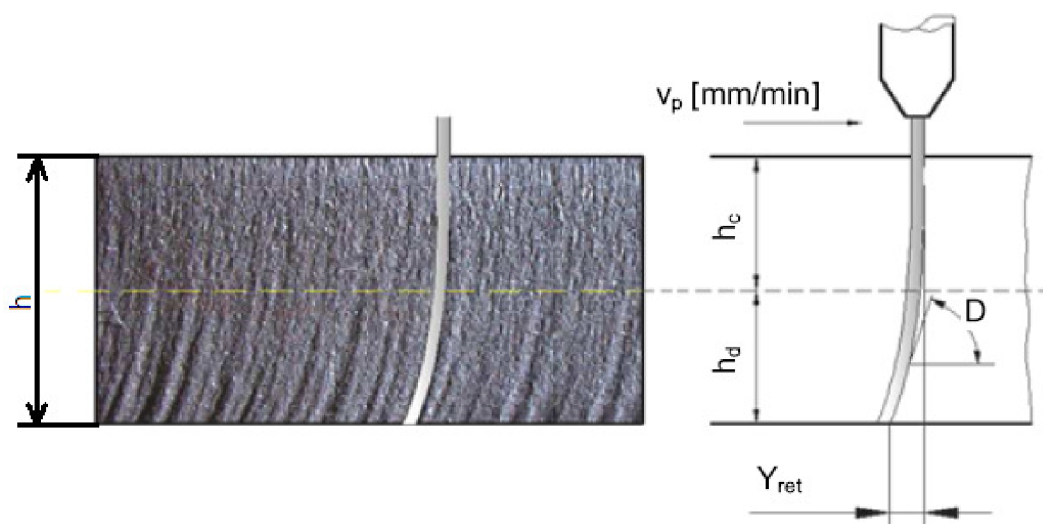


Obr.2.12 Řezné spáry (5)

Na výslednou deformaci obrobeného povrchu má vliv:

- velikost a tvar abrazivních částic,
- pohybová (kinetická) energie abrazivních částic,
- úhel dopadu abrazivních částic,
- vlastnosti materiálu abrazivních částic,
- vlastnosti obráběného materiálu. (9)

Na povrchu dělicích stěn řezné spáry vzniká v důsledku působení těchto mechanismů povrch, který můžeme rozdělit do dvou charakteristických částí. Horní část dělicího řezu, kterou určujeme jako *hladkou zónu* a spodní část *rýhovanou zónu*. Rýhování ve spodní části obrobku je způsobeno ztrátou kinetické energie paprsku a jeho vychylováním. (1,9,11)



Obr.2.13 Povrch obrobený hydroabrazivním paprskem s vyznačením horní hladké zóny - (h_c), spodní rýhované zóny - (h_d), velikosti váznutí (retardace) paprsku - Y_{ret} a deviačního úhlu - D . (4)

Dle Hashishe je možné pomocí empirických vztahů spočítat tyto zóny, ale mnoho veličin je buď obtížné, nebo nemožné je určit. Ve vzorcích také nejsou obsaženy všechny procesní vlivy řezání, tudíž vypočtená hodnota se může značně lišit od skutečné. (5)

Vztah pro velikost horní hladké části – h_c (5)

$$h_c = \frac{\frac{V_a}{C_k} d_a}{\left(\frac{\pi \rho_p v_p d_a^2}{14 m_a}\right)^{\frac{2}{5}} + \frac{v_e}{C_k}} \quad (2.1)$$

Kde je : v_a - rychlost pohybu abrazivních částic [$m \cdot s^{-1}$],
 C_k - koeficient charakteristické rychlosti [1],
 d_a - průměr hydroabrazivní trubice [m],
 ρ_p - hustota abrazivního materiálu [$kg \cdot m^{-3}$],
 v_p - rychlost posuvu řezné hlavy [$m \cdot s^{-1}$],
 m_a - hmotnostní tok abraziva [$kg \cdot s^{-1}$],
 v_e - kritická rychlost abrazivních částic [$m \cdot s^{-1}$].

Vztah pro velikost spodní rýhované části - h_d (5)

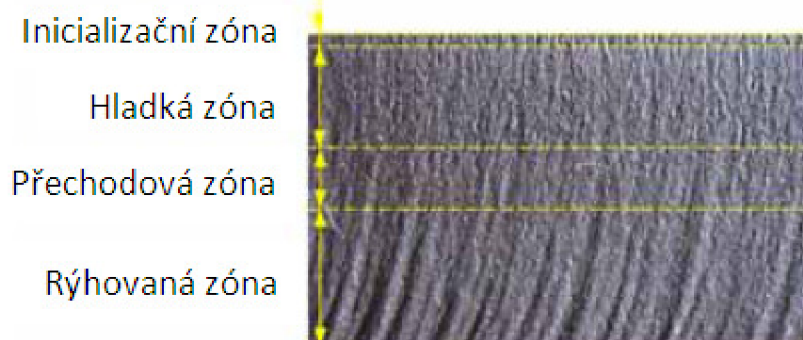
$$h_d = \frac{1}{\frac{\pi d_a \sigma_{kl} v_p}{2 C_1 m_a (v_a - v_e)^2} + \frac{C_f}{d_a} \frac{v_a}{(v_a - v_e)}} \quad (2.2)$$

kde je: σ_{kl} - mez kluzu řezaného materiálu [Mpa],
 C_1 - koeficient druhu řezaného materiálu [1],
 C_f - koeficient odporu stěny materiálu [1].

Celková délka dělicího řezu h lze stanovit sečtením jednotlivých velikostí spočtených zón.

$$h = h_c + h_d \quad (2.3)$$

Vzhledem k neustálému výzkumu a vývoji hydroabrazivního dělení materiálů došlo v posledních letech k vyčlenění nejvrchnější části hladké zóny v samostatnou oblast – *inicializační zónu*. Dochází v ní k prvnímu kontaktu hydroabrazivního paprsku s materiálem a její tvar a geometrie ovlivňuje další šíření paprsku s obrobkem. V inicializační zóně dochází k řeznému opotřebením při malých stykových úhlech, zatím co v hladké zóně při velkých stykových úhlech. Přerozdělením hladké a rýhované oblasti získáme další – *přechodovou zónu*. V přechodové zóně dochází ke změně z řezného opotřebením na deformační. V dnešní době tedy dělíme povrch vytvořený hydroabrazivním paprskem na 4 odlišné zóny. (4,9)



Obr.2.14 Vyznačení Inicializační, Hladké, Přejchodové a Rýhované zóny. (4)

2.4.3. Útlum paprsku

Útlum paprsku probíhá v lapači vody a odpadu. Jedná se o nádrž, která je naplněná vodou, má stanovenou minimální výšku hladiny a není spojena s konstrukcí stolu. Výška vody je stanovena od maximálního pracovního tlaku zařízení. (1,9)



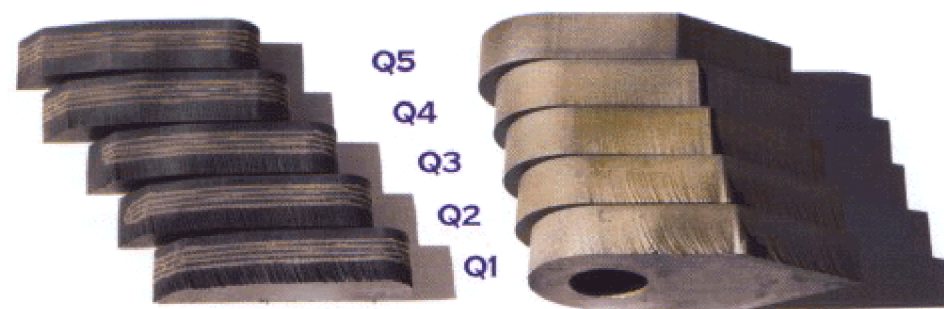
Obr.2.15 Kompaktní stůl s lapačem vody firmy PTV s.r.o. (7)

3. Integrita povrchu obráběného AWJ technologií

3.1. Hodnocení povrchu

Zkoumání integrity povrchu je velmi významné, jelikož v současné době jsou kladeny vysoké požadavky na jakost povrchu.

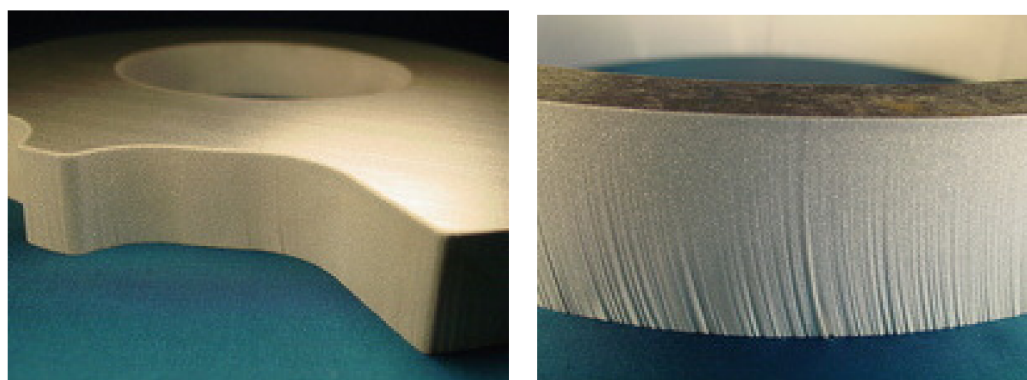
Normy pro hodnocení topografie povrchu doposud nebyly zavedeny ani sestaveny. Všeobecně se již řadu let uznává rozdělení dosahovaných kvalit řezu do hodnot Q1 až Q5. Přičemž hodnota Q1 je definována jako nejhorší a Q5 jako nejlepší. (5,9)



Obr.3.1 Příklady řezu (6)

Většina firem toto značení používá, ale přece jen se u nich stupně kvality trochu liší a to především ze dvou důvodů:

- Nikde není definován rozsah ani specifikace jednotlivých parametrů přesnosti a drsnosti povrchu, a tak si každá společnost určuje vlastní dle svých normativů a provedených zkoušek.
- Společnosti se svým zařízením dodávají také kalkulační vlastní software, který vypočítává jednotlivé stupně kvality. Určující parametry, které vstupují do řezného procesu mají vliv na kvalitu řezu. (4,5)



Obr.3.2 příklad řezu kvalitativního stupně Q4 (vlevo) a Q2 (vpravo) (6)

Tab 3.1. Popis stupňů kvality řezu popsany firmou CHPS s.r.o. (6)

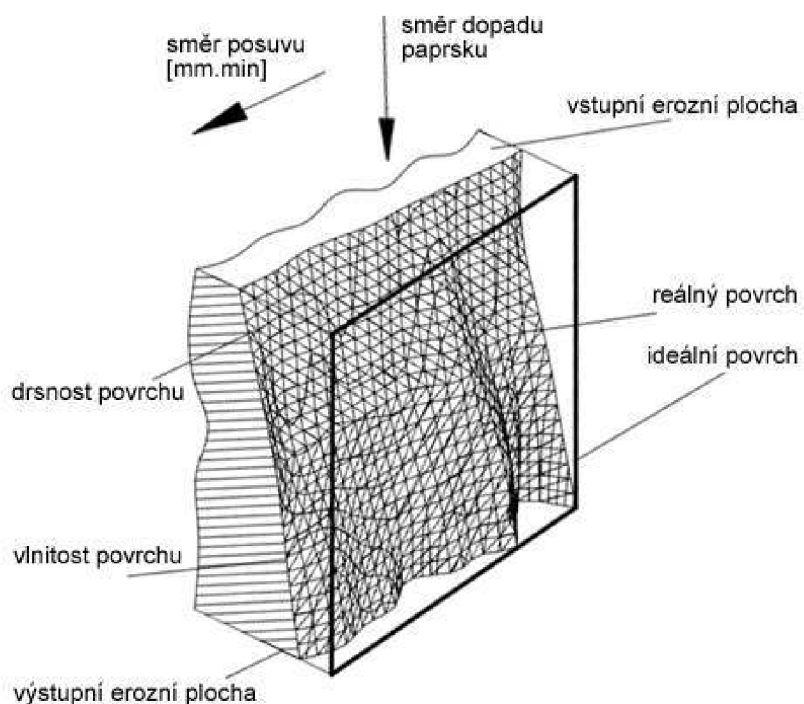
Kvalitativní stupeň	Popis	Drsnost Ra v horní kontuře	Drsnost Ra ve spodní kontuře	Tvarová přesnost [mm] v horní kontuře	Tvarová přesnost [mm] ve spodní kontuře	Úkos
Q5	Nejlepší řez	pod 3,2	pod 3,2	+/- 0,1	+/- 0,1	Většinou mírný podřez
Q4	Kvalitní řez	pod 3,2	cca 6,3	+/- 0,1	+/- 0,2	Většinou minimální
Q3	Střední řez	cca 4,0	do 12,5	+/- 0,15	Dle typu a síly materiálu	Dle typu a síly materiálu
Q2	Hrubí řez	cca 4,0	do 25	+/- 0,2	Dle typu a síly materiálu	Dle typu a síly materiálu
Q1	Dělicí řez	4,0-6,3	do 40	+/- 0,2	Výrazně nepřesné	Výrazný úkos do +

3.2. Parametry profilu povrchu

Povrchy vytvořené AWJ technologií jsou odlišné od povrchů vytvořených konvenčními metodami hlavně z geometrického hlediska. Mají především hrubší a členitější topografii povrchu. Jakost povrchu po AWJ se obecně zhoršuje s rostoucí vzdáleností od místa vstupu paprsku do obráběného materiálu. Hlavní geometrické parametry dělicí stěny jsou následující:

- drsnost povrchu R_a ,
- zpoždění (retardace) dělicí řezné stopy Y_{ret} ,
- úhel zakřivení (deviace) dělicí stopy δ ,
- hloubka dělicího řezu h .

Tyto parametry jsou nově využívány v analytických postupech. (9)

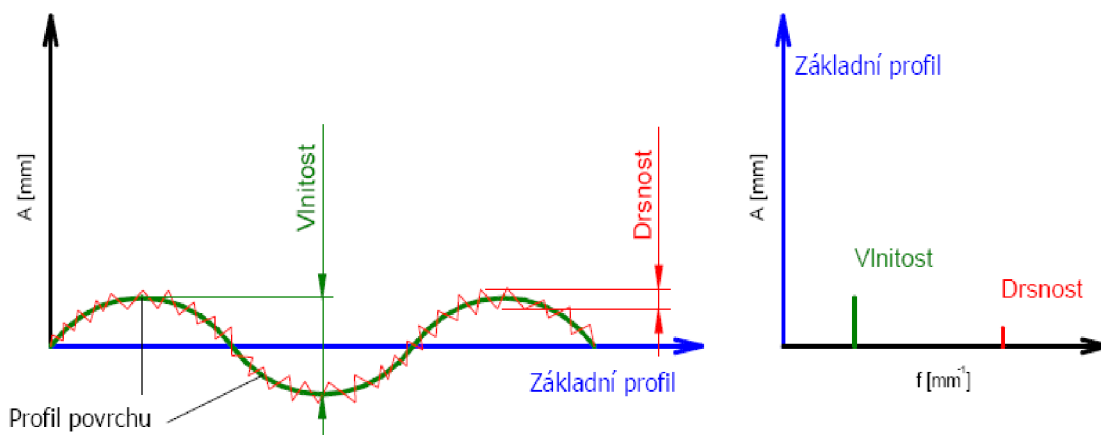


Obr.3.3 Model povrchu vytvořeného AWJ technologií (5)

Parametry profilu povrchu rozlišujeme podle normy ČSN EN ISO 4277 na:

- základní profil povrchu P
- profil vlnitost povrchu W
- profil drsnosti povrchu R

Můžeme říci, že základní profil povrchu je ideálně hladný povrch. Profil vlnitosti povrchu je charakterizován nízkými frekvencemi a vysokými amplitudami nerovností povrchu, zatím co profil drsnosti je opačný, tedy je charakterizován vysokými frekvencemi a nízkými amplitudami nerovností povrchu. Modelová situace je znázorněna na obr.3.4. (9,16)



Obr.3.4 Výškové fluktuační profilu povrchu vlevo a jeho amplitudofrekvenční spektrum vpravo (16)

3.2.1 Drsnost povrchu

Drsnost povrchu – R_a patří mezi hlavní geometrické parametry topografie hydroabrazivně dělených povrchů, mění se v závislosti na řezných parametrech při obrábění. Drsnost povrchu se mění lineárně s větší hloubkou řezu a zároveň se snižující se rychlostí posuvu je oblast hladké zóny větší. Nejvýraznější vliv na drsnost obrobené plochy je přisuzován velikosti rychlosti posuvu, a však i po změně tlaku vodního paprsku můžeme sledovat lineární průběh drsnosti povrchu. Zvyšováním tlaku vody se také snižují vlnitost obráběného povrchu. Vyšší pracovní tlak urychluje úběr materiálu a vytváří hladší povrch materiálu.

Použití abrazivního materiálu má velký vliv na drsnost povrchu. Pro jemné opracování materiálu je vhodná malá zrnitost abraziva a pro hrubší opracování a větší úběr materiálu naopak.

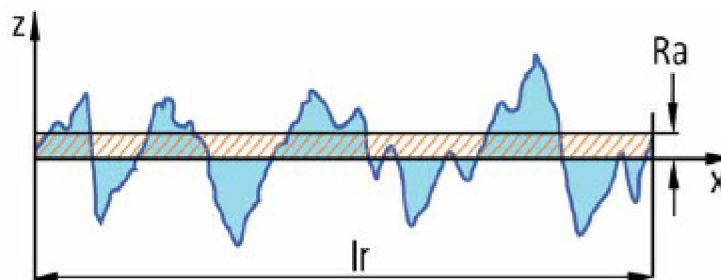
Mezi nejpoužívanější normované parametry pro hodnocení drsnosti povrchu obráběného AWJ technologií jsou: (5,9)

Průměrná aritmetická odchylka profilu R_a

Je to jedna z nejpoužívanějších charakteristik drsnosti povrchu ve strojírenské praxi. Je to střední aritmetická hodnota absolutních odchylek profilu v rozsahu základní délky. Je definována vztahem:

$$R_a = \frac{l}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx$$

kde je: l_r - měřená délka [m],
 $Z(x)$ - funkce popisující profil [1]. (9)



Obr.3.5 Průměrná aritmetická odchylka R_a (4)

Parametr R_a je pouze statistickou hodnotou, která udává střední hodnotu vzdáleností souřadnic jednotlivých bodů profilu zkoumaného povrchu od střední čáry. (4)

Průměrná kvadratická odchylka profilu R_q

Je kvadratickou analogií parametru drsnosti povrchu R_a . Je definována implicitním vztahem: (9)

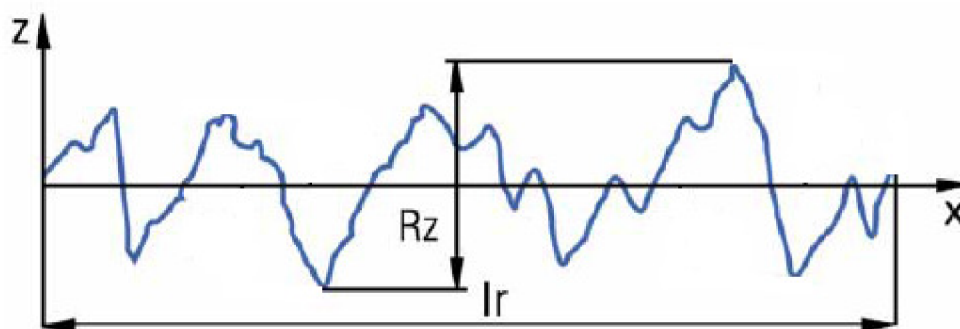
$$R_q = \sqrt{\frac{l}{l_r} \int_0^{l_r} Z^2(x) dx} \quad (3.2)$$

Největší výška nerovnosti profilu R_z

Je to výšková charakteristika drsnosti povrchu. Je to vzdálenost mezi nejvyšším výstupkem profilu a největší prohlubní profilu v rozsahu základní délky. Taktéž odráží časově-prostorový průběh nerovností povrchu. (9)

$$R_z = Z_p + Z_v, \quad (3.3)$$

Kde je: Z_p - výška největšího výstupku v rozsahu základní délky l_r [μm],
 Z_v - hloubka nejnižší prohlubně v rozsahu základní délky l_r [μm].



Obr.3.6 Největší výška nerovnosti R_z (4)

Drsnost povrchu je tedy dnes určována normou, která ale nevystihuje všechny důležité charakteristiky povrchu pro získání informací a jeho chování za provozu. Z hodnoty R_a nelze vyčíst jak výsledný povrch vytvořený určitou technologií vlastně vypadá. Je známo, že dva povrchy, které mají stejnou hodnotu R_a , mohou mít zcela rozdílné funkční vlastnosti. (4,9)

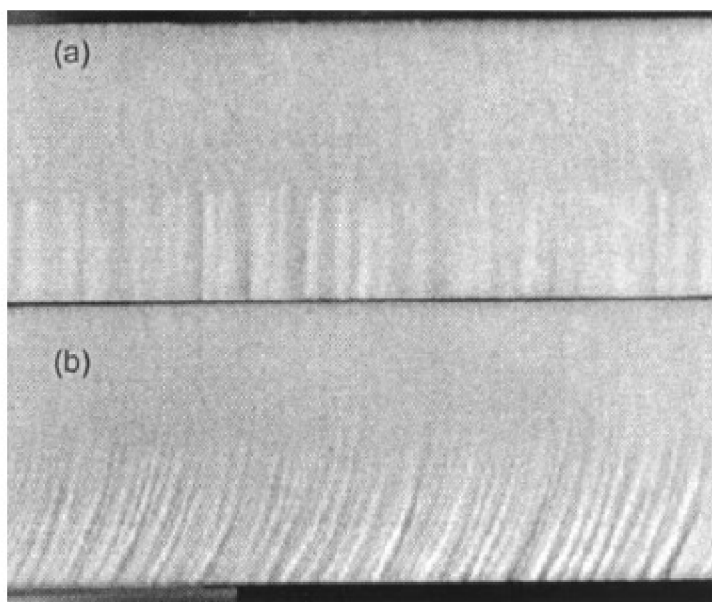
3.3. Trendy vedoucí k lepší kvalitě povrchu

U metody dělení materiálů hydroabrazivním paprskem jsou stejně jako v jiných oblastech průmyslu vyvíjeny snahy o zdokonalení výrobního procesu, efektivnosti a jeho výstupních charakteristik. To vše vede k dalším výzkumům vstupních parametrů a jejich závislostí, faktorů vstupujících do procesu dělení a také získávané geometrie rezných ploch a jejich topografie.

V dnešní době je geometrie do značné míry vyřešena, ale topografie plochy řezu je stále zkoumána. (4)

Oscilační řezání

Tato technika řezání byla vyvinuta v poslední dekádě 20. století za účelem zvýšení kvality řezaného povrchu obrobku. Oscilační řezání dokáže zvýšit hloubku hladké zóny h_c u keramických materiálů o více než 30%. V případě měkkých ocelí o více než 40% za totožných vstupních podmínek jako u klasického hydroabrazivního dělení. (4,11,13)



Obr.3.7 Srovnání povrchů keramiky vytvořených AWJ

- a) s oscilační řeznou hlavou
- b) bez oscilační řezné hlavy (11)

Výsledky experimentální studie ukazují, že při použití oscilační řezné hlavy lze redukovat deviační úhel striací až k nulové hodnotě a to nakloněním hlavy mezi 15 až 20 stupni od svislé osy v rovině řezu. Zároveň díky tomu dochází i ke snížení frekvence výskytu striací což znamená částečné vyhlazení rýhované zóny ve spodní části řezu a také ke zlepšení drsnosti a vlnitosti.

Při postupném zvyšování frekvence řezné hlavy bylo zjištěno, že se zvětšuje hloubka hladké zóny, ale pouze do určité hodnoty, kde po překročení její velikost opět klesá. Dále bylo dokázáno, že při zvyšující se rychlosti posuvu je nutné zvyšovat i oscilační frekvenci. (4,11)

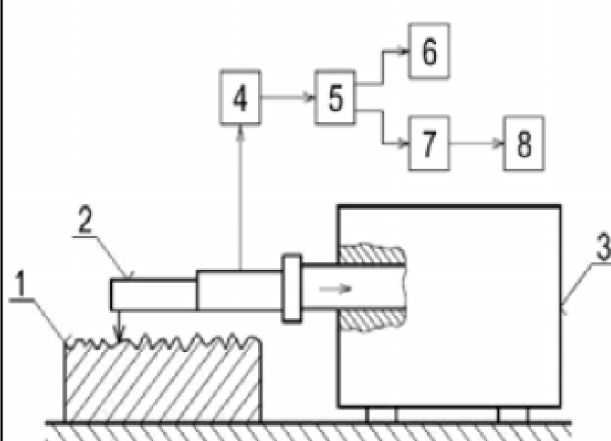
3.4. Metody hodnocení povrchu.

V dnešní době lze hodnotit topografii povrchu různými metodami. Každá z nich má své výhody a nevýhody. Zjednodušeně lze rozdělit metody hodnocení topografie povrchu do třech základních skupin:

- metody mechanické,
- metody optické,
- jiné metody. (9)

3.4.1. Mechanická metoda

Mechanické metody, též nazývané jako dotykové metody patří v současnosti mezi nejrozšířenější metody, zejména ve strojírenské praxi. Dotykové měřicí přístroje umožňují přímé měření a použití pro všechny typy povrchů. Hodnoty získané z měření touto metodou se používají jako srovnávací metody pro jiné metody měření. V důsledku tlaku na hrot snímače, který je vyroben z velmi tvrdého materiálu (např. Polykrystalický diamant) dochází k narušení povrchové vrstvy měřené součásti. Což může ovlivnit výsledek měření. Na Obr. je uvedeno schéma dotykového profilometru. (4,9)



- 1- Měřená součást,
- 2- snímací hlavice s měřícím hrotem,
- 3- posuvný mechanismus,
- 4- zesilovač,
- 5- filtr,
- 6- registrační jednotka,
- 7- jednotka zpracovávající měřicí signál,
- 8- zobrazovací jednotka.

Obr.3.8 Schéma principu kontaktního profilometru. (9)

Zhodnocení výhod a nevýhod mechanické metody měření topografie povrchu je uvedeno v Tab.3.1.

Tab.3.1 (9)

Výhody	Nevýhody
Přímé měření výškových nerovností povrchu vůči referenční rovině,	Poškození povrchů u měkkých materiálů,
na předpokladu použití této metody k měření je definována standardizace parametrů topografie povrchu,	neumožňuje kontinuální kontrolu a řízení kvality povrchu,
na předpokladu použití této metody k měření je definována standardizace parametrů topografie povrchu,	relativně pomalý pohyb hrotu po měřeném povrchu,
možnost měření v nečistém prostředí.	pouze 2D měření (3D měření je časově velmi náročné).
vysoký měřicí rozsah ve směru kolmém na střední rovinu povrchu,	měření nemůže být řízeno na dálku,

3.4.2. Optické metody

Jedná se o bezdotykové měření, kde je snímací hrot nahrazen paprskem elektromagnetického záření, což vylučuje poškození povrchu měřené součásti. Jsou alternativou za dotykové profilometry. Světelný svazek, který nahrazuje hrot dopadá na povrch měřeného materiálu odkud se buď odrazí nebo rozptýlí. Může to být i kombinace odrazu s rozptylem. Vzájemná interakce mezi paprskem a povrchem měřeného vzorku závisí na především na užité vlnové délce zařízení a na drsnosti povrchu. Hlavní nevýhodou optických metod je, že se jedná o měření nepřímé. Tudíž získaná data je nezbytné porovnat s daty získanými kontaktním profilometrem. Většina bezdotykových metod je vhodná k měření malých nerovností povrchů (menší než 1 μm). U kovových materiálů dělených metodou AWJ je drsnost povrchu od 1 μm až do 10 μm i více. Výhody a nevýhody optických metod jsou sepsány v tab. (4,9)

Tab 3.2 (9)

Výhody	Nevýhody
Bezkontaktnost a nedestruktivnost,	Měření parametrů topografie povrchu je nepřímé,
schopnost kontinuální kontroly a řízení kvality povrchu,	ztížená korelace na normované parametry,
opakovatelnost měření,	složitější způsob interpretace výsledků.
možnost měření z větší vzdálenosti.	

3.4.3 Ostatní metody

Do této skupiny měření charakteristik topografie povrchu můžeme zařadit celou řadu metod, které nepracují na mechanickém nebo optickém principu. Mezi ně patří:

- SEM (scanning elektron microscopy) – analyzuje proud elektronů odražených povrchem zkoušeného materiálu a kalibrací na parametry topografie povrchu,
- RTG difrakční metoda – využívá strukturních vlastností materiálu po působení rentgenova záření, kde je vlnová délka přibližně stejná jako meziatomová vzdálenost v krystalové mřížce,
- elektronová difrakce – zjišťuje strukturu povrchu u kovových materiálů,
- AFM (atomic force microscopy) – využívá miniaturního a velmi ostrého hrotu proti němu působí meziatomární síly měřeného materiálu a vlivem nerovností je hrot vychylován a jeho pohyb zaznamenáván,
- a další.

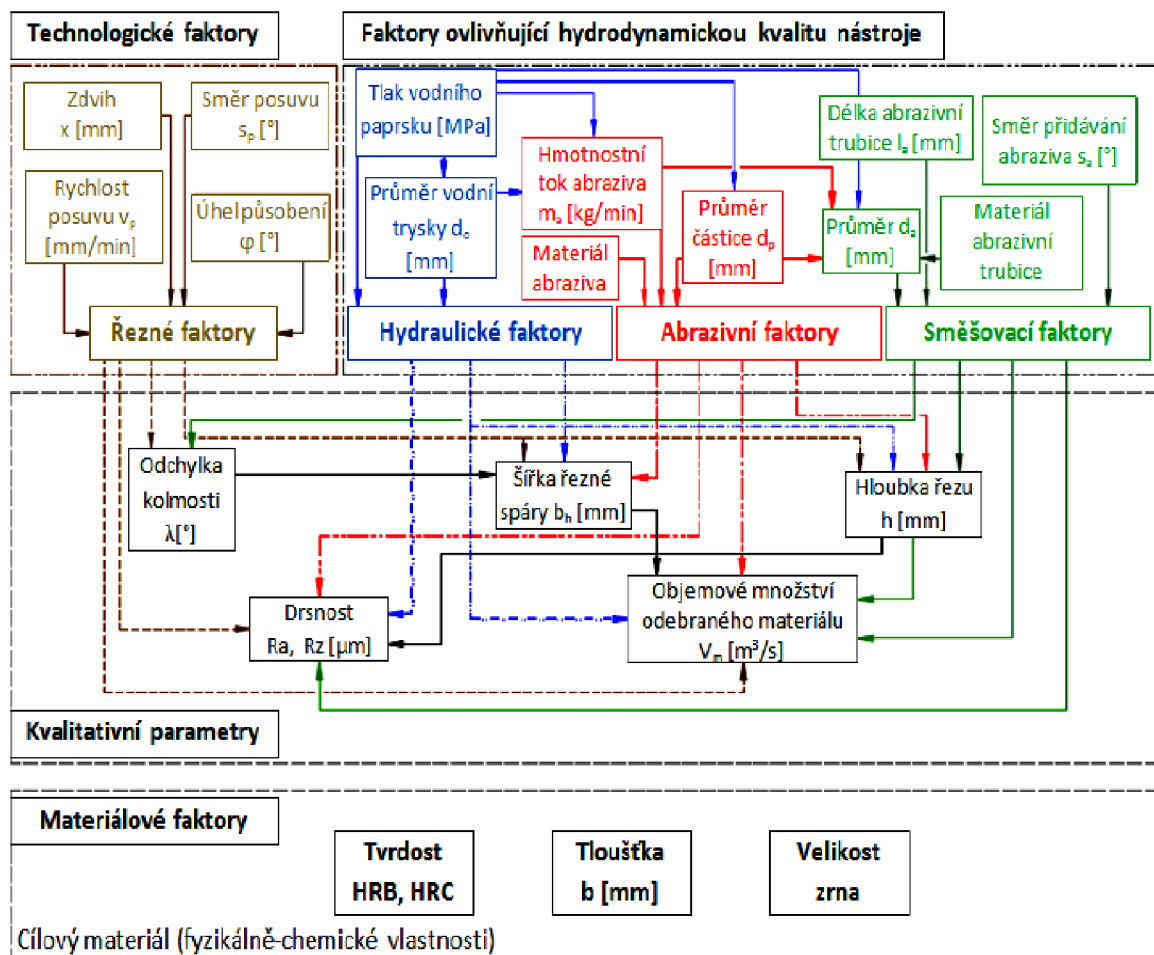
Výsledky těchto metod se vzájemně doplňují a tudíž se uvedené metody často aplikují společně.

4. TECHNOLOGICKÉ FAKTORY

Jak je popsáno v kapitole 2.4.2. vysokotlaký hydroabrazivní paprsek vytváří na povrchu obroku reliéf vyznačený dvěma zřetelně rozeznatelnými zónami (horní hladkou a dolní rýhovanou). Právě poměr velikostí těchto zón je závislý na faktorech, které vstupují do procesu řezání hydroabrazivním paprskem. Tyto faktory neovlivňují pouze výslednou kvalitu povrchu děleného materiálu, ale i celkovou efektivitu obrábění hydroabrazivním paprskem.

Do procesu dělení materiálů hydroabrazivním paprskem vstupuje velké množství různých faktorů, které ovlivňují kvalitu obrobené plochy. Obecně se rozdělují do dvou, a to do skupin přímých a nepřímých procesních faktorů.

U jednotlivých faktorů dochází k vzájemné interakci a ke změnám účinků v závislosti na hloubce řezu a dalších parametrech. Na obr. je znázorněno vzájemné působení jednotlivých faktorů na kvalitu obrobené plochy. (1,4,9)



Obr. 4.1 Schéma znázornění vzájemného působení faktorů na výslednou kvalitu obrobené plochy (4)

Prostřednictvím přímých faktorů se vytváří počáteční nástroj tedy hydroabrazivní paprsek. Patří mezi ně:

Tab.4.1 (9)

Faktory	Druh	Označení	Jednotka
Faktory dělení	Rychlost posuvu	v_p	$[\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}]$
	Směr posuvu	s_p	$[\text{°}]$
	Počet přechodů	n_p	$[l]$
	Zdvih	x_z	$[\text{mm}]$
	Úhel působení	ϕ_p	$[\text{°}]$
	Tloušťka materiálu	b	$[\text{mm}]$

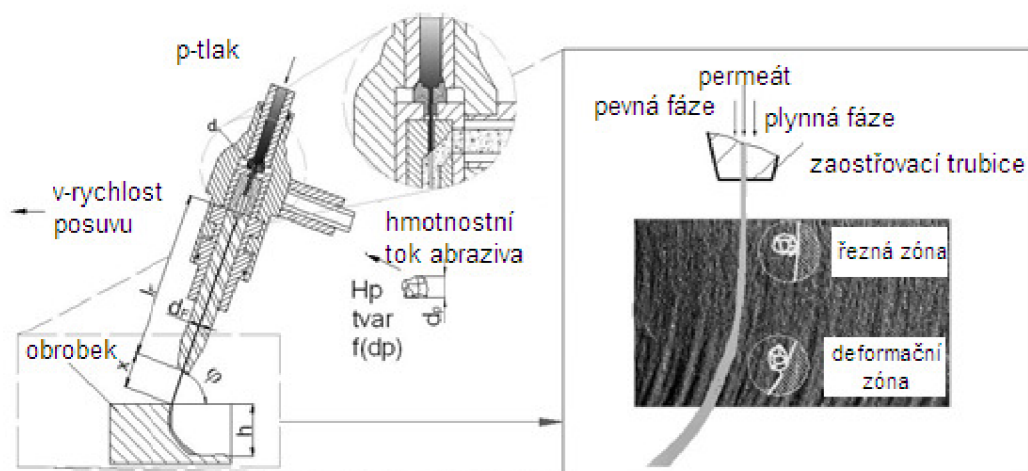
Mezi nepřímé faktory, které ovlivňují kvalitu počátečního nástroje patří:

- hydraulické faktory,
- směšovací faktory,
- abrazivní faktor. (5)

Tab.4.2 (9)

Faktory	Druh	Označení	Jednotka
Hydraulické	Tlak čerpadla	p_p	$[\text{Pa}]$
	Tlak kapaliny	p	$[\text{Pa}]$
	Průměr vodní trysky	d_0	$[\text{mm}]$
Směšovací	Průměr zaostřovací trubice	d_a	$[\text{mm}]$
	Délka zaostřovací trubice	l_a	$[\text{mm}]$
	Přívod abraziva		
Abrazivní	Hmotností tok	m_a	$[\text{kg} \cdot \text{min}^{-1}]$
	Průměr částice	d_p	$[\text{mm}]$
	Tvar abraziva		
	Tvrdość abraziva	H_a	$[\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}]$

Tyto faktory ovlivňují především kvalitu a energetickou účinnost výchozího nástroje. Pomocí těchto faktorů vystupuje hydroabrazivní paprsek do procesu vlastního úběru materiálu.(9)



Obr.4.2. Vliv faktorů na proces řezání materiálu (15)

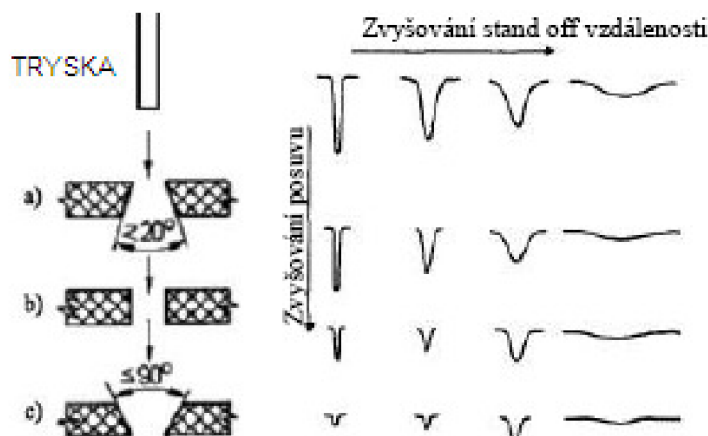
Pracovní povrch proudu se skládá z kapalně, pevné a plynné fáze. Pevnou fází proudu tvoří abrazivní částice, které vysokou rychlostí dopadají na horní erozní část řezaného materiálu (řezná zóna), přitom dolní erozní část podléhá plastickým deformacím (deformační zóna) viz obr. 4.2 (9,15)

Na základě faktorové analýzy patří mezi nejdůležitější parametry, které mají největší vliv na topografii povrchu dělených stěn jsou posunová rychlost řezné hlavy, hloubka řezu, druh abrazivního materiálu jeho zrnitost a hmotnostní tok, tlak pracovní kapaliny a také poměr průměrů vodní trysky a směšovací trubice. (4,9)

4.1. Přímé faktory dělení

Vzdálenost trysky od obrobku

Pokud se vzdálenost mezi tryskou a obrobkem zvětšuje, klesá úběr materiálu a zvětšuje se šířka řezné spáry. Zároveň se zhoršuje jakost obrobeného povrchu a geometrie řezu. (1,5)

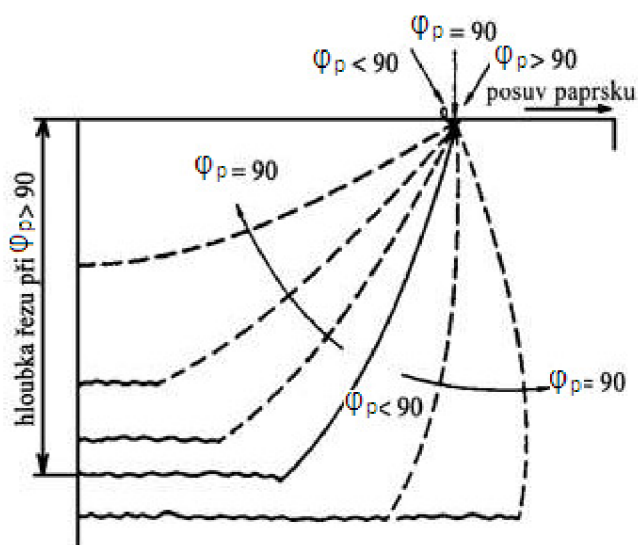


Obr.4.3 Schéma řezu a tvaru řezné spáry (1)

Paprsek, který proniká materiálem ztrácí svou kinetickou energii, a proto vnější okraj paprsku nemá tak výrazný řezný efekt ve spodní části obrobku jako v horní. S tím souvisí zvětšování kuželovitosti řezné spáry při zvětšující se vzdálenosti trysky od řezaného materiálu. (5)

Úhel působení

Řezný proces je ustálený do určité hloubky h_c . Aby se zamezilo možnosti vzniku nedořezání materiálu musí být hloubka h_c větší než je tloušťka řezaného materiálu a toho lze dosáhnout vhodným sklonem paprsku φ_p , který je označován jako úhel řezání. Tento úhel je při hydroabrazivním obrábění mezi paprskem a rovinou obrobku. (5)



Obr 4.4 Možné způsoby změny úhlu řezání (5)

Rychlost posuvu

Změnou rychlosti posuvu se ovlivní řaděvším tyto vlastnosti řezné spáry:

- hloubka řezu,
- tvar řezné spáry,
- šířka řezné spáry,
- kvalita povrchu řezné spáry. (5,9)

Závislost rychlosti posuvu na tvaru a kuželovitosti řezné spáry je již popsána v kapitole 2.4.2. *Interakce s materiálem*.

Kuželovitost nebo-li podřezání nebo nedořezání řezné hrany můžeme předejít několika způsoby:

- oscilační řezání,
- včasná změna úhlu dopadu paprsku,
- volba optimální vzdálenosti trysky od obrobku,
- volba optimální posunové rychlosti,
- volbou vhodného množství abraziva. (5)

4.2. Hydraulické faktory

Tlak kapaliny p

Pracovní tlak kapaliny volíme v závislosti na typu řezaného materiálu, tedy se zvyšující se tvrdostí materiálů volíme vyšší tlak kapaliny. V současnosti multiplikátorová čerpadla dosahují tlaku až 700 MPa.

Tlak paprsku určuje kinetickou energii částicím pohybujícím se ve vodním paprsku. Při vyšších tlacích je vyšší kinetická energie molekul vody a jednodušeji porušuje vazby v materiálu obrobku. (4,5,9)

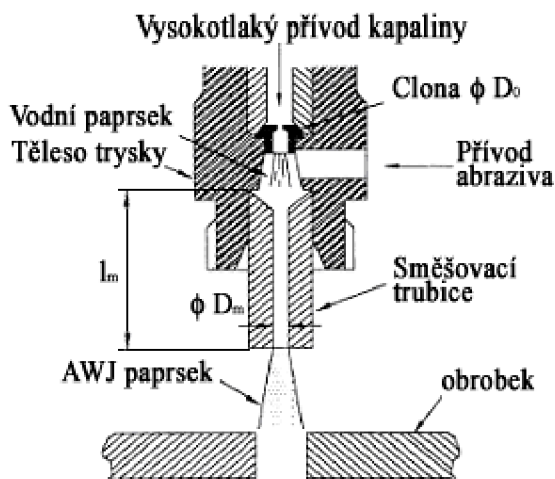
Průměr vodní trysky

Vodní tryska vytváří vysokorychlostní paprsek z vysokotlaké vody. Tryska má vliv na výsledný tvar paprsku, ale i na jeho řeznou sílu, účinnost, výkon, šířku řezné spáry a na výslednou kvalitu řezného procesu. Se zvětšujícím se průměrem trysky roste i roste i hloubka řezu (při jinak stejných podmínkách). S průměrem trysky souvisí i další parametry jako vzdálenost od obráběného povrchu, množství dodávané vody i abraziva, ovlivňuje maximální řeznou rychlost a další. Nevhodně zvolené řezné podmínky mohou mít výrazný vliv na opotřebení trysek. (5)

4.3. Směšovací faktory

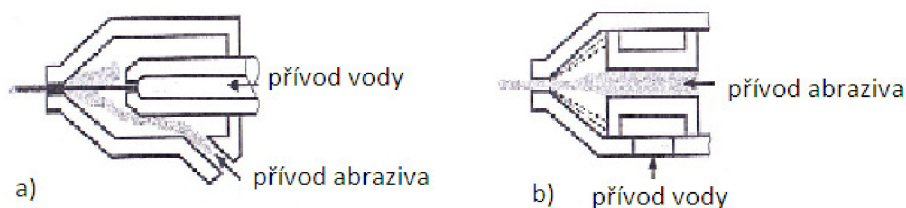
Průměr a délka zaostřovací trubice

Průměr D_m a délka l_m zaostřovací trubice mají vliv na maximální řeznou rychlost a účinnost procesu.



Obr.4.5 Schéma abrazivní trysky (5)

K hydroabrazivnímu řezání využíváme dvou druhů trysek s rozdílnými typy přívodu abraziva. V souvislosti s konstrukcí trysky preferujeme dvě hlavní technologie přívodu abraziva. (5)



Obr.4.6 Abrazivní tryska s přívodem abraziva radiálním (a), axiálním (b) (1)

Pro hydroabrazivní řezný proces je výhodnější typ trysky s axiálním přívodem abraziva, který je složitější. V této trysce je lepší směšovací proces abraziva s vodou a snižuje se opotřebení obvodu trysky, protože abrazivum je do směšovací komory strháváno pod tlakem v důsledku proudící vody. (1,5)

4.3. Abrazivní faktory

Hmotnostní tok

Hmotnostní tok v závislosti na druhu použitého abraziva přímo ovlivňuje rychlost úběru materiálu a kvalitu řezné spáry. Množství abraziva je zpravidla odvozeno od množství vody a průměru trysky D_m . Pro dané množství abraziva m_a při rostoucí rychlosti průtoku vody klesá intenzita zvyšování hloubky řezu. Při hydroabrazivním řezání obecně platí, že se vždy používá největší velikost průměru vodní trysky v závislosti na výkonu čerpadla. Závislost hloubky řezu na hmotnostním toku je téměř lineární, ale tato linearita končí při vyšším m_a . (5,9)

Průměr a tvar abrazivních částic

Čím jsou abrazivní zrna menší, tím je dosahováno menších hloubek řezání, ale dosáhne se tím hladšího řezu. Právě zrnitost lze ovlivnit kvalitu a drsnost povrchu materiálu. Použití abraziva s vyšší zrnitostí snižuje řezný účinek (úběr materiálu). (5,9)

Tvrdość abraziva

Jak už bylo uvedeno v kapitole 2.3.7 *Abrazivo* tvrdost abraziva je dána jeho chemickým složením a mechanicko-fyzikálními vlastnostmi. Používají se především abraziva na bázi křemičitanů a polodrahokamů (granát, olivín). Křemičité písky jsou výhodnější z hlediska lepší výsledné drsnosti povrchu. Tvrďší abraziva jsou vhodná k použití při rychlejším řezání, pokud je požadován větší úběr materiálu. (1,3,5)

Závěr

V dnešní době je nekonvenční technologie využití hydroabrazivního dělení hojně využívána v řadě oborů a to vzhledem k možnosti řezat téměř jakýkoliv materiál ať už měkký jako (dřevo, papír, plastny atd.) nebo tvrdý (kovy, slitiny atd.). Abrazivní vodní paprsek se díky svým přednostem mezi které patří hlavně vysoká rychlost řezání, schopnost řezat jak rovinné tak tvarové plochy, minimální tepelné ovlivnění povrchu materiálu a další hodí perfektně jako moderní technologie vhodná pro 21. století. Tato technologie je stále vyvíjena a zdokonalována a tak se nacházejí stále nová využití v praxi.

Tato bakalářská práce byla zaměřena na integritu povrchu obráběného hydroabrazivním paprskem. Zkoumání integrity povrchu je velmi významné, jelikož v současné době jsou kladeny vysoké požadavky na jakost povrchu. Nicméně Normy pro hodnocení topografie povrchu doposud nebyly zavedeny ani sestaveny. Většina firem uznává rozdělení dosahovaných kvalit řezu do hodnot Q1 až Q5, ale u každé firmy se tyto stupně kvality liší. Povrchy vytvořené AWJ technologií jsou odlišné od povrchů vytvořených konvenčními metodami hlavně z geometrického hlediska. Mají především hrubší a členitější topografii povrchu. Drsnost povrchu obráběného hydroabrazivním paprskem se mění lineárně se zvyšováním hloubky řezu. Lineární průběh drsnosti je i při změně tlaku vodního paprsku. Vyšší tlaky vody vytváří hladší povrchy a zároveň urychlují úběr materiálu. Na drsnost povrchu má také velký vliv zrnitost abrazivních částic. Obecně čím hrubší je zrno abraziva tím je dosahovaná drsnost R_a horší. Proto se pro jemné opracování používá malá zrnitost, avšak paprsek s malými částmi abraziva řeže pomaleji, protože ztrácí rychleji svou kinetickou energii.

Do procesu dělení materiálů hydroabrazivním paprskem vstupuje velké množství různých faktorů, které ovlivňují kvalitu obrobené plochy. Obecně se rozdělují do dvou skupin přímých a nepřímých procesních faktorů. Jednotlivé faktory jsou rozepsány přičemž největší vliv na finální topografii dělicích stěn mají posunová rychlost rezné hlavy, hloubka, řezu, druh abrazivního materiálu jeho zrnitost a hmotnostní tok, tlak pracovní kapaliny a také poměr průměru trysky a hydroabrazivní trubice.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technologie*. Košice : Technická univerzita Košice, Strojnícka fakulta – edícia vedeckej a odborném literatúry 2000. 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
2. DVOŘÁKOVÁ, J., DVOŘÁK, J. Technologie WJM/AWJ pro řezání pevných materiálů vodním paprskem. *Glassrevue.com*, Vol.2007, No.21, ISSN 1802-8497, [online]. [cit. 23. března 2010]. Dostupný na World Wide Web: <<http://www.glassrevue.com/>>.
3. DVOŘÁKOVÁ, J., DVOŘÁK, J. Technologie WJM/AWJ pro řezání pevných materiálů vodním paprskem II. *Glassrevue.com*, Vol.2008, No.15, ISSN 1802-8497, [online]. [cit. 5. dubna 2010]. dostupný na World Wide Web: <<http://www.glassrevue.com/>>.
4. PECHÁČEK, Martin. *Hodnocení kvality povrchu při řezání u technologie AWJ a WJM*: Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 88 s., 2 přílohy. Vedoucí práce Ing. Martin Slaný.
5. DVOŘÁK, J.: *Integrita rozhraní materiálu obráběných progresivními technologiemi*. Disertační práce. Brno: VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. Počet stran 109, počet příloh 3. Vedoucí práce doc. Ing. Miroslav Píška, CSc.
6. CHPS.cz: Vodní paprsek [online]. Chomutov: [cit. 26. září 2010]. Dostupné z WWW: <<http://www.chps.cz/>>.
7. PTV.cz: Produkty [online]. [cit. 29. září 2010]. Dostupné z WWW: <<http://www.ptv.cz/ptv/jnp/cz/produkty/index.html>>
8. HUMÁR, A. *Technologie I: : Technologie obrábění - 3. část*. [online]. [cit. 2009-05-02]. 57 s. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Dostupné z WWW: <<http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/?page=opory>>
9. VALÍČEK, J. *Měření a řízení jakosti povrchu při hydroabrazivním dělení materiálu*. Habilitační práce. Ostrava: VŠB-TUO, 2008.
10. OSMAN, A. H., et al. experimental analysis of high-speed air-water jet flow in an abrasive water jet mixing tube. *Flow measurement and instrumentation*. March 2004, Volume 15, Issue 1, s. 37-48. Dostupné z WWW: <<http://www.sciencedirect.com>>.
11. CHEN, F. L.; SIORES, E., The effect of cutting jet variation on striation formation in abrasive water jet cutting. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. August 2001, Volume 41, Issue 10, s. 1479-1486. Dostupné z WWW: <<http://www.sciencedirect.com>>.
12. HASCALIK, Ahmet; CAYDAS, Ulas; GURUN, Hakan. Effect of traverse speed o abrasive water jet machining of Ti-6Al-4V alloy. *Materials & Design*. 2007, volume 28, Issue 6, s. 1953-1957. Dostupné z WWW: <<http://www.sciencedirect.com>>.
13. SIORES, E., et al. Enhancing Abrasive Water Jet Cutting of Ceramics by Head Oscilation Techniques. *CIRP annals : Manufacturing Technology*. 1996, volume 45, Issue 1, s. 327-330. Dostupné z WWW: <<http://www.sciencedirect.com>>.

14. VALÍČEK, J., Vyhodnocování povrchů vytvořených vodním paprskem. *Mmspektrum*. [online]. [cit. 4.říjen 2010]. Dostupné na WWW: <http://www.mmspektrum.com/clanek/vyhodnocovani-povrchu-vytvorenych-vodnim-paprskem>.
15. HLOCH, S; VALÍČEK, J., Technologické faktory vysokorychlostního hydroabrazivního paprsku a jejich vliv na povrch finálního výrobku. 2002, s. 21-24 Dostupné na WWW: <http://www.web.tuke.sk/fvtpo/casopis/pdf07/1-str-21-23.pdf>.
16. VALÍČEK, J; HLOCH, S. Aplikace bezkontaktní optické metodiky měření a interpretace získaných výsledků. *Metal*. 2007, s. 5. Dostupné z WWW: <http://www.nanocon.cz/data/metal2007/sbornik/Lists/Papers/181.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

WJM	water jet machining-hydrodynamické obrábění
AWJ	abrasive water jet-hydroabrazivní obrábění
USM	Ultrasonic Machining – obrábění ultrazvukem
ECM	Electrochemical Machining – elektrochemické obrábění
EBM	Electron Beam Machining – obrábění elektronovým paprskem
EDM	Electro Discharge Machining – elektroerozivní obrábění
ECM	Electro Chemical Grinding – elektrochemické broušení
CM	Chemical Machining – chemické obrábění
PCM	PhotoChemical Machining – fotochemické obrábění
LBM	Laser Beam Machining – rezání laserem
PAM	Plasma Arc Machining – obrábění plazmovým paprskem

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
C_k	[1]	koeficient charakteristické rychlosti
b	[mm]	tloušťka materiálu
D	[°]	deviační úhel
d	[mm]	průměr zaostřovací trubice
H_a	[N·mm ⁻²]	tvrdost abraziva
h	[mm]	celková délka dělicího řezu
h_c	[mm]	délka hladké zóny
h_d	[mm]	délka rýhované zóny
l_r	[m]	měřená délka
m_a	[kg·s ⁻¹]	hmotnostní tok abraziva
n_p		počet přechodů
P	[Pa]	tlak kapaliny
ρ_p	[kg·m ⁻³]	hustota abrazivního materiálu
s_p	[°]	směr posuvu
R_a	[μm]	průměrná aritmetická odchylka drsnosti
R_q	[μm]	průměrná kvadratická odchylka drsnosti
R_z	[μm]	největší výška nerovnosti
v_a	[m·s ⁻¹]	rychlost pohybu abrazivních částic
v_e	[m·s ⁻¹]	kritická rychlost abrazivních částic
v_p	[m·s ⁻¹]	rychlost posuvu rezné hlavy
Y_{ret}	[mm]	retardace paprsku
$Z(x)$		funkce popisující profil
Z_p	[μm]	výška největšího výstupku v rozsahu základní délky l_r
Z_v	[μm]	výška největší prohlubně výstupku v rozsahu základní délky l_r
ϕ	[°]	uhel působení

