

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

ŘEZÁNÍ MATERIÁLU VODNÍM PAPRSKEM

WATER JET CUTTING OF MATERIAL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAN JÁCHYM

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. VLADIMÍR HABÁN, Ph.D.

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jan Jáchym

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Řezání materiálu vodním paprskem

v anglickém jazyce:

Water jet cutting of material

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Studie možnosti využití vodního paprsku pro dělení materiálu se zaměřením na řezání vysokopevnostních kovových a nekovových materiálů, použitím pulsujícího paprsku.

Cíle bakalářské práce:

Seznámit se z možnosti řezání materiálu vodním paprskem s využitím ultrazvuku k modulaci paprsku a využitím abrazivních částic k řezání.

Seznam odborné literatury:

Bude úkolem studenta vyhledat dostupnou literaturu k tomuto tématu.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Vladimír Habán, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne 6.11.2008

L.S.

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce popisuje principy vzniku a využití vysokorychlostních vodních paprsků vhodných pro obrábění. V první části uvádí popis technologie řezání vodním paprskem a její aplikace, základní součásti vysokotlakého systému a druhy generátorů tlaku. V druhé části rozděluje vodní paprsky dle přetržitosti v čase a chemického složení. Ve třetí části se zabývá studiem využití tzv. pulzních paprsků, zejména pak paprsku modulovaného ultrazvukem. Je rozebrán mechanismus vzniku a rozpadu modulovaného vysokorychlostního paprsku na jednotlivé pulzy.

KLÍČOVÁ SLOVA

vodní, paprsek, obrábění, pulzy, modulovaný, diskontinuální, kontinuální

ABSTRAKT

This bachelor thesis describes principles development and usage of high - speed water jets for cutting. In the first part, it features description water jet cutting technology and its application, basic parts of high pressure system and sorts of generators pressure. In the second part, it divides water jet according to discreteness in time and chemical constitution. In the third part, it deal with studies usage so - called pulse jets, especially at ultrasonically modulated ones. It is described mechanism rise and break up of modulated high - speed jet on individual pulses.

KEY WORDS

water, jet, cutting, pulses, modulated, discontinuous, continual

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JÁCHYM, J. *Řezání materiálu vodním paprskem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 37 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Vladimír Habán, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího bakalářské práce pana Ing. Vladimíra Habána, Ph.D. a s použitím uvedené literatury.

V Brně dne 27. května 2009

Jan Jáchym

OBSAH

1	ÚVOD.....	11
2	HISTORIE A VÝVOJ TECHNOLOGIE ŘEZÁNÍ VODNÍM PAPERSEM.....	12
3	OBRÁBĚNÍ VODNÍM PAPERSEM.....	13
4	ČÁSTI SYSTÉMU PRO ŘEZÁNÍ VODNÍM PAPERSEM.....	14
	4.1. Řídící systém.....	15
	4.2. Zdroj vysokotlaké kapaliny.....	15
	4.2.1. Pístová čerpadla – plunžrová.....	15
	4.2.2. Multiplikátory.....	16
	4.2.3. Řezací hlava.....	16
	4.2.4. Systém dálkové dopravy a podávání abraziva.....	17
5	APLIKACE VODNÍHO PAPERSKU.....	18
6	ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ KAPALINOVÝCH PAPERKŮ.....	19
7	KONTINUÁLNÍ PAPERSEK KAPALINY.....	20
	7.1. Čistý vodní paprsek.....	20
	7.2. Abrazivní vodní paprsek.....	20
	7.2.1. Abrazivní vodní paprsek a paprsek abrazivní suspenze.....	21
	7.3. Kryogenní vodní paprsek.....	22
	7.4. Kavitační vodní paprsek.....	23
	7.5. Ultravysokotlaký vodní paprsek.....	23
8	DISKONTINUÁLNÍ VODNÍ PAPERSEK.....	24
	8.1. Pulsní nízkofrekvenční vodní paprsek.....	25
	8.1.1. Zařízení pro generaci jednotlivých pulsů paprsku.....	25
	8.2. Pulsní přerušovaný vodní paprsek.....	27
	8.3. Modulovaný vodní paprsek.....	27
	8.3.1. Vnitřní mechanické modulátory průtoku.....	27
	8.3.2. Rezonátory.....	28
	8.3.3. Ultrazvuková modulace vodního paprsku.....	29
	8.3.3.1.Princip generace ultrazvukové modulace vodního paprsku.....	30
	8.3.3.2.Rozpadová délka modulovaného vodního paprsku.....	30
	8.3.3.3.Frekvence modulace.....	32
	8.3.3.4.Porovnání výkonnosti modulovaného a kontinuálního VP.....	32

9 ZÁVĚR.....	34
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	35
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ.....	37

1 ÚVOD

Rozvoj lidské společnosti klade stále vyšší nároky na vlastnosti výrobků používaných v širokém spektru lidské činnosti. Rozšířilo se proto využití speciálních materiálů, které jsou často velmi těžce zpracovatelné. Například oceli vysoké pevnosti a tvrdosti, chromované oceli, titan a jeho slitiny, křemíkové materiály, keramické materiály nebo slitiny na bázi Ni. Stejně jako vývoj nových materiálů je nutné vyvíjet i technologie pro jejich rychlé, přesné, účinné a ekologické zpracování.

Tyto technologie se označují jako nekonvenční, protože se od klasických konvenčních způsobů zpracování odlišují většinou bezsilovým působením na obráběný materiál bez vzniku klasických třísek jak je tomu u třískového obrábění reznými nástroji. Používají se ve větší míře energetické toky různých energetických zdrojů. Jako opracování materiálů ultrazvukem, elektroerozí, dále pomocí plazmových hořáků, laserových paprsků, v magnetickém poli feromagnetickými prášky, opracování a dělení materiálů čistými a abrazivními kapalinovými paprsky.

Vysoce energetické nebo vysokorychlostní kapalinové paprsky i abrazivní kapalinové paprsky se staly v uplynulých desetiletích velmi důležitým nástrojem pro dělení materiálu. Tento vývoj bude pravděpodobně i nadále pokračovat, protože kapalinové paprsky mají velkou výhodu v tom, že při standardních aplikacích je není možno poškodit nebo zničit, neotupují se atd. Velkou výhodou řezání vodním paprskem je skutečnost, že dochází k chladnému řezu a tedy nevzniká tepelně ovlivněná oblast děleného materiálu.

Technologie využívající vodní paprsek je stále vyvíjena a snaží se přizpůsobit požadavkům zákazníků, ale také nárokům ekologickým a ekonomickým. V dnešní době probíhá v Ústavu geoniky AVČR v Ostravě vývoj systému využívajícího pulzující, ultrazvukem modulovaný vodní paprsek, a ukazuje se, že technologie využívající vodní paprsek má ještě velký potenciál.

2 HISTORIE A VÝVOJ TECHNOLOGIE ŘEZÁNÍ VODNÍM PAPRSKEM

Počátky použití paprsku vody v průmyslu se datují od roku 1853, kdy kalifornští zlatokopové začali používat proudy vody pro dobývání měkké zlaté rudy. Tento proud vody měl relativně velkou rychlost toku a tlak několik desítek MPa.

Další záznamy aplikace jsou z Ruska a Nového Zélandu v oblasti Seddonville, kde se podobný způsob využíval pro těžbu uhlí. Po odstřelení čelby bylo použito proudy vody k dopravě uhlí korytem do nádrže, ze které putovalo na povrch do filtrů. Hydraulické dobývání bylo bezpečnější než klasická těžba, protože horníkově umožňovalo stát dál od čela ražby a vyvarovat se případnému závalu. Dále zabraňovalo uvolňování prašných částic a s tím spojené nebezpečí exploze ve štole.

Prvním člověkem, který začal studovat účinky vody jako řezného nástroje byl v roce 1950 lesnický inženýr Dr. Norman Franz. Pouštěním těžkých závaží na sloupec vody a napojením této kapaliny do úzké trysky, docílil impulzu vysokotlaké kapaliny. Dr. Franz zjistil, že těmito rázy je schopen štípat dřevo a další materiály. Jeho pozdější studie zahrnovala více přetržitých proudů vody, ale bylo velmi složité dosáhnout nepřetržitosti paprsku. Navíc, život řezného nástroje byl měřený v minutách – ne v týdnech nebo měsících jak je tomu dnes. Ačkoli Dr. Franz nikdy nevyrobil funkční stroj na řezání dřeva, jeho výzkum a vynálezy byly důležité pro pozdější vývoj této technologie. Ironicky, dnes je dělení dřeva vodním paprskem minoritní záležitostí.

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

Zásadním milníkem ve vývoji řezání vodním paprskem byl rok 1980. Dr. Mohamed Hashish, tehdy studující na Concordia University v Montrealu, studoval řezání vodním paprskem a sestavil si vlastní řezací jednotku. Při postgraduálním výzkumu si kladl otázku přidávání abraziva do vody. Naplnil tedy nádobu z polystyrenu popelem z popelníku a umístil ji na řezanou desku ze dřeva. Po spuštění stroje řezal paprsek vody daleko rychleji než dřívě, což ho přesvědčilo o správnosti jeho teorie. Hashish byl najat firmou Flow jako výzkumný pracovník. Experimentoval s různorodými abrazivními materiály jako je granát, písek dokonce i popel ze sopečné erupce hory St.Helen. S touto metodou mohl řezat téměř každý materiál. Proto tato inovovaná technologie začala rychle rozšiřovat do průmyslu.

V roce 1983 firma Flow dodala první stroj společnosti Libby Owens Ford Co., která jej užívala pro řezání automobilových oken. Společnosti jako Boeing a Airbus používaly tuto technologii pro řezání materiálu Inconel (speciální žáruvzdorná slitina) nebo pro řezání uhlíkových vláken, které lze najít ve vojenských letadlech.

Dnes je technologie řezání vodním paprskem rozšířena po celém světě v širokém okruhu průmyslového využití. Od řezání speciálních materiálů při výrobě družic a raketoplánů ve společnosti NASA, přes řezání výplní dveří u automobilů nebo skel, kompozitů pro sportovní potřeby, skelné vaty až po řezání pečiva, masa nebo ryb.

3 OBRÁBĚNÍ VODNÍM PAPSREM

Úběr materiálu je založen na mechanicko-fyzikální podstatě a je charakterizován procesem odebrání (tzv. microchipping) částic materiálu následkem dopadu úzkého vodního proudu s vysokou rychlostí a velkou kinetickou energií na jednotku povrchu materiálu obrobku, přičemž abrazivum tento mechanický účinek ještě znásobuje.[1]

Řezání vodním paprskem má oproti konvenčním technologiím mnoho podstatných výhod.

Největší z nich je bezesporu fakt, že použitím VP vzniká studený řez, a tedy nedochází k tepelnému ovlivnění řezaného materiálu, a tím ke změnám struktury. Paprsek se sice průchodem přes dělený materiál zahřívá, dosahuje však teploty do 70°C při tlaku vody 350MPa.

Další výhodou je minimální silové působení paprsku na řezaný materiál, tedy nedochází ke vzniku mikrotrhlin. Nevznikají škodlivé emise do ovzduší, které by mohly být nebezpečné pro obsluhu stroje, odpadá tedy nutnost použití respirátorů či odsávání.

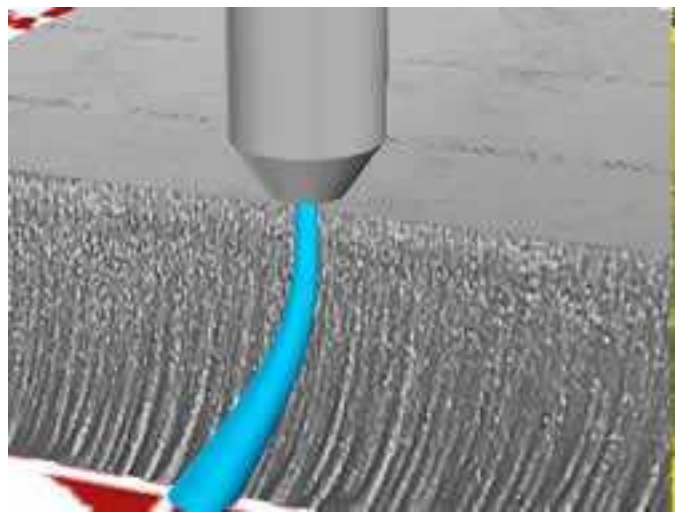
Velkou výhodou je i univerzálnost této technologie. Dokáže obrábět většinu materiálů v rozsahu 0,1 až 300 mm tloušťky s velkou přesností až $\pm 0,04\text{mm}$. Lze tedy řezat i velmi obtížně dělitelné a jinak neobrobitelné materiály jako jsou titan, nikl, kobalt a jejich slitiny. Dalším benefitem technologie je možnost řezu jakýchkoli materiálů povrchově upravených (leštěných, barevných nebo pokovených) bez poškození povrchu poškrábáním. Řez je bez otřepů, většinou odpadá nutnost následného opracování, odjehlování a srážení ostrých hran výrobku. Lze dosahovat vysokého využití polotovaru, tím i úspory materiálu, díky malému průměru paprsku a možnosti vyskládání více tvarů na jeden polotovar.

Pokud jsme zmínili výhody, musíme zmínit i nevýhody technologie vodního paprsku.

Nevyhnutelný kontakt s vodou a většinou i s abrazivním materiálem způsobuje rychlý nástup povrchové koroze. U nasákových materiálů delší vysoušení, možnost změny barvy, znečištění apod.

Další nevýhodou jsou vysoké investiční a provozní náklady zařízení. Cena nového stroje se pohybuje v řádech milionů korun, podle dodávaných příslušenství a počtu odebraných strojů atd. Nejnákladnější položkou je pořízení vysokotlakého čerpadla.

Za nevýhodu lze brát i deformaci kontury řezu při horších kvalitativních stupních řezu u silnějších materiálů tzv. výběhu paprsku. Na odstranění této nevýhody intenzivně pracuje společnost Flow, která vyvinula systém Dynamic Waterjet®(DWJ).

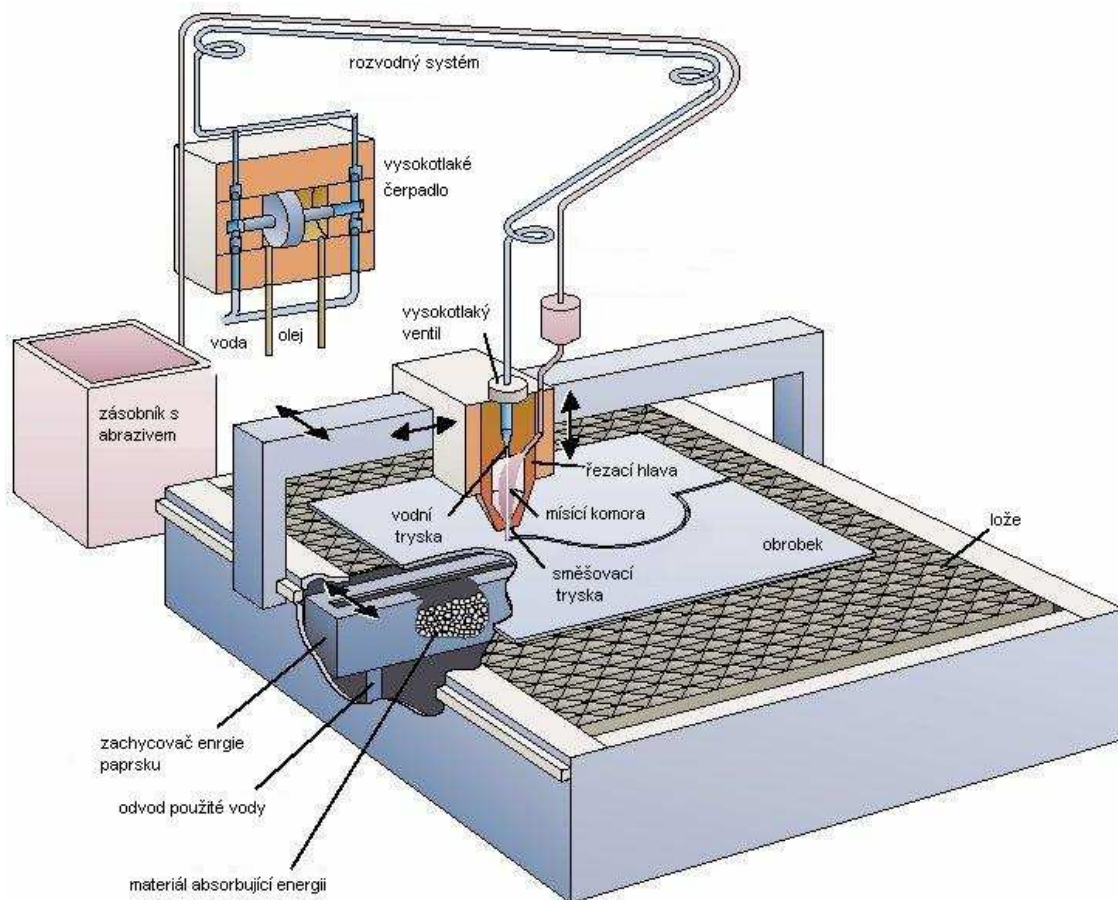


Obr.1 Příklad deformace kontury řezu[2]

4 ČÁSTI SYSTÉMU PRO ŘEZÁNÍ VODNÍM PAPSKEM

System pro obrábění vodním paprskem lze rozdělit do těchto částí:

- řídicí systém
- zdroj vysokotlaké kapaliny
- řezací hlava
- systém dálkové dopravy a podávání abraziva (u abrazivního obrábění)
- potrubí na rozvod vody
- dvoucestný ventil
- přísady na úpravu vody
 - filtry
- pneumatická zařízení
- řezací stůl (lapač vody) [16]



Obr.2 Systém pro řezání vodním paprskem [16]

4.1 ŘÍDÍCÍ SYSTÉM

Řídicí systém má za úkol přenést tvar řezu do pohybu trysky. V dnešní době se přenos řeší pomocí PC. Parametry vyráběné součásti bývají zpracovány přímo pomocí grafického programu Autocad nebo jiného CAD systému. Tato data jsou pak přenesena do CAD/CAM expertního systému, který je kompatibilní s každým standardním CNC systémem. K software patří databanka, která obsahuje standardní parametry pro velké množství známých materiálů. Výpočetní software rychle určí odpovídající řezné parametry a optimalizuje program. Řídicí systém je také schopen korigovat chyby řezu vzniklé zúžením paprsku a jeho zpožděním nakláněním řezací hlavy. Taktéž zajišťuje rychlé a přesné určení ceny za provedenou práci. To vše napomáhá ke zvýšení celkové kapacity a flexibility systému a tím i produktivity celého zařízení. [16]

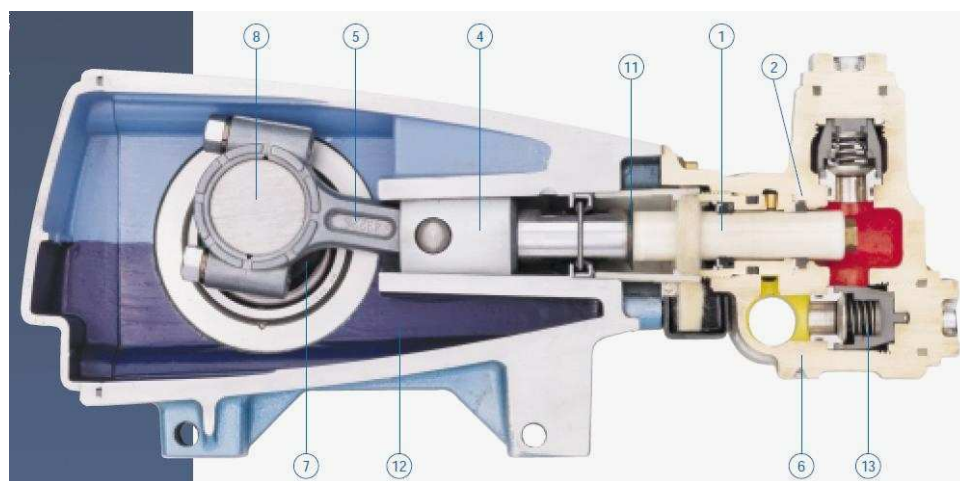
4.2 ZDROJ VYSOKOTLAKÉ KAPALINY

Dosažení vysokého tlaku pracovní kapaliny je základním předpokladem pro řezání vodním paprskem. K tomuto účelu se v praxi používají dva zdroje vysokotlaké kapaliny a to pístová čerpadla nebo multiplikátory.

4.2.1 Pístová čerpadla – plunžrová

Na obr.3 je znázorněn řez jednočinným plunžrovým čerpadlem. Ve válci je uložený keramický plunžr 1, spojený s mechanickou částí čerpadla. S pracovním válcem je pevně spojena ventilová komora, ve které se nachází sací a výtlačný ventil. K ventilové komoře se připojují sací a výtlačné potrubí systému. Ventily bývají zpravidla konstruovány tak, že se zavírají a otevírají samočinně působením tlaku v pracovním prostoru.

Při pohybu plunžru vlevo se pracovní prostor zvětšuje, tlak v něm se zmenšuje a kapalina se nasává do pracovního prostoru skrz otevřený sací ventil. Výtlačný ventil je uzavřen. Při pohybu plunžru opačným směrem se tlak v pracovním prostoru zvětšuje na hodnotu výtlačného tlaku, sací ventil se uzavře a kapalina je vytlačována do výtlačného potrubí. Tato čerpadla se vyrábí na max. pracovní tlak 300 MPa, při příkonu max. 1100 kW jsou schopny dodávat velké množství tlakového media max. 2400 l/min, což je vhodné zejména pro čištění a sanační práce.



- 1.keramický plunžr
- 2.těsnění
- 4.plunžrová tyč
- 5.ojnice
- 6.rozdělovač
- 7.ložisko
- 8.kliková hřídel
- 11.odstříkový kroužek
- 12.skříň klikové hřídele
- 13.ventil

Obr.3 Řez plunžrovým čerpadlem s popisem [17]

4.2.2 Multiplikátory

Multiplikátor (hydraulický násobič) je ve své podstatě založen na rozdílu ploch dvou navzájem spojených pístů. Princip činnosti multiplikátoru, konkrétně od firmy Flow je znázorněn na obr. 4.

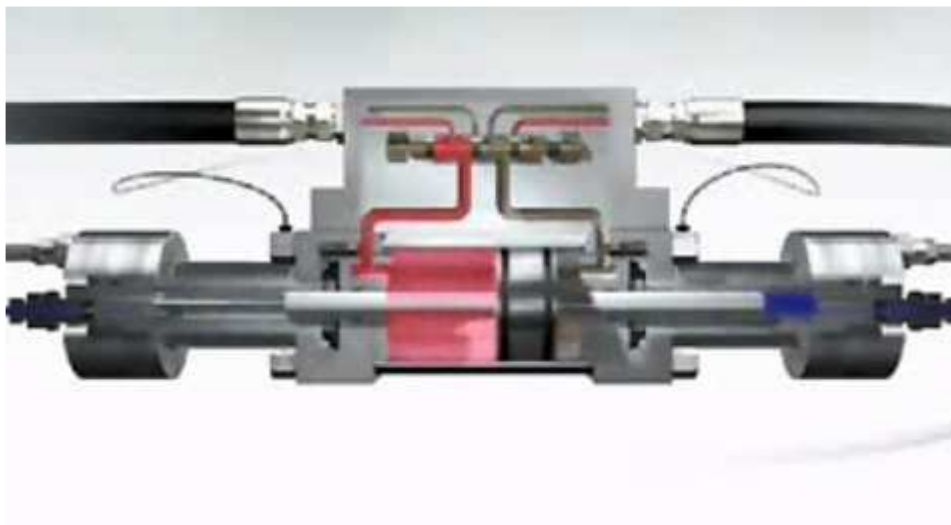
Multiplikátor se skládá z nízkotlaké části a vysokotlaké části. Do nízkotlaké části (znázorněno červeně) se přivádí hydraulický olej o tlaku p_1 (21 MPa), který je veden do oblasti za pístem s plochou S_1 . Tento tlak způsobí pohyb pístu doprava, který vyvolá v pracovní kapalině (znázorněno modře) tlak p_2 (410 MPa). Automatickým mechanickým přestavováním rozváděcího ventilu se mění tlak ve válci a píst vytlačuje kapalinu o vysokém tlaku do systému. Za povšimnutí také stojí, že při těchto vysokých tlacích dosahuje stlačitelnost vody 13%.

Podle Pascalova principu působením tlaku p_1 na píst, vyvolá tlak p_2 tolikrát větší, kolikrát je menší ploch S_2 . vzhledem k ploše S_1 . [19]

$$p_2 = \frac{S_1}{S_2} \cdot p_1 \text{ [Pa]} \quad (1)$$

V praxi se používají dvojčinné multiplikátory pro které platí:

$$p_2 = \frac{S_1 - S_2}{S_2} \cdot p_1 \text{ [Pa]} \quad (2)$$



Obr.4 Řez dvojčinným multiplikátorem [18]

4.2.3 Řezací hlava

Tryska – je to základní část zařízení, která přímo ovlivňuje kvalitu paprsku i kvalitu řezu. Část trysky, v které je výtokový otvor s průměrem od 0,1 mm je vyroben ze safíru nebo spékaného karbidu. Při vyšších požadavcích na kvalitu lze použít i diamant, který má až desetkrát vyšší životnost, čímž snížíme náklady na údržbu. Průměrná doba práce safírové trysky je kolem 200 hodin. Po tomto čase se tryska zanese nečistotami a minerálními usazeninami z vody. Diamantovou trysku lze vícekrát pročistit. Cena diamantové trysky je však 7-10 krát vyšší než korundové nebo safírové. [16]

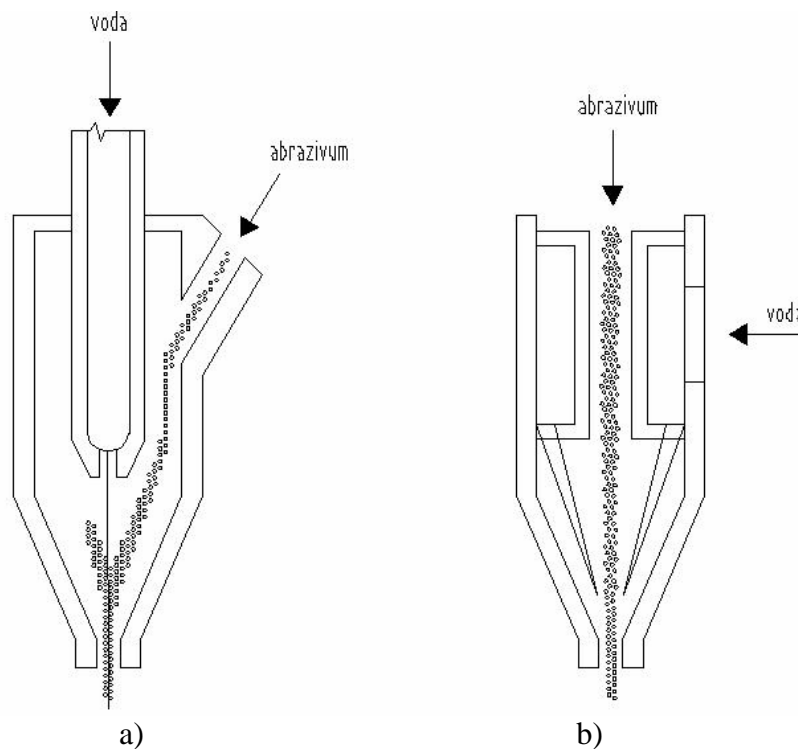
Směšovací komora - Obr.5. ukazuje typy směšovací komory pro abrazivní vodní paprsek s různými typy přívodu abraziva a jeho smísení s vodou.

a) systém s bočním přívodem abraziva

Konstrukce podle obr.5 a) představuje typ směšovací komory, kdy je vysokotlaká voda přiváděna axiálně do směšovací komory a radiálním přívodem je přísáváno abrazivum dodávané ze zásobníku. Hmotnost abraziva je v rozmezí 0,1-2 kg/min. Výhodou je jednoduchá výroba mísící komory.

a) systém s bočním přívodem abraziva

Na obr.5 b) je směšovací komora s axiálním přívodem abraziva a radiálním přívodem vysokotlaké vody. Tento způsob přívodu brusiva zlepšuje jeho smíchání s vodou a tím zmenšuje opotřebení obvodu komory. Tento způsob se používá převážně pro tlaky do 100 MPa. [16]



Obr.5 Míchací komora hydroabrazivního paprsku [16]

Při užití hydroabrazivního paprsku pro dělení materiálů, se v praxi téměř výhradně používá systém s bočním přívodem brusiva. Systém s centrálním přívodem brusiva se užívá při odstraňování starých nátěrů, čištění vodojemů a potrubí a jiných aplikacích. [16]

4.2.4 Systém dálkové dopravy a podávání abraziva

Systém dálkové dopravy abraziva se využívá zejména tam, kde jsou dvě a více řezacích hlav na jednom stole, kde je velká pracovní plocha stolu nebo v provozu, kde je více řezacích stolů. Abrazivo se posouvá pomocí stlačeného vzduchu ze zásobníku potrubím do dávkovačů abraziva, umístěným na supotech řezacích stolů.

Dávkovače mají elektronicky řízené dávkování abraziva, čím se dosahuje lepších řezných parametrů, dále se tím uspoří vlastní abrazivo a pro obsluhu to znamená větší komfort, neboť pouze hlídá signál na doplnění abraziva do systému dálkové dopravy, na což je vždy upozorněna světelným signálem majáku a zvukem klaksonu. [16]

5 APLIKACE VODNÍHO PAPRSKU

Technologie vysokotlakého vodního paprsku je možno použít k zušlechťování materiálů, jejich čištění a nejčastěji k jejich obrábění. Klasický nástroj jako fréza, soustružnický nůž nebo vrták je nahrazen jedním nástrojem a to vodním paprskem.



Obr.6 Aplikace vodního paprsku

Jako konkrétní příklad aplikace technologie vodního paprsku lze uvést instalaci ostřiku ve společnosti Vítkovice Steel Ostrava a.s. Z hlediska zvýšení povrchové kvality válcovaných plechů bylo nutno zmodernizovat **odstraňování okují** během válcování. Nejrozšířenější metodou odstraňování okují v průběhu výrobního procesu hutnického polotovaru je vysokotlaký ostřík vodním paprskem. Vysokotlaký vodní ostřík okují obvykle probíhá při tlakové úrovni 15 až 25 MPa.

Systém vysokotlakého ostřiku umožňuje odstraňovat **primární okuje** z bram v šířce až 1700 mm z horního i spodního povrchu v odokujovači s hydraulicky stavitelnými tryskami horního ostřiku. Odstraňování okují zde probíhá automaticky při provozní tlaku vody až 23 MPa (podle jakosti materiálu) a průtoku vody 54 l/s.

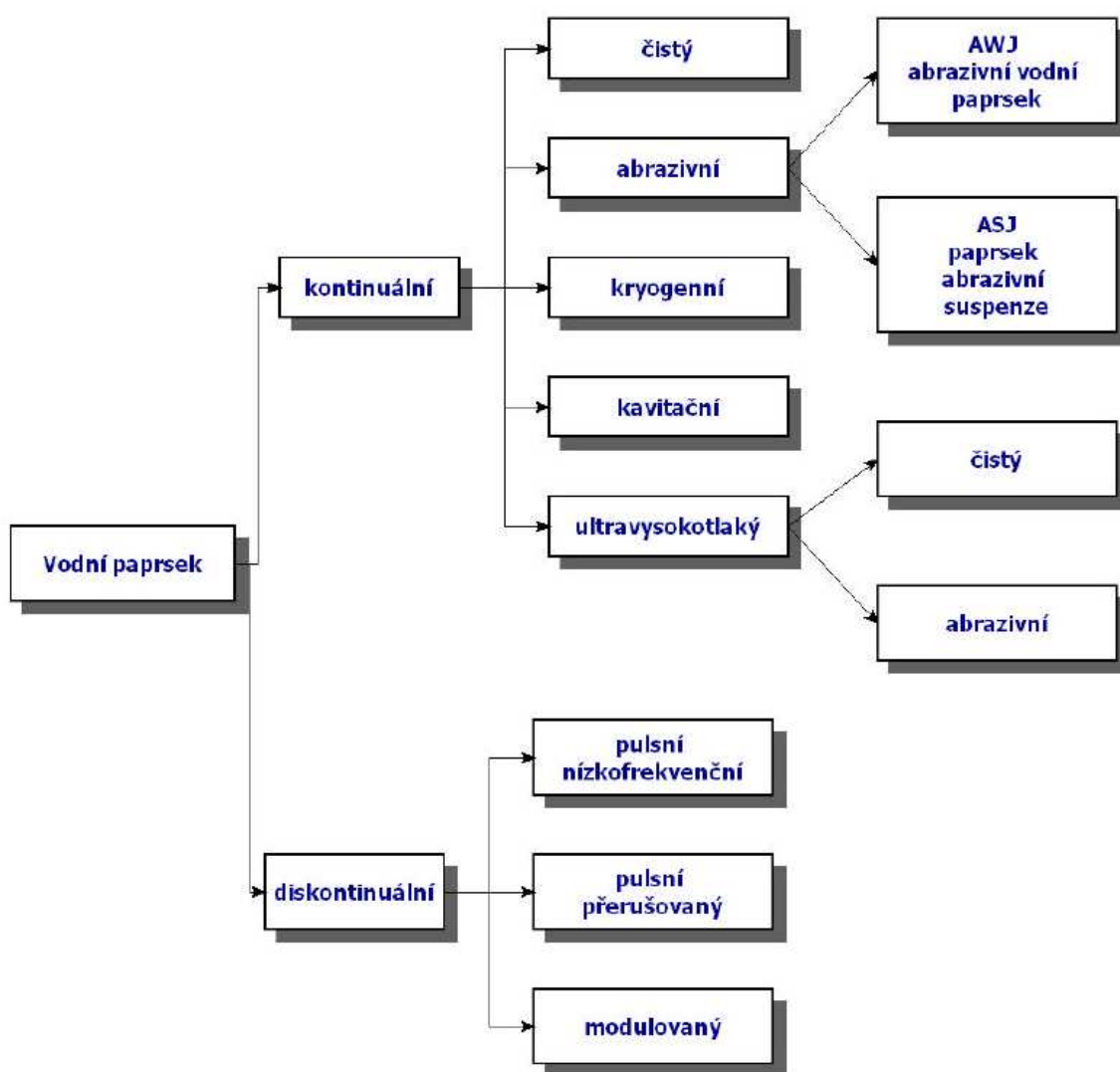
Sekundární okuje z rozvalků v šířce až 3400 mm jsou taktéž odstraňovány z horního a spodního povrchu, a to na obou stranách válcovací reverzní stolice 3,5m kvarto. Poloha horních ostříkových trysek stolice je automaticky stavitelná s horním pracovním a opěrným válcem. Sekundární okuje z rozvalku jsou odstraňovány ve stolici během válcování při provozní tlaku vody až 16,5 MPa při průtoku 90 l/s.

Instalovaný příkon technologie je ve válcovně tlustých plechů 3,5 kvarto pro primární a sekundární ostřík 3200 kW.[3]

6 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ KAPALINOVÝCH PAPERKŮ

Technologie řezání vodním paprskem lze v zásadě rozdělit podle dvou kritérií vodního paprsku. První kritérium je dle přetržitosti paprsku v čase na kontinuální a diskontinuální. Dále lze paprsek dělit podle jeho složení a to na paprsek čistý nebo s použitím abrazivních částic.

Technologie vodního paprsku je progresivní a perspektivní technologií, která se stále vyvíjí. Výzkumy se zaměřují na lepší účinnost řezání a zároveň snižování provozních nákladů. Zkoumají se principy jako kavitace, přidávání částic ledu do vody, zavedení pulzace do kapaliny nebo použití ultravysokých tlaků.



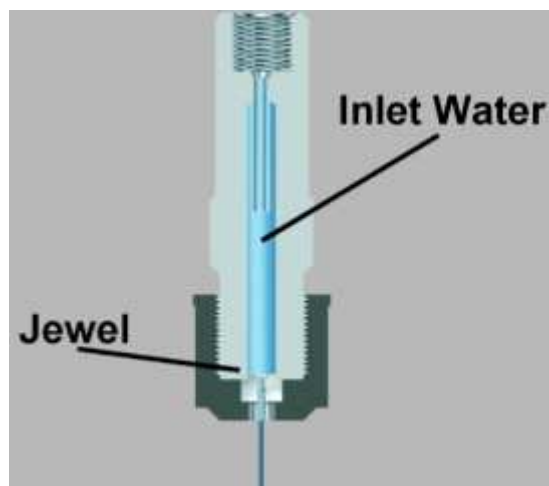
Obr.7 Dělení vodních paprsků[4]

7 KONTINUÁLNÍ PAPERSEK KAPALINY

Kontinuální paprsek kapaliny je charakterizován stálou hladinou energie paprsku po dobu trvání procesu. Je to nejvíce rozšířená metoda pro dělení materiálů a používá se při řezání prakticky všech materiálů. [5]

7.1 ČISTÝ VODNÍ PAPERSEK

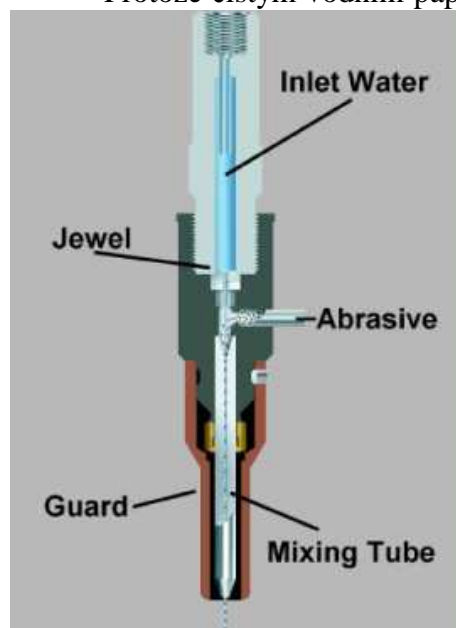
Čistý kontinuální vodní paprsek je prvním paprskem, který se začal používat. Materiál je odebrán nadzvukovým erozivním procesem. Paprsek má vysokou kinetickou energii, která odtrhává částičky materiálu z obrobku. Jeho použití je však omezené, protože nemůže řezat tvrdší materiály jako kovy, sklo nebo tvrdé dřevo. Používá se hlavně pro materiály jako pryž, lepenka, plasty nebo textilie. Pracovní tlak se zde pohybuje v rozmezí 60 – 600 MPa v závislosti na typu řezaného materiálu. Pro zvýšení rychlosti paprsku se používají speciální trysky. Vyrábějí se trysky v rozmezí velikostí 0,2 – 0,5mm. Paprsek vycházející tryskou dosahuje až trojnásobku rychlosti zvuku.



Obr.8 Vznik čistého vodního paprsku [6]

7.2 ABRAZIVNÍ VODNÍ PAPERSEK

Protože čistým vodním paprskem nebylo možno obrábět materiály o vysoké pevnosti, do paprsku vody se začalo přidávat tzv. abrazivo. U čistého vodního paprsku obrábí vysokorychlostní proud kapaliny. U abrazivního, čistý paprsek zrychluje přidávané abrazivní částice a ty obrábí materiál. Řezný proud využije asi 0,2 - 1,5 kg abraziva za minutu. Množství abraziva je přitom závislé na velikosti výstupního průměru trysky, kterou určujeme podle pevnosti řezaného materiálu. Výstupní průměr této trysky je 0,5 - 1,5 mm. Pracovní tlak se zde pohybuje v rozmezí 200 – 600 MPa. Abrazivní řezání je mnohem výkonnější než řezání čistým vodním paprskem, proto lze řezat i velice tvrdé materiály. Tento paprsek se používá pro řezání např.: speciálních slitin titanu, nerezové oceli, kliníku, kompozitních materiálů, tvrdých plastů, Kevlaru, tvrzených skel, Inconelu, keramiky nebo dlažeb.



Obr.9 Vznik abrazivního vodního paprsku [6]

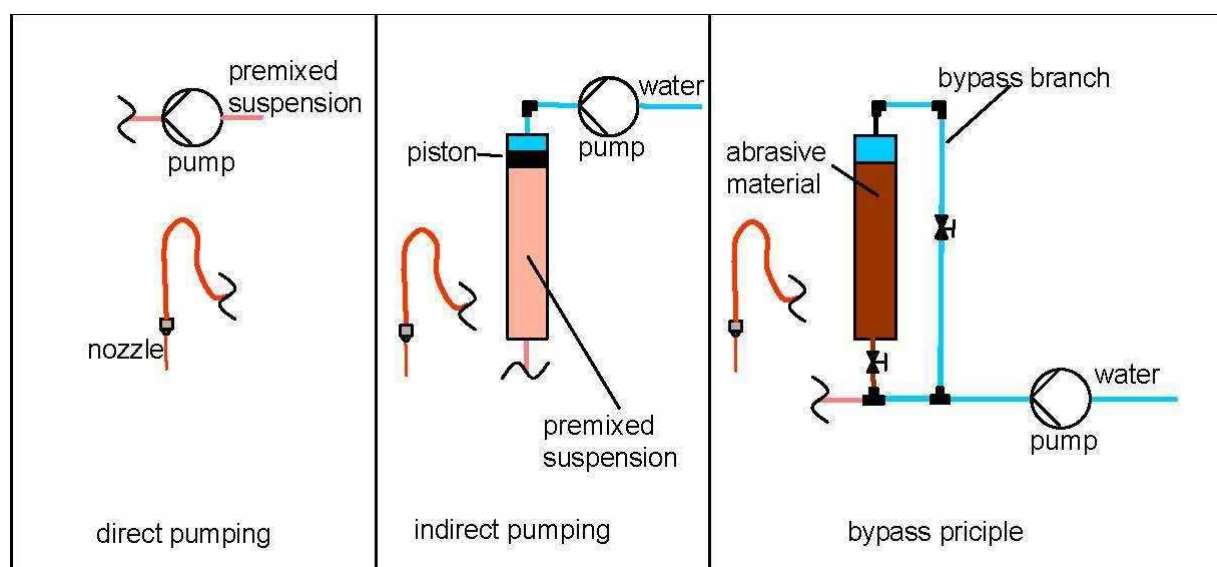
7.2.1 AWJ a ASJ – abrazivní vodní paprsek a paprsek abrazivní suspenze

Abrazivní paprsek lze rozdělit také podle způsobu přívodu brusných zrn do paprsku a vlastního vzniku abrazivního media na **AWJ**, popř. AWIJ-Abrasive Water Injection Jets a **ASJ**- Abrasive Suspension Jets, popř. AWSJ-Abrasive Water Suspension Jets.

AWJ – jsou generovány vodou, která prochází skrz mísící komoru a znovu vstupuje do zaostřovací trysky. V mísící komoře vzniká podtlak, který se využívá k pneumatickému nasátí abraziva do vody.

ASJ – paprsek abrazivní suspenze lze rozdělit na 3 způsoby přiměšování abraziva do media:

- **Direct pumping** - přímé vstřikování (obr.10 vlevo)- vytvoří se suspenze abraziva a media za atmosférického tlaku a poté je nasáta čerpadlem a přímo vedena do řezací trysky a řezu. Jednoduchá metoda, ale prakticky nepoužívaná, protože dochází k velkému opotřebení čerpadla abrazivem.
- **Indirect pumping** – nepřímé vstřikování (obr.10 uprostřed) – tlaková kapalina pohybuje s pístem uvnitř tlakové nádoby a vytlačuje tak předem namíchanou suspenzi abraziva do výstupní trysky. Pro stabilizaci suspenze se používají speciální aditiva. Omezením této metody je limitovaný čas řezu. Ten nám omezuje objem tlakové nádoby-zásobníku abraziva. Nežádoucí je také velké opotřebení pístu a ventilů tlakového systému.
- **Bypass principle** - obtokový princip (obr.10 vpravo) - část toku z čerpadla prochází bypassovou větví do nádoby s abrazivem, kde impulzem vytlačuje abrazivní kaši do mísící komory, zde se dále promíchá s čistým tlakovým paprskem. Tato metoda je také charakteristická omezenou dobou řezu, avšak díky tomu, že v nádobě s abrazivem se nachází čisté abrazivo (ne suspenze), je tento čas daleko delší než u předcházející metody. Další výhodou je, že v tomto případě nepotřebujeme píst nebo armatury k vytlačování abraziva, a tak eliminujeme množství opotřebením otěrem brusných částic. [7]



Obr.10 Generování abrazivních suspenzivních paprsků [7]

Porovnání AWJ a ASJ technologie

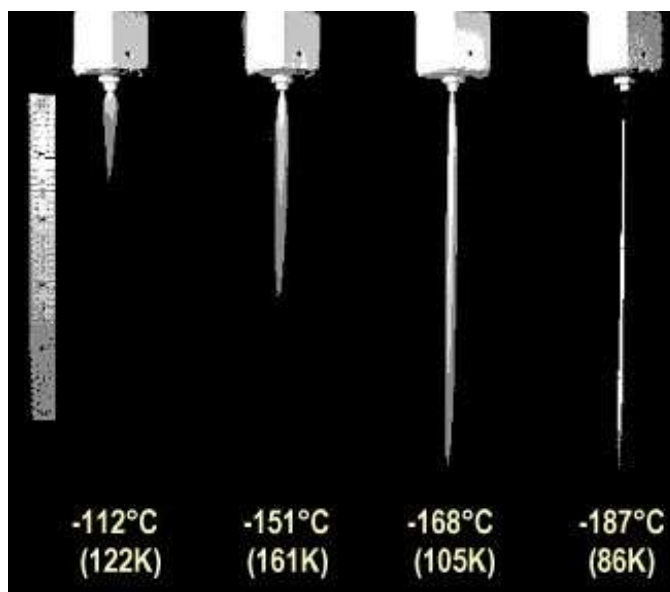
Různý generační mechanismus těchto dvou způsobů se odráží i v jejich vlastnostech. U AWJ je to přidání atmosférického vzduchu do řezu a u ASJ v pracovním tlaku. AWJ paprsek obsahuje asi 95% vzduchu, 4% vody a 1% abraziva, zatímco u ASJ je složení 95% voda, a 5% abrazivo. Proto ASJ technologie je charakterizována účinnějším částicovým akceleračním procesem a vyšší tryskovou stabilitou, která zvyšuje její produktivitu. Naproti tomu je ASJ daleko náročnější na zařízení a tím i nákladnější. Různé vlastnosti AWJ a ASJ rozdělují jejich použití. Na jedné straně vysoká flexibilita AWJ je výhodná pro obráběcí procesy. Na druhé straně je vysoká účinnost ASJ technologie je vhodná k různým čistícím procesům nebo demontážím.

Jako příklad lze uvést demontáž nukleární elektrárny v Kahlu v Německu technologií ASJ. Protože zvýšení pracovního tlaku v devadesátých letech dovolilo zvýšit rychlosti vystupující tryskou, byl tento způsob velice výhodný díky malému množství vstříknuté (a tedy i kontaminované) kapaliny a abraziva do zamořených prostor. [7]

7.3 KRYOGENNÍ VODNÍ PAPERSEK

Technologie založená na jiném pracovním médiu než vodě. Využívá se tekutého dusíku (LN₂), který pracuje v podobném systému jako klasický vodní paprsek. Je zde ale nutno použít rezervoár předchlazeného dusíku, dochlazovačů a dalších nezbytných komponent. Všechny součásti systému musí být navrženy pro provoz ve velmi nízkých teplotách až do -190°C. Ukázalo se, že čím je nižší teplota dusíku, tím účinněji paprsek řeže. Při teplotě vyšší než -151°C se dusík začne odpařovat příliš brzy, a tak ztrácí řezný výkon. Při teplotě -190°C už má však paprsek stejný výkon jako při řezání klasickým VP. Velkou výhodou této metody je šetrnost k životnímu prostředí díky vypařování řezného media a tím eliminaci odpadu.

Kryogenní vodní paprsek se používá všude tam, kde nelze použít klasický vodní paprsek, jako například u chemicky reaktivních materiálů, materiálů nesnášejících vodu nebo při použití v kontaminovaných prostředích.



Obr.11 Několik paprsků LN₂ za různých teplot 55MPa [8]

7.4 KAVITAČNÍ VODNÍ PAPERSEK

Způsob založený na principu kavitace. Kavítace (z latinského *cavitas*-dutina) je vznik dutin v kapalině při lokálním poklesu tlaku, následovaný implozí. Kavítace je nejprve vyplněna vakuem, později do ní mohou difundovat plyny okolní kapaliny. Při vymizení podtlaku, který kavítaci vytvořil její bublina kolabuje za vzniků rázové vlny s destruktivním účinkem na okolní materiál, čehož se při této technologii využívá. Tento způsob však není v praxi rozšířený. Nehodí se pro přesné řezy, protože kavítací bubliny v paprsku vznikají nepravidelně. [9]

7.5 ULTRAVYSOKOTLAKÝ VODNÍ PAPERSEK

Rozhodujícím faktorem pro vysoký řezný výkon jsou tvar a rychlost vodního paprsku. Fyzikální zákony říkají, že vyšší tlak zvyšuje energetickou vydatnost "vodního řezného nástroje" se současnou redukcí průměru vodního paprsku a spotřeby vody. Nová technologie "HyperPressure" používá tento efekt, aby značně zlepšila řezání při použití stálého pracovního tlaku 600 MPa. Produktivita se tím výrazně zvýší a náklady na jeden díl se sníží.

Tento systém prošel testováním už v mnoha praktických aplikacích. Hlavními cíli tohoto nového vývojového kroku bylo nejen zvýšení kvality řezání, ale zejména snížení času řezání a nákladů na jeden kus. Technologie HyperPressure tím v podstatě stanovila nové průmyslové standardy v oboru.

Tlak vody, který je téměř o 50 % vyšší než u stávajících systémů, není cílem sám o sobě, ale je fyzicky, technologicky a zejména ekonomicky účelný. Je to proto, že čím vyšší je tlak vody v dýze, tím vyšší je kinetická energie (rychlost) paprsku. Tudiž je v mnoha případech možné, při použití zařízení pracujících s tlakem 600 MPa, velmi zredukovat množství abraziva dodávaného do řezného procesu. Důsledkem je snížení jeho spotřeby, což se vyplatí, protože abrazivní písek je výraznou nákladovou položkou. Současně s tím je dosaženo snížení spotřeby vody v porovnání s konvenčními systémy, pracujícími s 380 MPa. Vyšší energetická vydatnost paprsku také zvyšuje řezný výkon a kvalitu řezné hrany. Pro uživatele to znamená následující: díky rychlejšímu vodnímu paprsku je možné řezat přesněji s nižší spotřebou abrazivního písku, přičemž ještě navíc snížíme spotřebu vody. Řezná rychlost vzroste od 30 do 50 %, zvýší se produktivita a náklady na jeden díl se sníží. Cena zařízení pro řezání těmito tlaky ovšem několikanásobně předčí standardní stroje pro řezání vodním paprskem, protože při použití extrémně vysokých tlaků jsou samozřejmě kladeny i extrémní nároky na kvalitu komponent systému jako jsou těsnění, vysokotlaké čerpadlo nebo vedení média. [10]

8 DISKONTINUÁLNÍ VODNÍ PAPERSEK

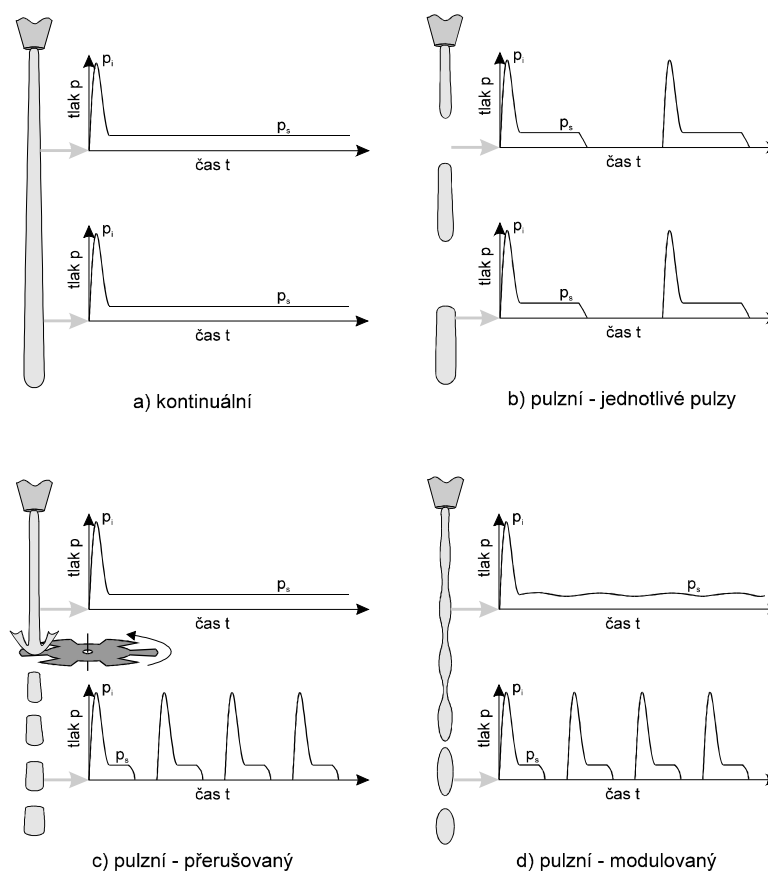
Diskontinuální vodní paprsek je charakterizován proměnnou hladinou energie paprsku po dobu trvání řezného procesu. Cílem je zvětšení účinnosti vodního paprsku zavedením přídatné energie do paprsku nebo využití principu impaktního tlaku.

Teoretickým rozbohem nárazu vodního paprsku na povrch rozpojovaného materiálu je možno dokázat, že impaktní tlak p_i generovaný dopadem sloupce kapaliny je značně vyšší než odpovídající tlak stagnační p_s generovaný dopadem kontinuálního proudu kapaliny. Poměr impaktního tlaku k tlaku stagnačnímu je možno v nejjednodušší formě vyjádřit následovně:

$$\frac{p_i}{p_s} = \frac{2C_0}{V_0} \quad (3)$$

kde p_i je impaktní tlak, p_s je stagnační tlak, C_0 je rychlost zvuku v kapalině a V_0 je rychlost dopadajícího paprsku.

Tudíž, pokud by bylo možno rozčlenit kontinuální paprsek na vzájemně oddělené sloupce vody, výsledný pulzní paprsek by v důsledku působení impaktního tlaku mohl mít značně vyšší výkonnost při rozpojování velmi pevných hornin a podobných materiálů. Navíc je možno očekávat, že také další účinky vyvolané dopadem pulzního paprsku (jako např. zvýšená penetrace paprsku a následná propagace trhlin v rozpojovaném materiálu, únavové namáhání materiálu, atd.) mohou poskytnout nové metody pro řezání a rozpojování velmi pevných a křehkých materiálů. [11]



Obr.12 Znáornění jednotlivých typů paprsků a průběhů tlaků, při dopadu na materiál [11]

8.1 PULZNÍ NÍZKOFREKVENČNÍ VODNÍ PAPERSEK

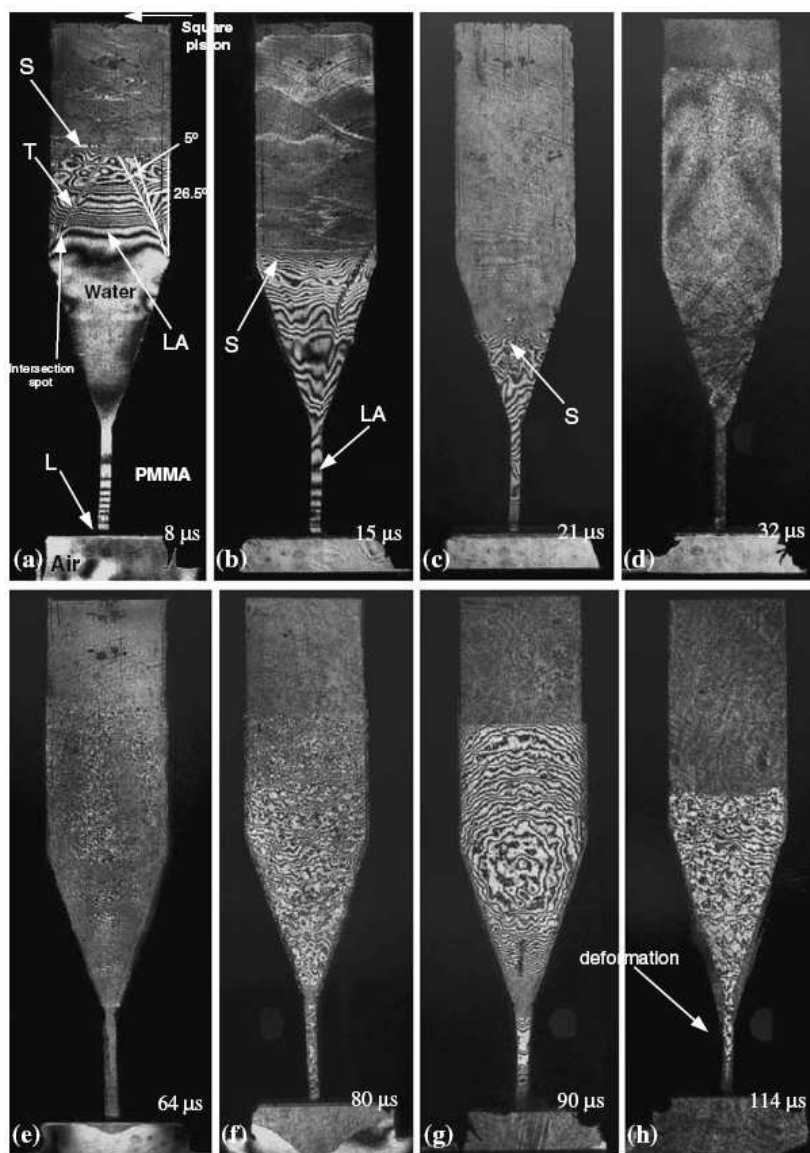
Pulzní paprsek je vytvořen jednotlivými sloupci vody, které při dopadu na materiál dosáhnou impaktního tlaku, který je několikrát větší než stagnační tlak, poté se sníží tlak na hodnotu stagnačního tlaku. Po odeznění dopadu sloupce vody tlak klesá na nulu. Takovéto cykly zatěžování se opakují v závislosti na rychlosti s jakou jsme schopni generovat tyto pulzy. (viz Obr.12 b).

8.1.1 Zařízení pro generaci jednotlivých pulzů paprsku:

1.Nárazové zařízení - dvoustupňové:

Zařízení se skládá z tzv. tlakovací nádoby, ve které je těžký ocelový píst poháněný stlačeným médiem (například vodíkem). Tlakovací nádoba je připojena přes membránu k odpalovacímu potrubí. Pokud tlak pod zrychleným ocelovým pístem dosáhne kritické

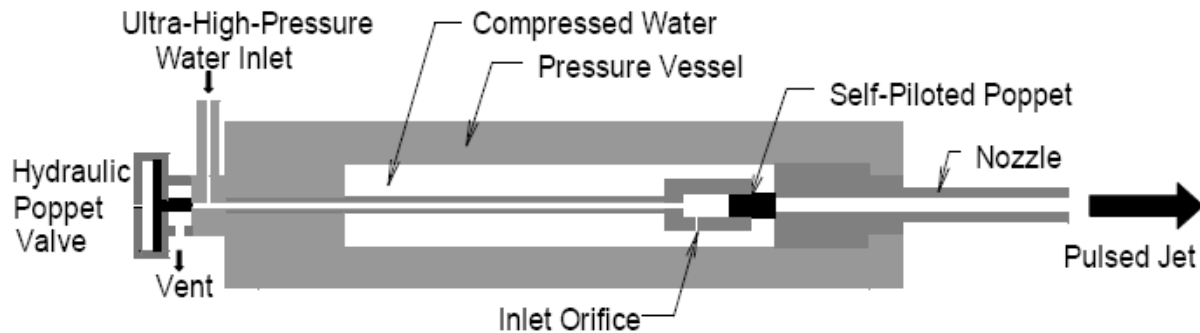
hodnoty, membrána praskne a natlakovaný vodík pohání menší píst vyrobený z polykarbonátu směrem k vodní hladině. Projektil narazí na hladinu, a tím vytvoří v kapalině rázovou vlnu. Výzkumy ukázaly, že toto zařízení je schopno vyvinout nárazový tlak až 12,4 GPa. Tato hodnota byla měřena speciálním zařízením využívající skelného vlákna o průměru 0.1 mm a odezvě 100MHz zabudovaného do ústí trysky a napojeného na osciloskop a hydrofon.



Obr.13 Sekvenční holografický interferogram napětové vlny v ocelové stěně a nárazová vlna uvolněná ve vodě při nárazové rychlosti $v_p=362\text{m/s}$ v čase: a) $8\mu\text{s}$; b) $15\mu\text{s}$; c) $21\mu\text{s}$; d) $32\mu\text{s}$; e) $64\mu\text{s}$; f) $80\mu\text{s}$; g) $9\mu\text{s}$; h) $114\mu\text{s}$; [12]

2. Hydraulický generátor pulzací:

Princip činnosti pulzního generátoru je ukázán na obr. 14. Pulzní generátor se skládá z tlustostěnné tlakové nádoby, která je osazena odlehčovacím rychloventilem. Tento ventil ovládá celý pulzační systém. Vysokotlaká voda je přivedena do komory nacházející se za samoovládacím ventilem a je clonou propojena se zbytkem tlakové vody ve válci. Pohyb samoovládacího ventilu je způsoben změnami tlaků v komorách.



Obr.14 Schéma hydraulického generátoru pulzací [13]

Nejdříve celý systém natlakujeme vodou o tlaku 300 MPa, poté skokové otevření rychloventilu na malý okamžik způsobí pokles tlaku v komoře za samoovládacím ventilem. Díky tlakové ztrátě na cloně, dojde k otevření samoovládacího ventilu a je tak vytvořen pulz kapaliny. Jakmile se však rychloventil uzavře, za samoovládacím ventilem vznikne přetlak díky dodávce vysokotlaké vody z čerpadla a ventil je uzavřen. Frekvence pulzního paprsku při použití tohoto generátoru je 1 Hz. Tato frekvence je závislá hlavně na rychlosti otevírání a uzavírání rychloventilu. Ten může být ovládán pneumaticky.

Tyto pulzní generátory byly vyvinuty pro neexplozivní vyhlubování pevných hornin. Explozivní způsob je sice velice účinný, ale transport, skladování a manipulace s vysoce výbušnými látkami je poměrně nebezpečná. Trhaviny také vytvářejí toxické výpary, které mohou představovat nebezpečí ve špatně větraných místech. Největší doposud vytvořený stroj uvolňoval energii 250 kJ díky trysce o průměru 25mm. Toto zařízení bylo schopno vytěžit 0,5 tuny pevné horniny jedním pulzem. [13]

3. Zařízení vytlačující pulzy tlakem:

Zařízení vytlačující pulzy tlakem (známé též jako zesilovače tlaku s různým poměrem ploch), jsou v podstatě přetržitě pracující multiplikátory. Paprsek je v těchto zařízeních vytvářen pomocí stlačeného vzduchu, který pohání nízkotlaký píst, přímo spojený s vysokotlakým pístem mnohem menšího průměru, který stlačuje vodu a vytlačuje ji tryskou ven. Výsledný paprsek je charakterizován dlouhou dobou trvání a velkým objemem kapaliny obsaženým v jednom pulzu. Celková účinnost zařízení vytlačujících pulzy tlakem je mnohem vyšší (až 90%) v porovnání se zařízeními nárazovými a rovněž jejich rozměry a hmotnost jsou přijatelnější. [11]

8.2 PULZNÍ PŘERUŠOVANÝ VODNÍ PAPERSEK

Pulzní přerušovaný paprsek se od předchozího liší hlavně jiným principem vzniku a to v přerušování kontinuálního paprsku ihned za výstupem z dýzy. Děje se tak pomocí buď rotujících kotoučů nebo laseru. Nevýhodou tohoto typu paprsku je ztráta energie části vodního paprsku vlivem přerušování.

1. Mechanicky přerušovaný paprsek:

Přerušovaný paprsek vzniká periodickým přerušováním kontinuálního paprsku rotujícím kotoučem se zářezy nebo zuby. Na rozpojovaný materiál dopadají jednotlivé části paprsku. Na vlastnosti pulzů má vliv velikost a poloha otvorů v přerušovacím kotouči a jeho otáčky. Protože rotující kotouč část energie odráží zpět, dochází k energetickým ztrátám, proto také tento způsob nemá podstatné využití v praxi.

2. Přerušovaný paprsek pomocí pulzního laseru:

Pokud si představíme, že kontinuální paprsek je vlastně kontinuální válec vody pohybující se určitou rychlostí, potom je možno uvažovat o možnosti vytvořit pulzní paprsek odstraněním částí tohoto válce. Podle koncepčního návrhu vytvořeného Mazurkiewiczem [1983] by bylo teoreticky možné odpařit část paprsku jeho 'ostřelováním' pomocí pulzního laseru a tak vytvořit pulzní paprsek. Mazurkiewicz zjednodušeným výpočtem stanovil výkon laseru, který by bylo zapotřebí pro vytvoření takového pulzního paprsku. Tento výpočet však naznačuje, že např. pro rozčlenění kontinuálního paprsku o průměru 1 mm a pohybujícího se rychlostí 500 m/s by bylo zapotřebí výkon laseru zhruba 2 MW. Ze zřejmých důvodů tedy nejsou předloženy žádné výsledky a tento způsob generování pulzních paprsků nemá praktický význam. [11]

8.3 MODULOVANÝ VODNÍ PAPERSEK

Podstata modulovaného vodního paprsku spočívá v proměnné rychlosti jednotlivých částí paprsku. Vlivem toho dochází k rozpadu paprsku v určité tzv. rozpadové vzdálenosti od trysky. Výhodou této metody je, že nedochází ke ztrátě energie a nevznikají rázy ani extrémní změny reaktivních sil jako je tomu u předchozích dvou případů.

Modulaci paprsku lze provést *vnitřním mechanickým modulátorem průtoku*, pomocí *rezonátoru* nebo využitím *ultrazvukové modulace*.

8.3.1 Vnitřní mechanické modulátory průtoku:

Byly prováděny experimenty s mechanickými zařízeními včleněnými do trysky, pomocí kterých bylo snahou dosáhnout modulace paprsku. Základem byl rotor s drážkami umístěný před ústím do trysky. Otáčením cyklicky měnil průtokový odpor vody a moduloval tak rychlost paprsku vystupujícího paprsku z trysky. Bylo dosaženo povzbudivých výsledků, ale největším problémem zůstala malá životnost pohyblivých částí trysky. [11]

8.3.2 Rezonátory:

Protože mechanické modulátory dosahovaly dobrých výsledků, ale doba jejich provozu byla značně omezena, byl zahájen vývoj technologie, která by nepoužívala pohyblivých částí. Rezonátory jsou založeny na změnách průtočného průřezu trysky nebo diskontinuity v toku. Tyto prvky v trysce vytváří periodické fluktuace tlaku.

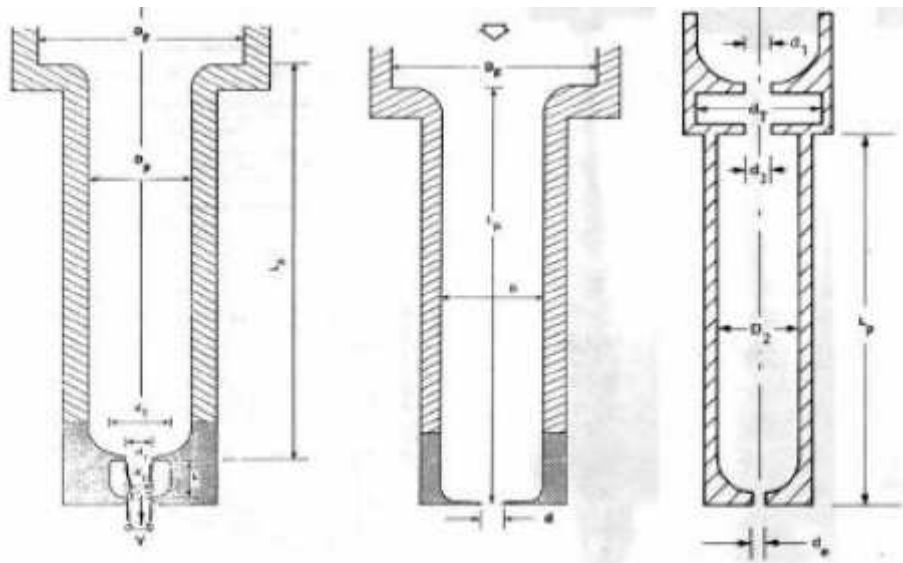
Na tomto fyzikálním principu pracují tzv. samorezonující trysky. Při průtoku kapaliny přes výstup rezonující trubice se vytváří určitý druh rázového tlaku, který je veden zpět na vstup trubice, kde sčítáním s tlakovými pulzy vytváří stojaté vlnění. Odpovídá-li frekvence rázového tlaku přirozené frekvenci toku, nastane tlaková rezonance a paprsek začne vytvářet diskrétní prstencové víry, vedoucí k vytváření kavitace nebo pulzů. [11]

Bezrozměrný parametr definující charakteristiky každé rezonanční soustavy je Strouhalovo číslo (St). Pro trysky je možné určit z následujícího vztahu:

$$St = \frac{f \cdot d}{V_m} \quad (4)$$

kde f je rezonanční frekvence, d je průměr trysky a V_m je střední (průměrná) rychlost paprsku na výstupu z trysky.

Rozebory charakteristik pulzů ukázaly, že optimální výkon takovýchto trysek by měl nastat pro Strouhalovo číslo v rozsahu $0,3 < St < 1,2$.



Obr.15 Vybrané druhy rezonátorů pro modulaci vodního paprsku [14]

Praktické aplikace rezonátorů:

Takto modulovaný paprsek má poměrně malé procento modulace a proto se nevyužívá pro řezání ocelí a dalších kovových materiálů. Svoje uplatnění však nachází při čištění povrchů, rozrušování hornin a dekontaminačních procesech.

- **Odstraňování nátěrů** - využití této technologie bylo podporováno námořnictvem USA pro čištění vrstev barev částí letadel, které byly vyrobeny z kompozitního materiálu a vystaveny velkému namáhání, proto nebylo vhodné použít stávající stírací chemickou metodu. Hlavním cílem bylo nepoškodit podkladový materiál. Pracovní tlak systému byl 37,2 MPa a rychlost vodního paprsku asi 250 m/s.
- **Rozrušování hornin** - tímto způsobem je možné rozrušovat vápenec a podobné materiály s daleko vyšší efektivitou v porovnání s kontinuálním vodním paprskem. Například při průměru trysky 2,6 mm a fluktuaci tlaku 44,8 MPa byl odebraný objem materiálu 15,4cm³/s.
- **Dekontaminace**- požadavek v tomto odvětví byl co nejrychleji a s co nejmenším objemem vody očistit zamořená vojenská vozidla. Byly prováděny testy a ukázalo se, že v porovnání s vodním paprskem bez Hemholtzovy rezonanční komory a s ní má pulzní paprsek téměř o 100% větší účinnost. Porovnání je v tabulce č.1.

Nozzle:	Leach and Walker	SERVOJET
Diameter mm (in.) :	3,9 (0,085)	2,6 (0,101)
Total Δp MPa (ksi) :	37,2 (5,4)	44,8 (6,5)
Nozzle Δp MPa (ksi) :	37,2 (5,4)	39,3 (5,7)
Power kW (hp) :	35,3 (47,3)	45,8 (61,4)
Slot width mm (in.) :	8,1 (0,32)	15,7 (0,52)
Slot depth mm (in.) :	9,9 (0,39)	9,7 (0,38)
Volume removal rate cm ³ /s (ft ³ /hr) :	8,2 (1,04)	15,4 (1,96)
Effectiveness cm ³ /kW-hr (ft ³ /hp-hr) :	840 (0,022)	1220 (0,032)

a)

b)

Tabulka 1. Porovnání parametrů paprsků pro dekontaminaci: a)bez rezonanční komory
b)s rezonanční komorou [14]

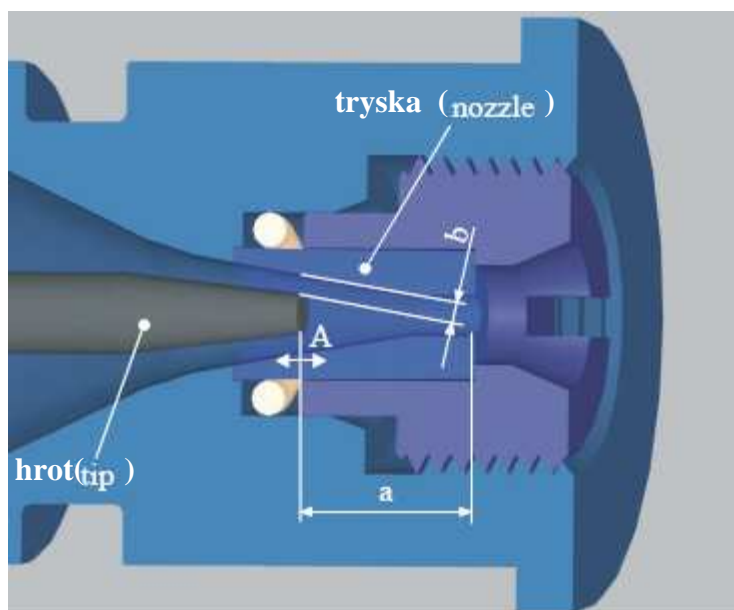
8.3.3 Ultrazvuková modulace vodního paprsku:

Nejperspektivnějším způsobem generování pulzních paprsků z hlediska praktického využití je ultrazvuková modulace kontinuálního paprsku. Modulovaný paprsek se formuje do pulzů až po výstupu z trysky působením relativně malé modulace (pouze několik %) a systém pro generování modulovaného paprsku tedy netrpí účinky hydraulického rázu a extrémními změnami reaktivní síly, jak je tomu u předchozích pulzních systémů. Navíc modulace paprsku umožňuje generovat pulzní paprsek s frekvencí řádově desítky tisíc pulzů za sekundu, což značně přispívá k únavovému porušování rozpojovaného materiálu.

8.3.3.1 Princip generace ultrazvukové modulace vodního paprsku:

Ultrazvuková modulace vodního paprsku je v podstatě vytvářena podélnými vibracemi ultrazvukového nástroje umístěného v trysce. Takto vytvořené podélné vibrace jsou generovány v ultrazvukovém měniči a z měniče do vody v trysce se přenášejí prostřednictvím přenosové linky skládající se z vlnovodu a transformátoru rychlosti (ultrazvukového nástroje).

Příklad provedení ultrazvukové trysky je na obr.16. Ultrazvuková modulace paprsku je vytvářena vibrujícím hrotem ultrazvukového transformátoru rychlosti umístěného uvnitř trysky. Hrot vibruje axiálně s frekvencí f a amplitudou A tak, že vzdálenost a i mezera b se periodicky mění z minimálních na maximální hodnoty. Amplituda vibrací hrotu UZ nástroje závisí na faktoru zesílení přenosové linky, jejích energetických ztrátách a na amplitudě vibrací měniče. [15]



Obr.16 Schéma uspořádání ultrazvukové trysky [15]

8.3.3.2 Rozpadová délka modulovaného vodního paprsku:

Pro nejefektivnější využití modulovaného vodního paprsku je nutné znát jeho parametry modulace a procesu shlukování zejména rozpadovou délkou.

Byla proto teoreticky stanovena konfigurace povrchu modulovaného paprsku $r_0(x, t)$ podél osy paprsku v libovolné vzdálenosti x . Za předpokladu vodního paprsku vystupujícího z trysky o poloměru R rychlostí $v(0, t)$ (viz. obr.17 a), která je konstantní po celém průřezu trysky, ale periodicky se mění kolem střední hodnoty V_m a můžeme ji vyjádřit jako:

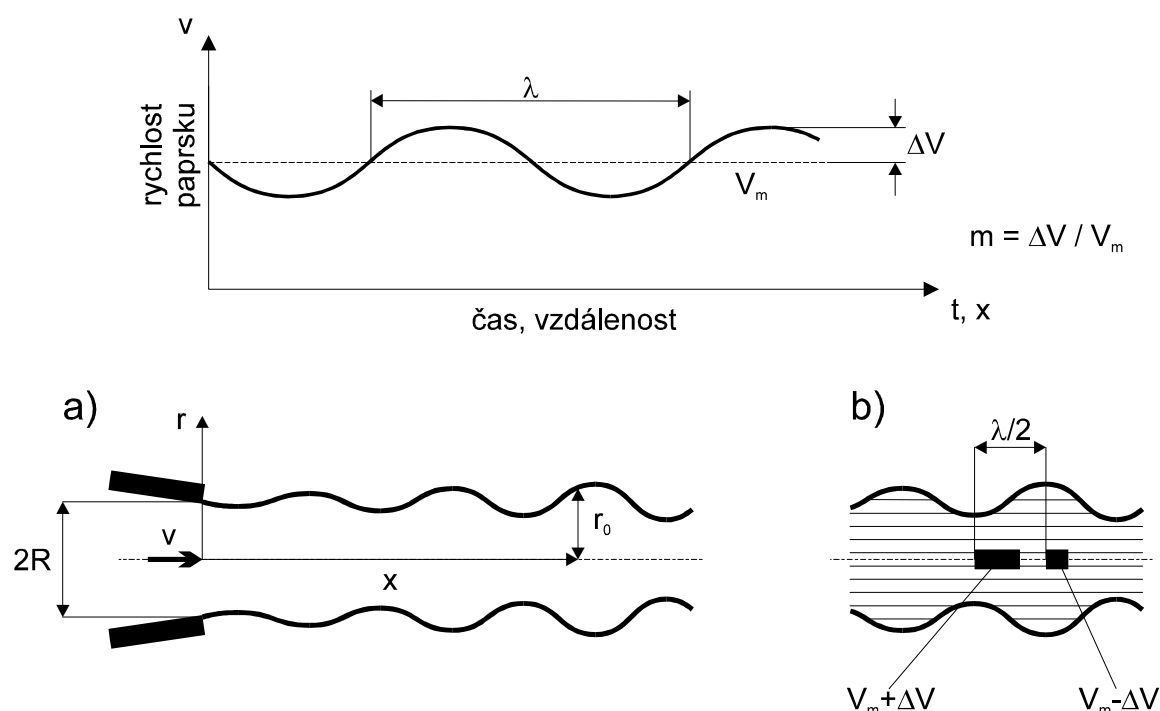
$$v(0, t) = V_m + \Delta V \sin 2\pi ft \quad (5)$$

kde V_m je průměrná výstupní rychlost, ΔV a f jsou amplituda a frekvence modulace rychlosti paprsku. [11]

Za předpokladu osově symetrického paprsku bez vírů a za předpokladu, že axiální rychlostní profily jsou v jednotlivých průřezech paprsku konstantní, byla formulována rovnice kontinuity a pohybové rovnice pro modulovaný vodní paprsek. Z jejich řešení vyplývá vztah pro poloměr vodního paprsku:

$$\frac{r_0}{R} = 1 + \pi m \frac{x}{\lambda} \cos(2\pi ft) \quad (6)$$

kde r_0 je poloměr paprsku ve vzdálenosti x od trysky, poměr modulae rychlosti $m = \Delta V/V_m$ a t je čas odpovídající vzdálenosti x . [11]

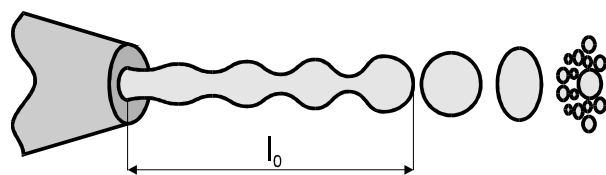


Obr. 17 Parametry (a) modulae vodního paprsku a (b) procesu shlukování [11].

Rovnice (6) ukazuje, že se průměr paprsku s rostoucí vzdáleností od trysky cyklicky mění s amplitudou zvětšující se po každém cyklu. V určité vzdálenosti od výstupu z trysky se paprsek stává řadou diskretních shluků vody (viz obr.18). Tato vzdálenost - rozpadová délka paprsku l_0 - je následující:

$$l_0 = \frac{V_m}{\pi m f} \quad (7)$$

Rozpadová délka paprsku je tedy přímo úměrná průměrné rychlosti paprsku a nepřímo úměrná poměru modulae rychlosti a frekvenci. Jinak řečeno, rozpadovou délku paprsku je možno redukovat zvýšením frekvence a poměru modulae rychlosti anebo snížením průměrné rychlosti paprsku.



Obr. 18 Rozpadová délka paprsku l_0 [11]

8.3.3.3 Frekvence modulace:

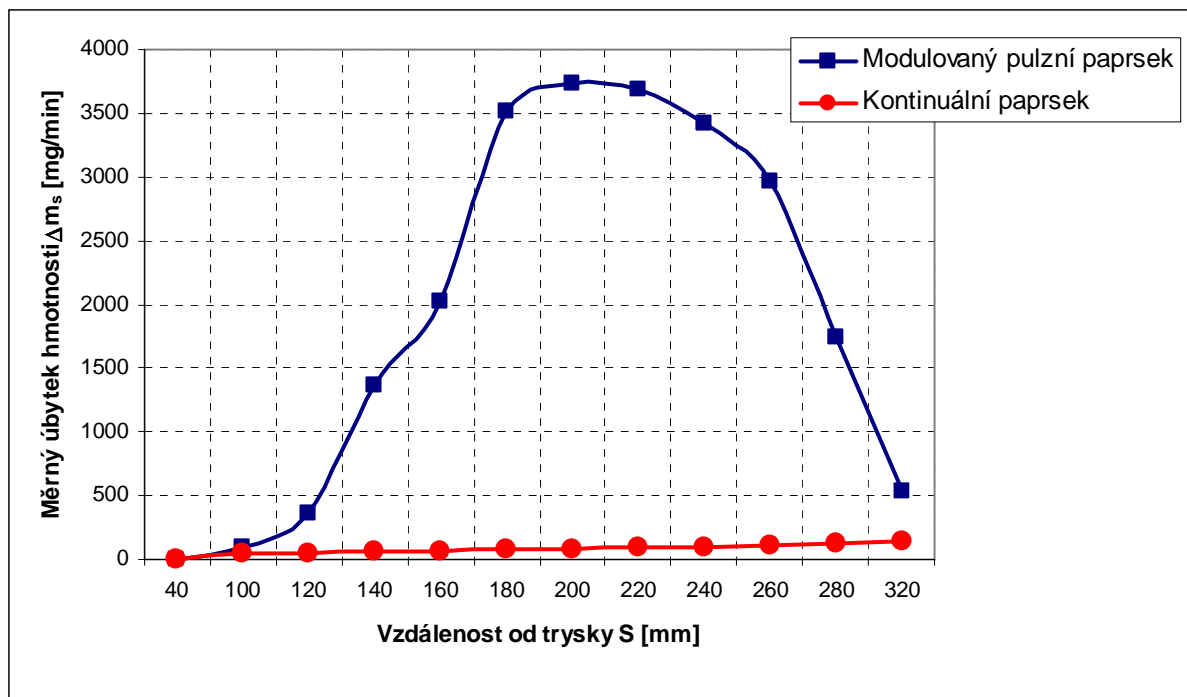
Důležitým faktorem pro rozpad a řezný výkon paprsku je frekvence modulace. Frekvence modulace musí být navržena tak, aby byla schopna v paprsku generovat dostatečně velkou amplitudu pro rozpad spojitého paprsku. Výzkum ukázal, že amplituda dosahuje nejvyšších hodnot při Strouhalově čísle $St = 0,3$.

Optimální frekvence (nebo Strouhalovo číslo) lze určit pomocí:

- **kritéria relaxace** – čas mezi nárazy shluků na rozpojovaný materiál by měl být dostatečně dlouhý, aby byla umožněna plná relaxace energie předchozího shluku.
- **kritéria utlumení** - čas mezi nárazy shluků na rozpojovaný materiál by měl být dostatečně dlouhý, aby nedocházelo k útlumu energie narážející kapky na materiál vlivem přítomnosti kapaliny od předešlého shluku.
- **aerodynamického kritéria** - ihned po vzniku shluku kapaliny začnou na tento shluk působit třecí síly od okolního prostředí a tyto nutí shluk k rozpadu. Účinky aerodynamického odporu budou redukovány, pokud bude mít každý shluk tendenci chránit shluk následující. Vhodné je umístit rozpojovaný materiál do vzdálenosti od trysky, kde dochází k rozpadu shluků. [11]

8.3.3.4 Porovnání výkonnosti modulovaného a kontinuálního VP

Porovnání výkonnosti obou typů paprsku je znázorněno na obr. 19. Závislost měrného úbytku hmotnosti Δm_s , na vzdálenosti trysky od materiálu ukazuje, že modulovaný paprsek se až do rozpadové vzdálenosti od trysky chová jako paprsek kontinuální. Poté se rozdělí na jednotlivé shluky kapaliny. Vlivem působení impaktního tlaku dochází k rapidnímu nárůstu výkonnosti. Se zvyšující se vzdáleností od trysky pak dochází k postupnému rozpadu shluků na drobné kapičky a výkonnost klesá, až se v určité vzdálenosti se vyrovnává výkonnosti kontinuálního paprsku. [4]



Obr.19 Porovnání výkonnosti modulovaného a kontinuálního paprsku na litinovém vzorku [4]

Poznatek, že modulovaný paprsek dosahuje maximální výkonnosti až v určité vzdálenosti od trysky je velice důležitý. Modulovaný paprsek lze proto s výhodou použít ve špatně přístupných místech a nerovných plochách, což usnadňuje práci oproti použití kontinuálního vodního paprsku.

V laboratořích Ústavu geoniky Akademie věd České republiky v Ostravě byly prováděny zkoušky při rozpojování horninových a kovových materiálů modulovaným a kontinuálním vodním paprskem.

Zkoušky byly provedeny na vzorcích uhlíkové oceli a mosazi při tlaku vody 40 MPa, průměru trysky 1,98 mm, vzdálenosti vzorku od ústí trysky 140 mm, rychlosti řezání 30 mm.min⁻¹ a výkon UZ zdroje byl 630W. Konkrétní výsledky měření pro typy paprsku jsou v tabulkách 2 a 3. [4]

Tabulka 2.

materiál: Uhlíková ocel	
typ paprsku:	měrný úbytek hmotnosti vzorku [mg.min ⁻¹]
modulovaný	705,7
kontinuální	19,3

Tabulka 3.

materiál: Mosaz	
typ paprsku:	měrný úbytek hmotnosti vzorku [mg.min ⁻¹]
modulovaný	1077,6
kontinuální	1,6

Výsledky ukázaly, že modulovaný vodní paprsek je schopen řezat i kovové materiály při nízkém tlaku okolo 40 MPa, zatímco kontinuální vodní paprsek dokáže řezat až při tlacích o řád vyšších.

9 ZÁVĚR

Tato práce je zaměřená na problematiku využití technologie vodního paprsku k obrábění materiálů. Část práce je věnována historii a vývoji této nekonvenční technologie obrábění. Obsahem práce je postupné rozdělení druhů vodních paprsků, popsán způsob jakým jsou vytvářeny a jejich využití v praxi. Pozornost je věnována zejména využití a popisu tzv. pulzujícího paprsku. Největší potenciál má ultrazvukem modulovaný pulzující vodní paprsek, protože dokáže pracovat při nízkých tlacích se stejnou výkonností jako kontinuální vodní paprsek. Není třeba pořizovat velmi drahé zařízení pro generaci a vedení vysokotlakého média. Tím se technologie zlevňuje i navzdory nárokům na pořízení systému pro modulaci vodního paprsku, který dokáže vytvořit až desítky tisíc pulzů za sekundu. Další výhoda pulzujícího vodního paprsku je jeho šetrnost k životnímu prostředí, protože odpadá nutnost použití abraziva. U tažných materiálů vzniká při řezu drsnější povrch a proto se tento způsob nepoužívá pro přesné řezání. Je využíván hlavně pro rozrušování tvrdých horninových materiálů, betonu a v čištění.

Modulovaný vodní paprsek teprve v posledních letech nachází komerční využití. Existuje však velice málo firem, které by využívaly nebo vyráběly systémy na tomto principu. Jednou z nich je VLN Technologies Inc. se sídlem v Ottawě, která vyrábí pulzní generátory pro čištění povrchů. Dalším z mála pracovišť zabývajících se výzkumem a vývojem pulzního paprsku je Ústav geoniky Akademie věd České republiky v Ostravě.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] DVOŘÁKOVÁ, Jana, DVOŘÁK, Jaromír. Frézování a gravírování nekonvenční technologií AWJ. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2007, č. 4 [cit. 2009-04-10]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/frezovani-a-gravirovani-nekonvencni-technologie-awj>>.
- [2] OLSEN, John. *Software for abrasive water jet machines* [online]. 2003, 13.3.2003 [cit. 2009-04-10]. EN. Dostupný z WWW: <http://www.thefabricator.com/WaterjetCutting/WaterjetCutting_Article.cfm?ID=358>.
- [3] Odstraňování okují vysokotlakým vodním paprskem. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2002, č. 4 [cit. 2009-04-10], s. 44-44. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/odstranovani-okuji-vysokotlakym-vodnim-paprskem>>.
- [4] VESELÝ, Radek. *Řezání materiálu vodním paprskem*. [s.l.], 2008. 44 s. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí bakalářské práce Ing. Vladimír Habán.
- [5] DVOŘÁKOVÁ, Jana, DVOŘÁK, Jaromír. Echnologie WJM/AWJ pro řezání pevných materiálů vodním paprskem II.. *Glassrevue* [online]. 2008 [cit. 2009-04-10]. Dostupný z WWW: <<http://www.glassrevue.com/news.asp?nid=6709&cid=6>>.
- [6] STAFF. *Basic waterjet principles* [online]. 2009 [cit. 2009-04-17]. Dostupný z WWW: <<http://waterjets.org>>.
- [7] Water jet Laboratory Hannover. *ABRASIVE WATER SUSPENSION JET TECHNOLOGY* [online]. 2003 [cit. 2009-04-17]. EN. Dostupný z WWW: <<http://www.china-weldnet.com/English/information/I-E-363-03.htm>>.
- [8] LIU, T.. *Ultrahigh-Pressure Cryogenic jet Technology* [online]. [2005] [cit. 2009-04-17]. EN. Dostupný z WWW: <<http://www.stereovisionengineering.net/UHP%20cryogenic%20jets.htm>>.
- [9] *Kavitace* [online]. 2009 [cit. 2009-04-18]. Dostupný z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Kavitace>>.
- [10] VOMOČIL, Libor. Vodní paprsek nyní dokáže řezat se stálým pracovním tlakem 6000 barů. *Technik* [online]. 2008 [cit. 2009-04-18]. Dostupný z WWW: <http://technik.ihned.cz/c4-10024800-27298090-800000_d-vodni-paprsek-nyni-dokaze-rezat-se-stalym-pracovnim-tlakem-6000-baru>.

- [11] FOLDYNA, Josef. *Ultrazvuková modulace vysokorychlostních vodních paprsků*. Ostrava, 1996. 67 s. Akademie věd České republiky Ústav geoniky Ostrava . Vedoucí dizertační práce Doc. Ing. Jaroslav Vašek, DrSc.
- [12] MATTHUJAK, A., et al. *High speed jet formation by impact acceleration method*. [s.l.] : [s.n.], 2007. 15 s.
- [13] KOLLÉ, J. *COMPRESSED-WATER PULSE GENERATORS AND APPLICATIONS*. [s.l.] : [s.n.], 2000. 6 s. Dostupný z WWW: <<http://www.tempresstech.com>>.
- [14] CHAHINE, Georges L., et al. *CLEANING AND CUTTING WITH SELF-RESONATING PULSED WATER JETS*. [s.l.] : [s.n.], 2000. 13 s.
- [15] SITEK, Libor, FOLDYNA, Josef. Možnosti využití modulovaného vodního paprsku při sanaci betonu. *BETON*. 2002, č. 2, s. 38-41.
- [16] SÁŇKA, Hynek. *Studie využití nekonvenční technologie vodního paprsku v podmínkách středně velké strojírenské firmy*. [s.l.], 2007. 67 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Karel Osička.
- [17] Hennlich Industrietechnik spol. s r.o.. *Vysokotlaká plunžrová čerpadla* [online]. [2008] [cit. 2009-05-03]. Dostupný z WWW: <<http://www.hennlich.cz/index.php?dokument=10992>>.
- [18] Flow Europe GmbH. *Flow Europe GmbH* [online]. [2009] [cit. 2009-05-03]. Dostupný z WWW: <<http://www.floweurope.com>>.
- [19] ŠINDELÁŘ, Jiří. *Řezání materiálu vodním paprskem*. Brno, 2007. 36 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Vladimír Habán.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Označení	Název	Jednotka
A	Amplituda frekvence	m
C_0	Rychlost zvuku v kapalině	$m \cdot s^{-1}$
d	Průměr trysky	m
ΔV	Amplituda modulace rychlosti paprsku	m
f	Frekvence modulace	Hz
λ	Vlnová délka modulace	m
l_0	Rozpadová délka paprsku	m
m	Poměr modulace rychlosti	-
p	Tlak kapaliny	Pa
p_i	Nárazový tlak kapaliny	Pa
p_s	Tlak od zastavení paprsku	Pa
R	Poloměr trysky	m
r_0	Poloměr paprsku ve vzdálenosti x od výstupu z trysky	m
S	Plocha průřezu pístu	m^2
St	Strouhalovo číslo	-
t	Čas	s
V_0	Rychlost dopadajícího paprsku	$m \cdot s^{-1}$
V_m	Střední (průměrná) rychlost paprsku na výstupu z trysky	$m \cdot s^{-1}$
x	Axiální vzdálenost od ústí trysky	m