



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA NÁHRADNÍHO DÍLU ČERPADLA PRO ŘEZÁNÍ VODNÍM PAPERSEM

PRODUCTION OF REPLACEMENT PART FOR PUMP OF WATERJET
CUTTER

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Lukáš VRÁNA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Oskar ZEMČÍK, Ph.D.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student (ka): Bc. Lukáš Vrána

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**
obor: **Strojírenská technologie a průmyslový management (2303T005)**

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

Výroba náhradního dílu čerpadla pro řezání vodním paprskem

v anglickém jazyce:

Production of replacement part for pump of waterjet cutter

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Popis stávající situace. Analýza nefunkčního dílu hlavy pro řezání vodním paprskem. Návrh a výroba náhradního dílu včetně vyhodnocení.

Cíle diplomové práce:

- popis problematiky.
- analýza kritického dílu
- návrh řešení
- technicko- ekonomické srovnání

Seznam odborné literatury:

1. WANG, Jun. Abrasive Waterjet Machining of Engineering Materials. Zurich: Materials Science Foundations, 2003. 114 s. ISBN 978-0-87849-918-2.
2. HUMÁR, Anton. Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění. Brno: CCB, 1995. 265 s. ISBN 80-85825-10-4.
3. PÍŠKA, Miroslav, et al. Speciální technologie obrábění. 1. Brno: CERM, 2009. 246 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
4. DAVIM, J. Paulo. Surface Integrity in Machining. 1. London: Springer, 2010. 215 s. ISBN 978-1-84882-873-5.
5. MÁDL, J. KAFKA, M. DVOŘÁK, J. Technologie obrábění. Praha: ČVUT, 2007. 252 s. ISBN 978-80-01-03752-2.
6. BILÍK, Oldřich, VRABEC, Martin. Vrabec Martin Technologie obrábění s využitím CAD/CAM systému. Ostrava: Vysoká škola báňská- Technická univerzita, 2002. 128 s. ISBN 80-248-0034-9.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 21. 11. 2011

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce obsahuje teoretickou část zabývající se nekonvenční technologií vodního paprsku. První část je věnována rozboru technologie vodního paprsku a možným způsobům využití při obrábění.

Část praktická řeší problematiku dílu čerpadla a jeho možný postup výroby. V závěru práce je technicko- ekonomické zhodnocení.

Klíčová slova

Vodní paprsek, abrazivní vodní paprsek, frézování, vysokotlaké čerpadlo, koncovka

ABSTRACT

The thesis contains a theoretical part dealing with non-conventional water jet technologies. The first part deals with analysis of water jet technology and possible uses for machining operations.

The practical part deals with the issue part of the pump and its possible production process. The conclusion is technical-economically evaluation.

Key words

Water jet, abrasive water jet, milling, high pressure pump, end cap

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VRÁNA, Lukáš. *Výroba náhradního dílu čerpadla pro řezání vodním paprskem*. Brno 2012. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 87 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Výroba náhradního dílu čerpadla pro řezání vodním paprskem** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Lukáš Vrána

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych touto cestou poděkoval všem, jež mi byli oporou po dobu mého studia, zvláště pak mé rodině, která mi umožnila získat vzdělání. Děkuji vedoucímu práce Ing. Oskaru Zemčíkovi, Ph.D. za ochotu a poskytnuté rady při řešení diplomové práce. Dále děkuji paní Ivě Davidové, panu Ing. Pavlu Doležalovi, Ph.D. a Ing. Pavlu Gejdoši za pomoc u praktické části této práce. Velké poděkování patří firmě Vy-TECH, především panu Viktoru Vyskočilovi, který mi umožnil zpracovat tuto diplomovou práci.

Obsah

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
ÚVOD.....	9
1 Popis a rozbor technologie vodního paprsku.....	10
1.1 Definice základních pojmů	10
1.2 Vznik a vývoj vodního paprsku v 2. polovině 20. století	12
1.2.1 Vodní paprsek na přelomu tisíciletí	13
1.3 Princip vodního paprsku	14
1.4 Druhy kapalinových (vodních) paprsků	17
1.4.1 Čistý vodní paprsek (WJM).....	17
1.4.2 Abrazivní paprsek (AWJ)	18
1.4.3 Ostatní druhy kapalinových paprsků	20
2 Strojní vybavení systému vodního obrábění.....	22
2.1 Systém úpravy kapaliny (vody)	22
2.2 Generátory vysokotlaké vody	25
2.3 Vysokotlaké potrubí a hydraulické rozvody	29
2.4 Těsnění.....	30
2.5 Souřadnicové CNC stoly	31
2.6 Řezací hlavy.....	32
2.7 Druhy abraziva a jejich vlastnosti.....	34
2.8 Doprava abraziva do systému	36
2.9 Řídicí systém.....	37
2.9.1 Dynamic WaterJet (DWJ).....	38
3 Technologické možnosti WJM a AWJ ve strojírenství	40
3.1 Řezání (dělení) materiálu.....	40
3.2 Vrtání	41
3.3 Soustružení.....	42
3.4 Frézování.....	43
3.5 Gravírování	43
3.6 Trojrozměrné obrábění (řezání)	45
3.7 Průmyslové oblasti použití technologie WJM a AWJ	45
3.8 Výhody a nevýhody vodního paprsku	47
3.8.1 Výhody technologií WJM a AWJ.....	47

3.8.2 Nevýhody technologií WJM a AWJ	48
4 Řešení návrhu výroby náhradního dílu čerpadla	49
4.1 Čerpadla	50
4.2 Analýza materiálu dílu KONCOVKY	51
4.3 Problematika dílu KONCOVKY	55
4.4 Namáhání koncových vysokotlakých částí	57
4.5 Simulace namáhání dílu koncovky	58
4.6 Návrhy řešení	61
5 Řešení technologického postupu	62
5.1 Rozbor polotovaru	63
5.2 Postup výroby	63
6 Výroba dílu koncovky	64
6.1 Dělení materiálu	64
6.2 Frézování	65
6.3 Odjehlování	66
7 Volba nástrojů pro jednotlivé operace výroby	67
7.1 Frézování ploch obvodu – čelní frézování	67
7.2 Vrtání průchozích děr pro šroubové spojení	69
7.3 Frézování vnitřní díry	70
7.4 Frézování (vrtání) ve spodní části díry	71
7.5 Vrtání odtokové díry Ø6 mm na spodní straně	73
7.6 Vrtání přetlakové díry Ø1,6 mm	74
7.7 Vrtání vysokotlaké díry Ø3 mm	74
7.8 Vrtání děr se závitem m14x1,5	75
7.9 Vytvoření závitů M14x1,5	76
7.10 Vrtání díry o Ø11,4 mm	76
7.11 Frézování drážek pro těsnění	77
7.12 Seřízení nástrojů a měření	78
8 Technicko-ekonomické zhodnocení	79
ZÁVĚR	80
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	81
SEZNAM OBRÁZKŮ	84
SEZNAM TABULEK A GRAFŮ	86
SEZNAM PŘÍLOH	86
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	87

ÚVOD

Lidská snaha překonávat nepříznivé přírodní jevy a vítězit nad přírodou je nezměrná. Avšak ve většině případů se člověk svými vynálezy nedokázal ani zdaleka přiblížit přírodním zákonitostem a jevům, jež nás provází životem, aby jím mohl čelit. Ve své podstatě veškeré vynálezy a vědní obory vycházely právě ze získaných pozorování přírody. Voda, jakožto nedílná součást našeho života a jeden ze čtyř živlů planety, se stala středem lidské pozornosti a její „podmanění“ mělo za následek velký vývoj populace lidstva v posledních dvou tisíciletích.

Čínský filozof Lao-c' ve své knize Tao-te-ťing (Kniha o Cestě a její Síle) uvedl:

„Voda, nejměkčí ze všech věcí, prorazí nakonec nejtvrďší kámen.“

Jeho myšlenka přetrvala dodnes a za tu dobu již inspirovala mnoho vynálezců a konstruktérů, kteří dokázali využít zákonitosti vodního živlu a přeměnit je v lidský prospěch. Díky vědním oborům, jako např. hydromechanika a dalším, se postupným zdokonalováním stala taková technologie, která dokáže využít vodního paprsku jako nástroje pro řezání daleko tvrdších materiálů, přírodních tak i průmyslově vyrobených, než je ona sama.

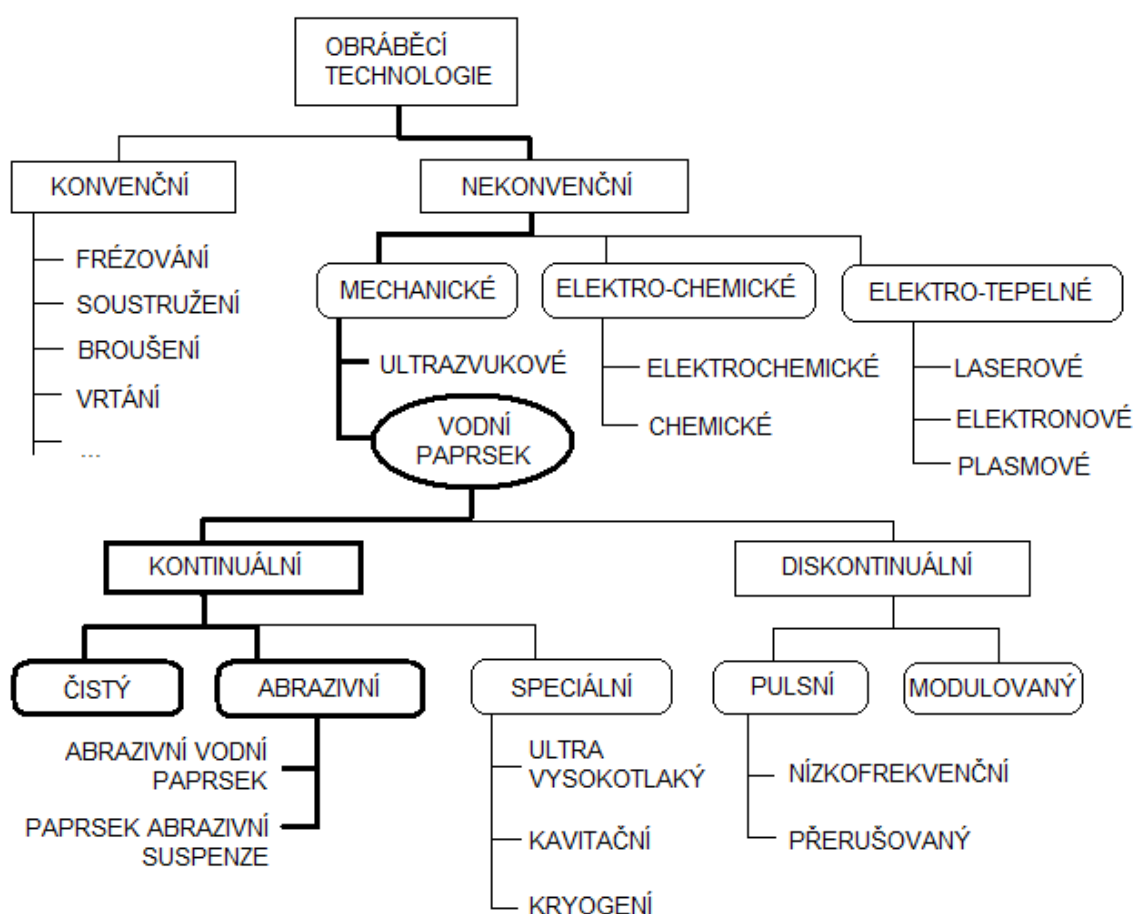
Jelikož voda, jakožto přírodní materiál, je ekologicky čistý zdroj nejen ve strojírenském, ale i dalších průmyslových odvětvích, dá se předpokládat její další využití v budoucnu. Technologie obrábění vodním paprskem se postupně dostala mezi plně uznávané obráběcí technologie, a jelikož se neustále vyvíjí a zdokonaluje, bude proto určovat nový standard pro ekologické technologie v 21. století.

1 POPIS A ROZBOR TECHNOLOGIE VODNÍHO PAPERSKU

Kapitola popis a rozbor technologie vodního paprsku se zabývá rozбором technologie vodního paprsku a jeho možností využití v praxi. Je rozdělena do jednotlivých podkapitol, jež popisují problematiku technologických možností vodního paprsku.

1.1 Definice základních pojmů

Než přejdeme k samotné technologii vodního paprsku, je nutné si popsat několik základních pojmů. Obr. 1.1 znázorňuje rozdělení obráběcích technologií z hlediska technologie obrábění.

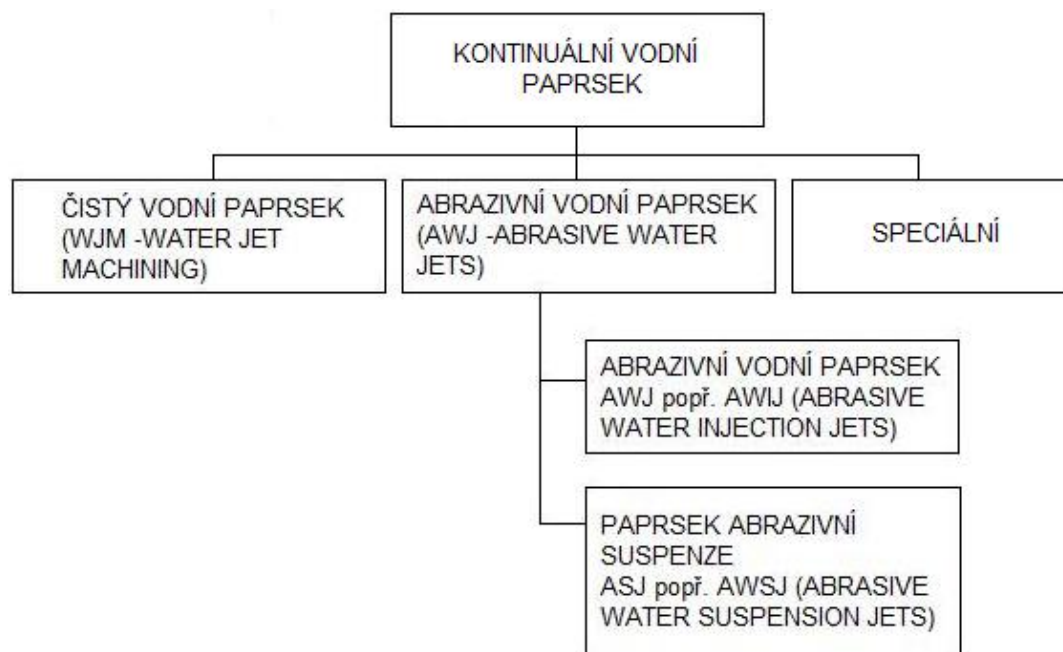


Obr. 1.1 Rozdělení jednotlivých obráběcích technologií, dle [4].

Pojem **konvenční** můžeme volně přeložit z anglického slova conventional, ve významu jako slovo běžné. Mezi tyto technologie potom řadíme nejběžnější obráběcí technologie (soustružení, vrtání, frézování, broušení atd.).

Nekonvenční technologie obrábění (NTO) můžeme nazývat technologiemi ojedinělými, originálními či speciálními. Tyto technologie nebývají zpravidla tolik využívány ve výrobních procesech v takové míře, jako je tomu u obráběcích technologií konvenčních. NTO se využívají především v případech, kdy je nutné obrobít těžkoobrobitelné materiály (např., kalené oceli, žárovevné / žáruvzdorné oceli, slitiny titanu, kompozitní materiály, skla, pryže atd.) a tvarově složité součásti různých velikostí. Výhodou NTO je především programová a grafická podpora s CAD/CAM a jinými systémy a tudíž možnost využití nekonvenčních technologií v automatizovaných provozech a výrobcích. [18]

Vodní paprsek se dělí podle mechanismu proudění kapaliny na kontinuální a diskontinuální. Hlavní a nejpoužívanější je tzv. čistý vodní paprsek (WJM - Water Jet Machining) a abrazivní vodní paprsek (AWJ - Abrasive Water Jets). Tyto paprsky se řadí mezi kapalinové paprsky kontinuálního charakteru proudění. AWJ můžeme dále rozdělit podle způsobu přívodu abraziva do paprsku a to na abrazivní vodní paprsek (AWJ popřípadě AWIJ - Abrasive Water Injection Jets) a paprsek abrazivní suspenze (ASJ nebo AWSJ - Abrasive Water Suspension Jets). Abrasiva jsou látky nebo přísady (materiály), vstříkované do komory mísení s vodním paprskem. Slouží k úpravě nebo zlepšení vlastností celého procesu řezání. Obr. 1.2 popisuje základní rozdělení vodního paprsku. [4]



Obr. 1.2 Základní rozdělení kontinuálního vodního paprsku.

1.2 Vznik a vývoj vodního paprsku v 2. polovině 20. století

Poprvé byl koncept vysokotlaké (UHP - ultra high pressure) vodní trysky pro řezání materiálů použit Dr. Normanem C. Franzem (Obr. 1.3 – rok 1953). Tento lesní inženýr z university v Michiganu se pokusil v 50. letech 20. století vyvinout novou technologii pro řezání dřeva.

Při vývoji prvního vysokotlakého vodního paprsku se Dr. Franz nechal inspirovat metodou, která zjišťovala únik páry z tlakových nádob pro přehřátou páru pomocí koštěte. Jakmile se v tlakové nádobě vyskytnul kaz (díra), pak unikající pára z tlakových hrnců svou dostatečnou kinetickou energií naštěpla násadu koštěte. Avšak později bylo prokázáno, že použití tlakové páry pro řezání je nepraktický způsob, především z důvodu složitosti

zařízení. První pokusy, při nichž byla řezným médiem kapalina (resp. voda) nebyly použitelné pro praxi. Důvodem byl nekontinuální průtok vody, jenž zapříčinil nepoužitelnost technologie vodního paprsku pro obrábění. Až vývoj přípravku zajišťující soudržnost (kontinuitu) proudu vody byl branou, která otevřela tuto

technologii světu. V pozdější době Dr. Franz spolupracoval s firmou McCartney Manufacturing, jež ho přiměla k výrobě prvního komerčního zařízení, využívajícího vysokotlaký vodní paprsek pro řezání materiálu (listopad 1971). Zařízení zakoupila firma Alton Box Board, která tento stroj použila na obrábění nábytku (Obr. 1.3 – rok 1971).

První dvě mezinárodní konference věnované technologii řezání pomocí vodního paprsku, sponzorované Britskou asociací British Hydromechanics Research Association, poukázaly na zájem ze strany odborné veřejnosti. Druhé konference pořádané na jaře roku 1974 se zúčastnili již zájemci několika zemí. V této době vznikly první komerční firmy (např. Flow International Corporation). První stroje používaly tlak 35.000 až 50.000 psi a sloužily jen pro řezání měkkých nekovových materiálů.

[1,2,4,30]

Obr. 1.3 Vodní paprsek v 2. pol. 20. stol. [1,2,30].→



1950

1953

1960



1970

1971



1974

1979

1980



1983

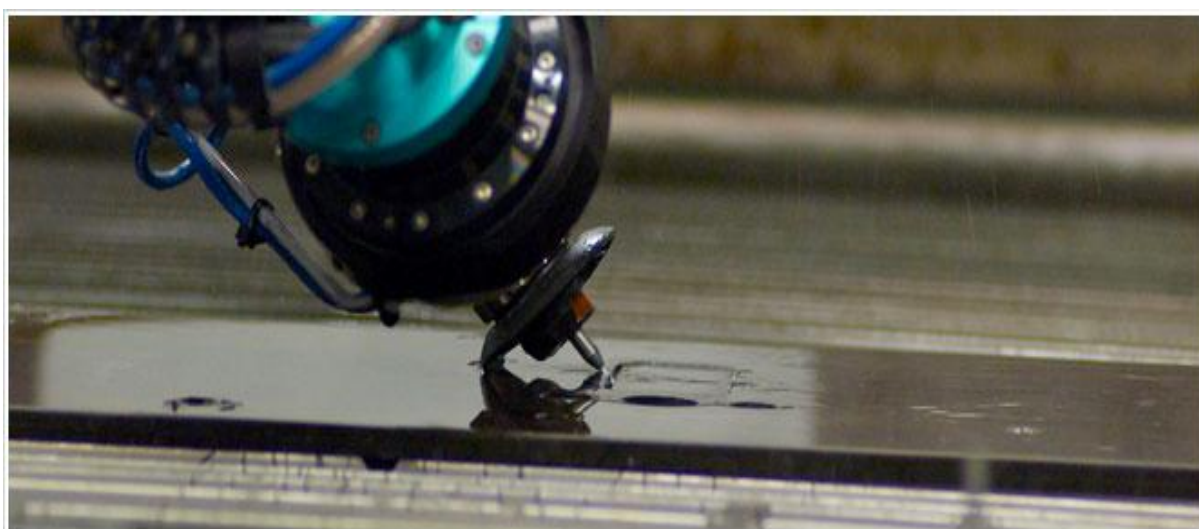


1990

Koncem 70. let přišel Dr. Mohamed Hashish (Obr. 1.3 – rok 1979) s myšlenkou, přidat do procesu řezání abrazivní částice, a tím se rozšířilo použití technologie i na další „tvrdší“ materiály, např. ocel, sklo, beton aj. Rok 1983 přinesl další průlom ve vývoji technologie vodního paprsku, když firma Flow International prodala svůj vůbec první komerční stroj, jenž dokázal řezat tloušťku materiálu až 76 mm a byl použit za účelem řezání skel v automobilovém průmyslu. Až do konce minulého století byla tato technologie plně v držení dvou amerických firem, Flow International a Ingersoll-Rand [1,2]

1.2.1 Vodní paprsek na přelomu tisíciletí

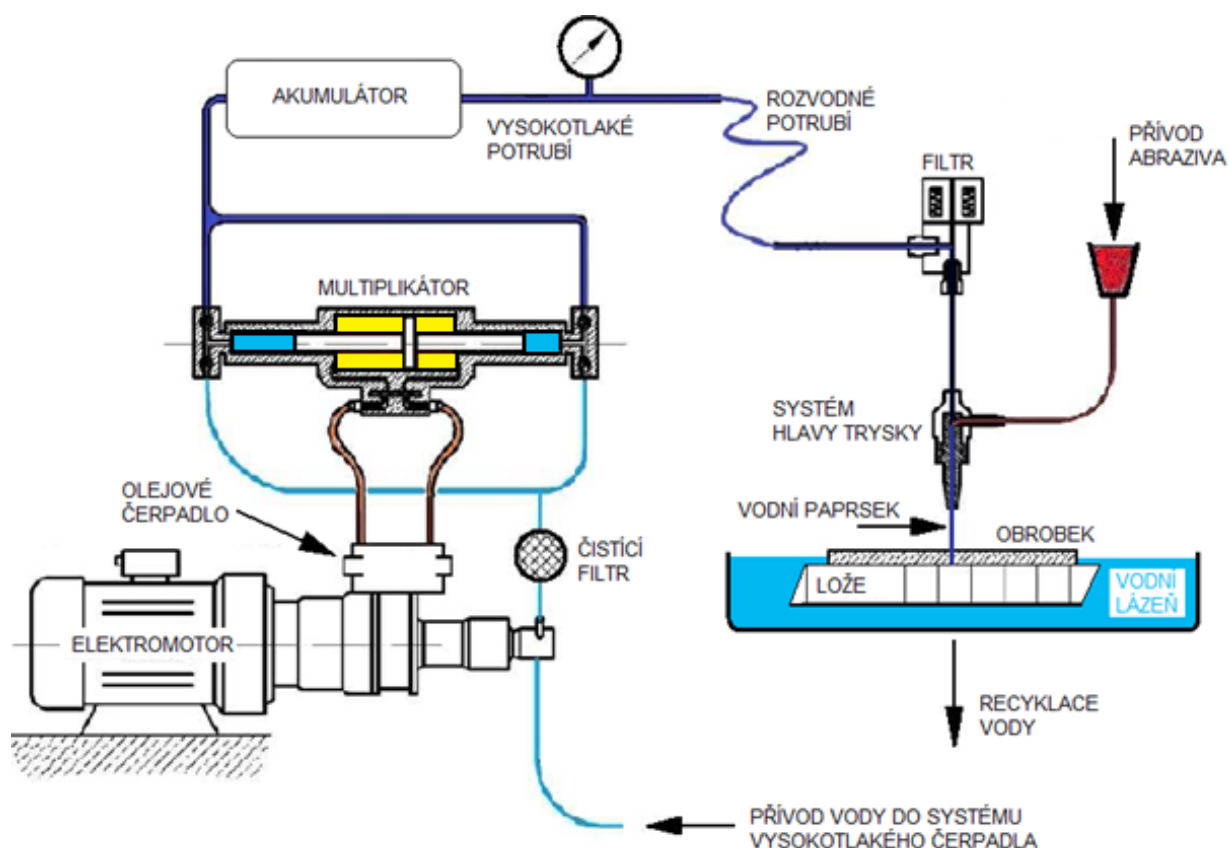
Díky vývoji počítačové technologie na přelomu tisíciletí dochází k značnému posunu možností a dalšímu vývoji vodního paprsku. Roku 1990 přichází firma Flow International s prvním systémem inteligentního řízení vodního paprsku, aby se v následujících letech objevily na trhu nové stroje dosahující vyšších výkonů v procesu řezání. Firmy se zaměřily na jednotlivé části systému řezání, především pak na systém vysokotlakových čerpadel, jejichž výkon vzrostl z 2400bar (r. 1986) na tlak až 6700bar (Flow International, r. 1997). V následujících letech se firmy zaměřily na přesnost řezu. Dynamickým řízením vodního paprsku (obr. 1.4) se snažily optimalizovat kolmost řezu a zvýšit kvalitu ostatních geometrických parametrů. Na trhu se objevují nové firmy a stále větší dostupnost přibližuje systém vodního paprsku i menším průmyslovým firmám. Tím začíná nová éra této technologie, v minulosti označované za nekonvenční, avšak v dnešní době spíše za konvenční. [1,7]



Obr. 1.4 Dynamické řezání vodním paprskem [1].

1.3 Princip vodního paprsku

Technologie vodního paprsku je mechanická (mechanicko-fyzikální) metoda úběru materiálu. Podstata spočívá v dopadu úzkého paprsku vodního proudu na obráběnou součást, kdy v důsledku vysoké rychlosti a velké kinetické energie vodního paprsku vztažené na jednotku povrchu obráběné součásti dochází k porušení svrchní vrstvy a k následnému průřezu skrze celý materiál obrobku. [4,19]



Obr. 1.5 Schéma principu vysokotlakého čerpadla [35].

Vysokotlaké čerpadlo je „srdcem“ celého systému řezného procesu (Obr. 1.5). Multiplikátory jsou potřebné k dosažení vysokého tlaku, který je nutnou podmínkou pro splnění předpokladu řezání vodním paprskem. Multiplikátor se skládá ze dvou okruhů. První nízkotlaký okruh (žlutý) přivádí olej o tlaku P_1 , jenž je dopravován do oblasti pístu o ploše S_1 . Druhý okruh (světle modrý) dodává do multiplikátoru přefiltrovanou vodu, avšak na opačnou stranu pístu o ploše S_2 . Dále vycházíme už jen z Pascalova zákona (1).

$$P_2 = \frac{S_1}{S_2} \cdot P_1 \quad [\text{Pa}] \quad (1)$$

Tlak dosažený multiplikátorem je v současné době 450 až 500MPa. Stlačení vody se pak pohybuje v rozmezí 12 až 14 %, kdy je tato voda dopravována do řezací hlavy přes systém vysokotlakého potrubí, akumulátoru a filtru [1]. Velikost průtoku a rychlost kapaliny závisí především na vnitřním průměru dýzy a požadovaném tlaku kapaliny, který se mění po průchodu dýzou. Objem protékající vody v závislosti na tlakovém spádu lze vypočítat využitím Bernoulliho vztahu pro výtok z nádoby a rovnice kontinuity pro ústí dýzy (2). [4]

$$Q = S_0 \cdot \mu \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot P_2}{\rho}} \quad [\text{m}^3] \quad (2)$$

Pro rychlost pístu v_p a průtokové množství hydrogenerátoru Q_c pak platí:

$$v_p = \frac{Q_c}{S_0} \cdot \eta_r \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (3)$$

kde:

$$Q_c = \frac{P}{P_1} \quad [\text{m}^3] \quad (4)$$

Vysokotlaká voda se mění na vysokorychlostní pomocí trysky, která je poslední částí řezací hlavy. Důležitými faktory z hlediska disipace energie v dýze jsou výtokový a ztrátový součinitel dýzy. Výtokový součinitel μ_v (5) lze určit experimentálně nebo vypočítat analyticky:

$$\mu_v = \frac{Q_s}{Q_i} = \varepsilon \cdot \varphi \quad [-] \quad (5)$$

Tento vzorec (5) pak lze vyjádřit zjednodušeně jako:

$$\mu_v \cong \varphi = \frac{v}{v_i} \quad [-] \quad (6)$$

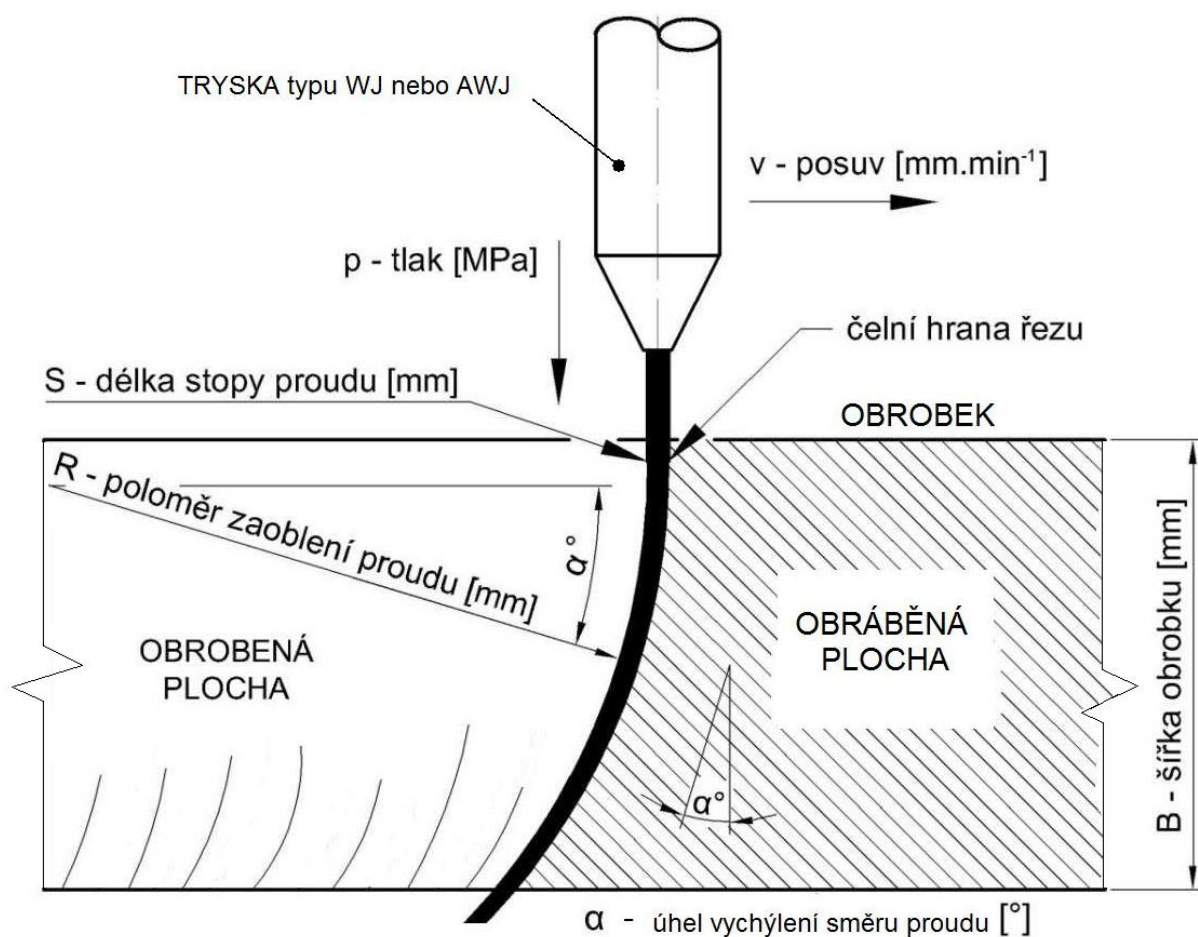
Pokud vycházíme ze vztahu pro kinetickou energii (7), která znázorňuje, jak se s rostoucí rychlostí exponenciálně zvyšuje kinetická energie, je zřejmé, že pro dosažení práce potřebné k řezu materiálu obrobku je nutné získat dostatečně vysokou rychlost vodního paprsku. Tato rychlost je udávána v násobcích rychlosti zvuku (v praxi až trojnásobek rychlosti zvuku, cca. $1000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) a vychází z tlaku kapaliny dle (8). Práce vykonaná řeznou silou vodního paprsku, je rovna rozdílu kinetických energií v místě vstupu do materiálu obrobku a výstupu z něj dle (9). Mechanický účinek vodního paprsku se znásobuje použitím abrazivních částic. [3,4,19]

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \text{ [J]} \quad (7)$$

$$v^2 = \frac{2 \cdot p}{\rho} \text{ [m.s}^{-1}] \quad (8)$$

$$W = \Delta E_{kin} = E_{kin1} - E_{kin2} \text{ [J]} \quad (9)$$

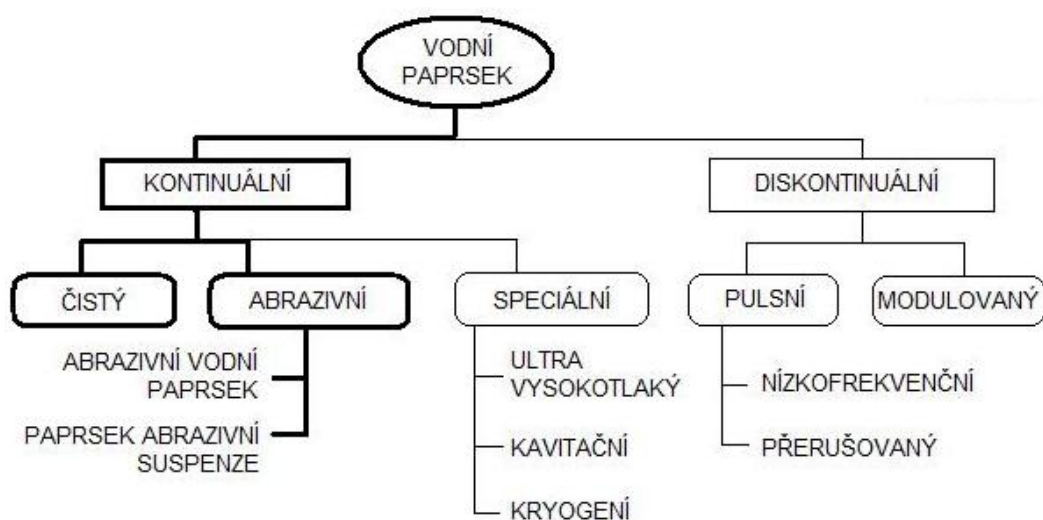
Průběh dráhy vodního paprsku skrze materiál obrobku a jeho charakter lze znázornit pomocí (obr. 1.6), kde se vlivem deformačního odporu materiálu a posuvové rychlosti mění paprsek v průběhu pohybu v každém elementárním bodě šířky obrobku po zaoblené dráze.



Obr. 1.6 Charakter řezu kapalinového paprsku [4,30].

1.4 Druhy kapalinových (vodních) paprsků

Jednotlivé druhy vodních paprsků jsou znázorněny na obr. 1.7. Primárně se dělí na kontinuální a na diskontinuální. Další varianty se používají s ohledem na charakter obráběného materiálu a na podmínkách řezného procesu.



Obr. 1.7 Rozdělení kapalinových (vodních) paprsků.

V praxi se nejčastěji využívá kontinuálního obrábění vodním paprskem. Mezi základní zástupce této technologie spadají dvě metody, které se od sebe liší použitím pracovního média [4,19]:

- **WJM - Water Jet Machining** – hydrodynamické obrábění (čistý vodní paprsek),
- **AWJ - Abrasive Waterjet Machining** – vodní paprsek s přidáním abrazivních částic.

1.4.1 Čistý vodní paprsek (WJM)

Technologie WJM byla vůbec první použitou technologií mezi kapalinovými paprsky. Nejdůležitějším faktorem pro technologii WJM byl výběr pracovní kapaliny, která musela splňovat náročné požadavky na chod celého systému. Mezi tyto požadavky patří:

- nízká hodnota viskozity, která zabezpečuje malé ztráty výtoku kapaliny, při průchodu potrubím, hadicemi apod.,
- běžná dostupnost a nízká cena,
- malá toxicita a ekologická odbouratelnost,
- nesmí dráždit pokožku, dýchací cesty, zrak aj.,
- schopnost splňovat charakteristiky obrábění, především přesnost a kvalitu řezu.

Nejvíce se těmto požadavkům blíží voda, jež je nejdostupnější, ekologická a nejlevnější. A proto se začala užívat při WJM i AWJ obrábění [4].

Zařízení typu WJM se v dnešní době používá z větší části pro řezání nekovových materiálů (lamináty, azbest, kompozity, dřevo, guma, pryž, kevlar, papír aj.). Vodní paprsek dosahuje pracovního tlaku 50 až 450MPa. Přeměna vysokotlaké vody na vysokorychlostní se děje pomocí dýzy. Vysokorychlostní paprsek vystupuje z dýzy rychlostí cca 300 až 1200 m.s⁻¹. Vnitřní průměr WJM dýzy se pohybuje mezi 0,1 až 1,5 mm. Např. firma Jet Edge používá stlačeného vzduchu v trysce WMJ k dosažení ještě vyšší výtokové rychlosti paprsku. [3,4, 19]

1.4.2 Abrazivní paprsek (AWJ)

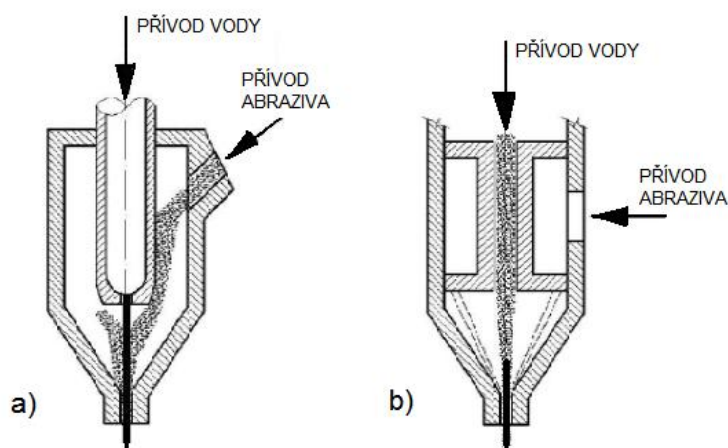
Abrazivní vodní paprsek byl vyvinut z důvodů nedostatečné řezné síly systému WJM, jelikož ten nedokázal silou paprsku řezat pevnější materiály (ocel, slitiny titanu, keramiku, kompozitní materiály, aj.). Proto koncem 70. let 20. století Dr. Hashish začal přidávat do systému řezného paprsku abrazivní částice, aby zvýšil účinnost řezání. Jednotlivými pokusy bylo dokázáno, že erozní síla abrazivních částic je až 1000x silnější než erozní síly čistého vodního paprsku. [1]

U systému AWJ slouží vodní paprsek spíše k urychlení abrazivních částic (materiál: granát, karbid křemíku SiC, diamantový prach, elektrokorund, aj.) než k samotnému procesu řezání. Průtok abraziva se liší u jednotlivých výrobců, zpravidla však bývá v rozmezí 1 až 20 kg·min⁻¹. Pracovní tlak AWJ se pohybuje mezi 300 až 600MPa. Systém AWJ dosahuje rychlosti paprsku 600 až 1200 m·s⁻¹ při šířce 1,0 až 2,5 mm. [1,3,6,]

Podle konstrukce dýzy rozeznáváme dva způsoby řezání abrazivním vodním paprskem:

- AWJ - Abrasive Waterjet - Systém s přímým přívodem abraziva,
- ASJ - Abrasive Slurry Jet - Systém s přímým vstříkáváním abraziva.

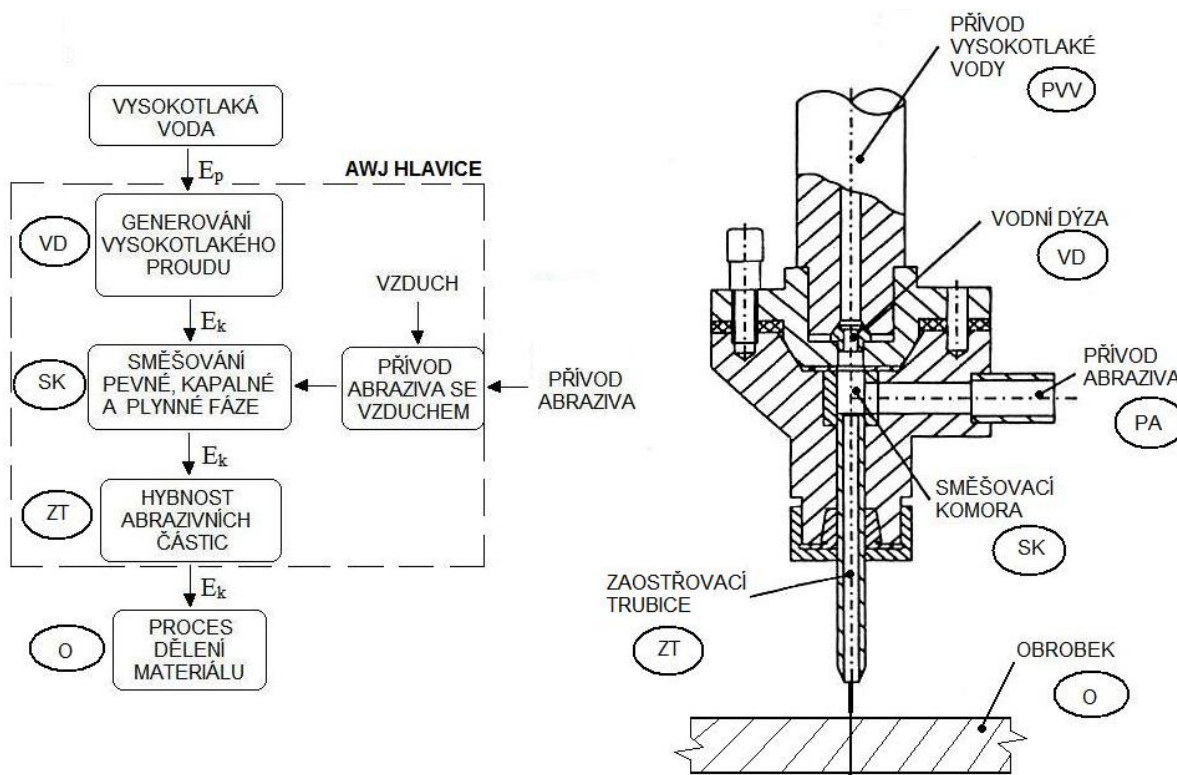
Systém s přímým přívodem abraziva (AWJ) je tvořen zásobníkem, ze kterého je abrazivo přiváděno přes ventil s klapkou a mžikovým přepouštěním do speciálně tvarované, otěruvzdorné směšovací komory. Zde je abrazivo strháváno vysokotlakým vodním paprskem, čímž se přesouvá hybnost z vodního paprsku na abrazivní částice. Proces mísení s vodou probíhá v řezací hlavě, jíž můžeme rozdělit na dvě konstrukční varianty. Tyto se dělí z hlediska způsobu přívodu abraziva (Obr. 1.8). [3,19]



Obr. 1.8 Mísení abraziva s vysokotlakým paprskem AWJ ve směšovací komoře, podle [31].

- a) Dýza s jednoduchým vodním paprskem a radiálním přívodem brusiva,
 b) Dýza se smíšeným paprskem a axiálním přívodem brusiva.

Konstrukce dýzy dle obr. 1.8a představuje lehce vyráběný typ s jednoduchým vodním paprskem a radiálním přívodem abraziva s možností použití i pro čistý vodní paprsek. Výhodou dýzy na obr. 1.8b je axiální přívod abraziva, který zlepšuje jeho smíchání s vodou a tím zmenšuje opotřebení obvodu dýzy.



Obr. 1.9 Princip technologie systému AWJ, podle [4,30].

(E_k – kinetická energie, E_p – potenciální energie)

Princip technologie systému AWJ je znázorněn na obr. 1.9, který popisuje jednotlivé procesy formování řezného nástroje v abrazivní hlavici. Potenciální energie E_p vysokotlaké vody, jež je přivedena přes systém vysokotlakého potrubí do vodní dýzy (VD), se mění po průchodu dýzou na energii kinetickou E_k . Ve směšovací komoře (SK) vzniká vysokorychlostní paprsek, který strhává a urychluje abrazivní částice. Ty jsou přiváděny ze zásobníku společně s atmosférickým vzduchem do abrazivní hlavice. Abrazivní částice získávají dostatečnou rychlost pro řezání obrobku v zaostřovací trubici (ZT).

1.4.3 Ostatní druhy kapalinových paprsků

WMJ a AWJ jsou nejčastější technologie obrábění vodním paprskem díky svým vlastnostem a velkým rozsahem použití. Přesto existují případy, kdy je jejich využití nevýhodné, někdy přímo nevhodné. Z tohoto důvodu byly vyvinuty metody kapalinových paprsků, jež jsou určeny pro konkrétní účely použití.

Ostatní druhy paprsků:

a) Ultra-vysokotlaké paprsky

Vyznačují se především svým vysokým výkonem. Vysokotlaká čerpadla firmy Flow vyvozují v případě technologie HyperPressure až dvojnásobné tlaky (600MPa) oproti ostatním vodním paprskům. Systém tak zvyšuje kvalitu obrobené povrchu a snižuje čas samotného řezání, avšak technologie je stejná jako u metody AWJ. Pořizovací cena této technologie je vyšší, avšak ušetřený čas řezáním snižuje náklady na provoz. Obecně platí úměra, čím vyšší je tlak kapaliny, tím nižší jsou náklady na vyrobený díl (snížená spotřeba energie, abraziva a vody). [6]

b) Kavitační vodní paprsek

Spadá mezi kontinuální kapalinové paprsky. Využívá pro řezný proces jev zvaný kavitace, jež vzniká při lokálním poklesu tlaku, jenž způsobí bubliny v kapalině, které následně implodují. Bubliny v kapalině jsou nejprve vyplněny vakuem, později do nich mohou difundovat plyny okolní kapaliny. Lokální pokles tlaku není stálý a v okamžiku vymizení kolabují vzniklé bubliny, což má za následek rázové vlny s destruktivním účinkem na okolní materiál. Rázový tlak se může teoreticky zvyšovat až 10 - násobně. Kavitační paprsky generované při nízkých tlacích (méně než 100MPa) se používají v případech, kdy se vyžaduje značná přesnost finálního řezu i přesto, že kavitační bubliny jsou do paprsku dopravované nepravidelně. [4]

Intenzita kavitace je určena kavitačním číslem σ_0 :

$$\sigma_0 = \frac{2 \cdot (P_a - P_v)}{v^2} \quad [\text{Pa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (10)$$

Kde: P_a [Pa] – tlak okolního prostředí,

P_v [Pa] – tlak par,

v [m.s⁻¹] – rychlost paprsku.

Mohou nastat tyto případy:

$\sigma_0 > \sigma_1$ kavitace se nevyskytuje,

$\sigma_0 = \sigma_1$ počátek kavitace,

$\sigma_0 < \sigma_1$ zesílení kavitace.

Kde: σ_1 - počáteční kavitační číslo (určuje, kdy jsou v proudu kapaliny podmínky vhodné pro vznik kavitace). [4]

I přestože kavitační paprsek vykazuje lepší vlastnosti než je tomu u WJM, jeho využití v praxi je stále malé, především z důvodů složitosti trysky tvořící kavitaci a dále omezení některých parametrů jako např. krátká pracovní vzdálenost. [4]

c) Pulzní a modulované vodní paprsky

Řadí se mezi diskontinuální kapalinové paprsky a jsou charakterizovány měnící se hladinou energie paprsku po dobu trvání řezného procesu. Kolísající energie paprsku má za následek impaktní tlak působící v místě obrábění. Na rozdíl od stagnačního tlaku p_s je impaktní tlak p_i značně vyšší, a jeho charakter má za následek zvýšenou penetraci paprsku, která vede k únavovému namáhání obráběného materiálu. [3,7]

$$\frac{p_i}{p_s} = \frac{2 \cdot C_0}{V_0} \quad (11)$$

d) Kryogenní paprsek

Založený na stejném principu jako WJM, avšak hlavní rozdíl je v použití odlišného pracovního media. Jako pracovní medium se využívá tekutý dusík. Důvodem a hlavní výhodou využití tekutého dusíku je možnost použití této technologie pro případy, kdy je nemožné použít klasický vodní paprsek, především při řezání chemicky reaktivních materiálů, dále při řezání v kontaminovaných prostředích aj. Jelikož se dusík vyskytuje v tekutém stavu pouze za velmi nízkých teplot (až -190 °C), je zapotřebí přizpůsobit těmto podmínkám i celé strojní vybavení jednotky kryogenního paprsku. [4]

2 STROJNÍ VYBAVENÍ SYSTÉMU VODNÍHO OBRÁBĚNÍ

Strojní vybavení systému vodního obrábění se skládá z mnoha komponentů odolávajících vysokým tlakům, propojených vysokotlakým rozvodným systémem (potrubí, vysokotlaké pryžové hadice). Hydraulické zařízení generující vysokorychlostní proud média (WJM nebo AWJ) se dělí na dva základní okruhy:

- primární (nízkotlaký),
- sekundární (vysokotlaký).

Vysokotlaký okruh je řízený primárním okruhem prostřednictvím tlaku řídicí kapaliny vyvozené hydraulickou jednotkou. [4]

Za hlavní části vysokotlakého okruhu se považují [4]:

- filtry - nepropouští nečistoty o velikosti větší než $0,4 \div 1,5 \mu\text{m}$,
- násobič tlaku kapaliny - vysokotlaké čerpadlo,
- rozváděcí systém - vysokotlaká potrubí, pryžové hadice, těsnění aj.,
- akumulátor tlaku - vysokotlaká nádoba pohlcující rázy v kapalině,
- ventily - regulují průtok kapaliny a tím řídí proces samotného dělení materiálu,
- řezací hlavice (výstupní dýzy) – vznik řezného paprsku.

2.1 Systém úpravy kapaliny (vody)

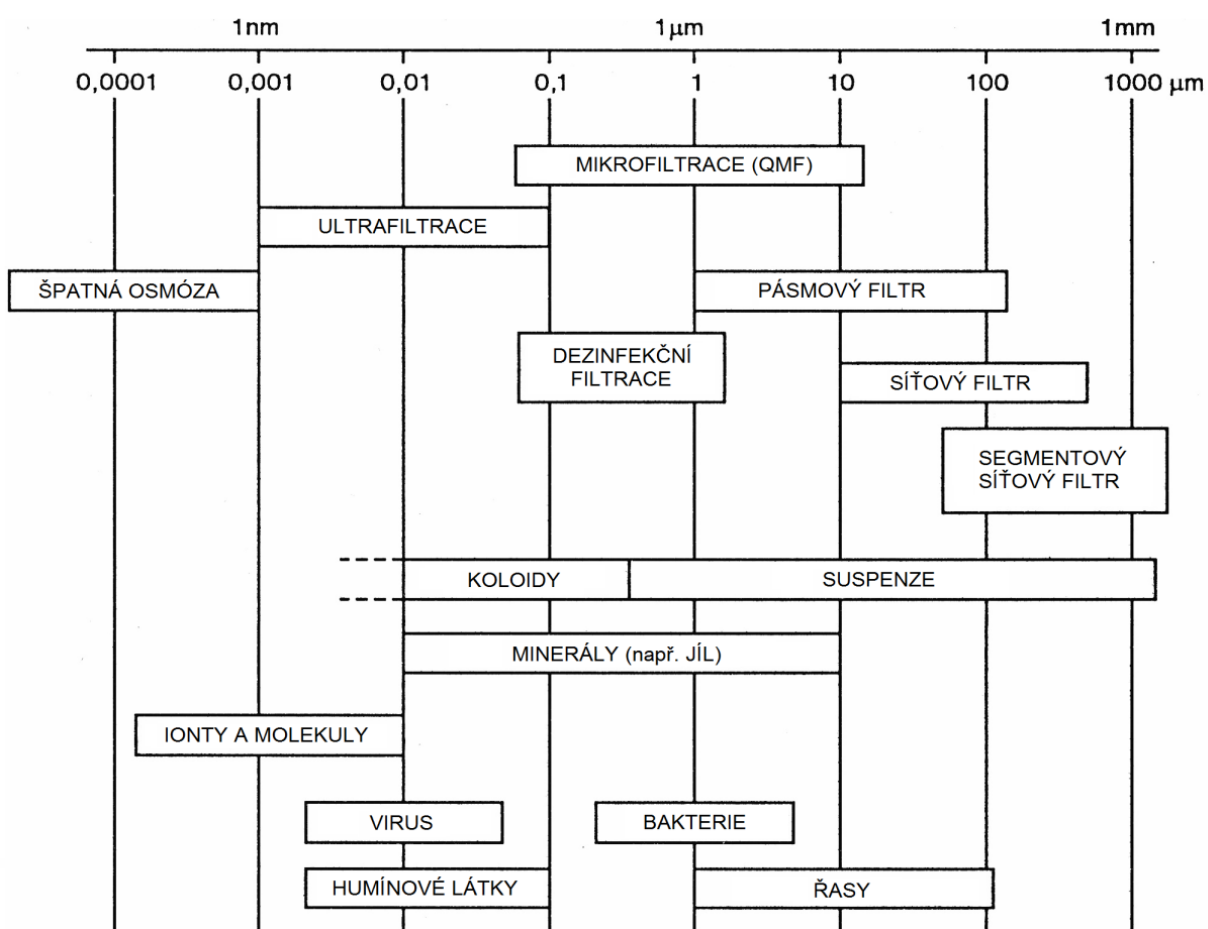
Jelikož voda obsahuje mnoho nežádoucích látek, minerálů aj., je nutné, aby byl celý tento systém chráněn, především však část dýzy. Jelikož se průměr dýzy pohybuje v rozmezí 1,2 až 2,5 mm je nutné předcházet případnému usazování těchto látek z hlediska správné funkce vodního paprsku. Dle Krajného [4] existují tři základní postupy pro úpravu vody:

- Fyzikálně-chemická úprava vody,
- Biologická úprava vody,
- Mechanická úprava vody (filtrace).

Filtrace je separační metoda, při níž dochází k oddělování (separaci) pevné částic od částic kapalných. Tento proces probíhá skrze prostupný materiál (filtrační přepážky). Suspenze je vedena přes porézní filtrační přepážku, která bývá opatřena zpravidla nosným roštem. Filtrace se používá při separování částic o velikosti do 10^{-5}m . [4]

Každý systém vodního obrábění má své specifické postupy úpravy vody, např. pro metodu WJM se doporučuje požívat filtraci, změkčování vody, systém deionizace a další (Obr. 2.1).

[4]



Obr. 2.1 Rozsah oblastí jednotlivých filtračních postupů [4].

Změkčování vody je proces úpravy vody před deionizací nebo reverzní osmózou. Tvrdost vody se určuje podle koncentrace vápníku a hořčíku v daném objemu. Pro hodnocení tvrdosti vody se užívá stupnice dle tabulky 2.1. Jednotkou tvrdosti v soustavě SI je $\text{mmol} \cdot \text{l}^{-1}$, dále se používají stupně německé ($^{\circ}\text{DH}$), anglické, francouzské ($^{\circ}\text{F}$) a americké. [4, 8]

Tab. 2.1 Určení tvrdosti vody ($1\text{mmol} \cdot \text{l}^{-1} = 5,6^{\circ}\text{DH} = 7,02^{\circ}\text{ang.} = 10^{\circ}\text{F} = 100^{\circ}\text{amer.}$) [8].

VODA	$\text{mmol} \cdot \text{l}^{-1}$	$^{\circ}\text{DH}$	$^{\circ}\text{F}$
velmi měkká	< 0,7	< 3,9	< 7
měkká	0,7 ÷ 1,25	3,9 ÷ 7	7 ÷ 12,5
mírně tvrdá	1,26 ÷ 2,5	7,1 ÷ 14	12,6 ÷ 25
tvrdá	3,61 ÷ 3,75	14,1 ÷ 21	25,1 ÷ 37,5
velmi tvrdá	> 3,75	> 21	> 37,5

Zařízení na změkčování vody se skládá z nádržky s pryskyřicí, nádržky se slanou vodou, jež obsahuje sůl na jemnější obnovu a z kontrolní klapky. Voda protéká přes pryskyřicové řečiště, plastický materiál ve formě zrněk. Jakmile voda přechází přes zrnka vápníku a hořčíku (kladný náboj), jsou přitahovány a zadržovány záporně nabitými částicemi pórovitých pryskyřicových zrněk. Sodíkové ionty na zrnkách se uvolní a vyloučí se z vody. Z tohoto důvodu měkká voda obsahuje sodík. [4]

Zpětná (reverzní) osmóza je jednoduchá metoda produkující vysoce kvalitní vodu, kdy je tato voda tlačena vysokým tlakem a usměrňována přes polopropustnou membránu, která zachycuje nečistoty a rozpuštěné částice, které jsou odplavovány do odtoku. Rozdíl tlaků je pak hybnou silou membránové filtrace. Molekulární hmotnost zachycených částic je menší než $200 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$. Proces čištění vody ve WJM a AWJ je závislý na více separačních metodách. V technické praxi se potvrdily obavy z nedostatečné úpravy vody sledující jednotlivé parametry, z tohoto důvodu jednotlivé firmy zavedly předpisy a požadavky s doporučenými hodnotami nečistot. Např. specifikace množství nečistot v řezném médiu zavedené pro své zákazníky firmou Ingersoll-Rand a Flow System [4]:

- celkové množství rozpuštěných pevných látek (TDS), max. $500 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$,
- celková tvrdost (ve formě CaCO_3): max. $25 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$,
- obsah železa (ve formě Fe): max. $0,2 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$,
- atd.

Deionizace je proces využívající výměny iontů, stejně jako u změkčování vody. Ovšem jde o proces daleko složitější. Změkčování používá jen kationtovou pryskyřici, naproti tomu proces deionizace využívá kationtovou a aniontovou pryskyřici umístěnou v dvoukomorové nádržce. Jakmile voda prochází přes kationtovou pryskyřici, jež je lepší ve vodní formě než sodíkové, používané při změkčování, jsou různé kationty jako uhlík (C), hořčík (Mg) a železo (Fe) přesunuty volnými minerály kyselin. Voda dále pokračuje přes aniontovou jednotku, kde jsou anionty, tj. chloridy a sulfáty přesunuté a nahrazené hydroxidy. Tyto se slučují a tvoří vodu, očištěnou od všech iontových nečistot. Existují i další deionizační úpravy, např. dvouřečištní anionová pryskyřice na silnější bázi, na slabší bázi a taky mixované řečiště. [4]

Výhody deionizace:

- 100% odstranění úplně rozpuštěných částic
- Jednoduchá obsluha (doplňování sodíkových tablet)
- Zvýšení životnosti celého zařízení

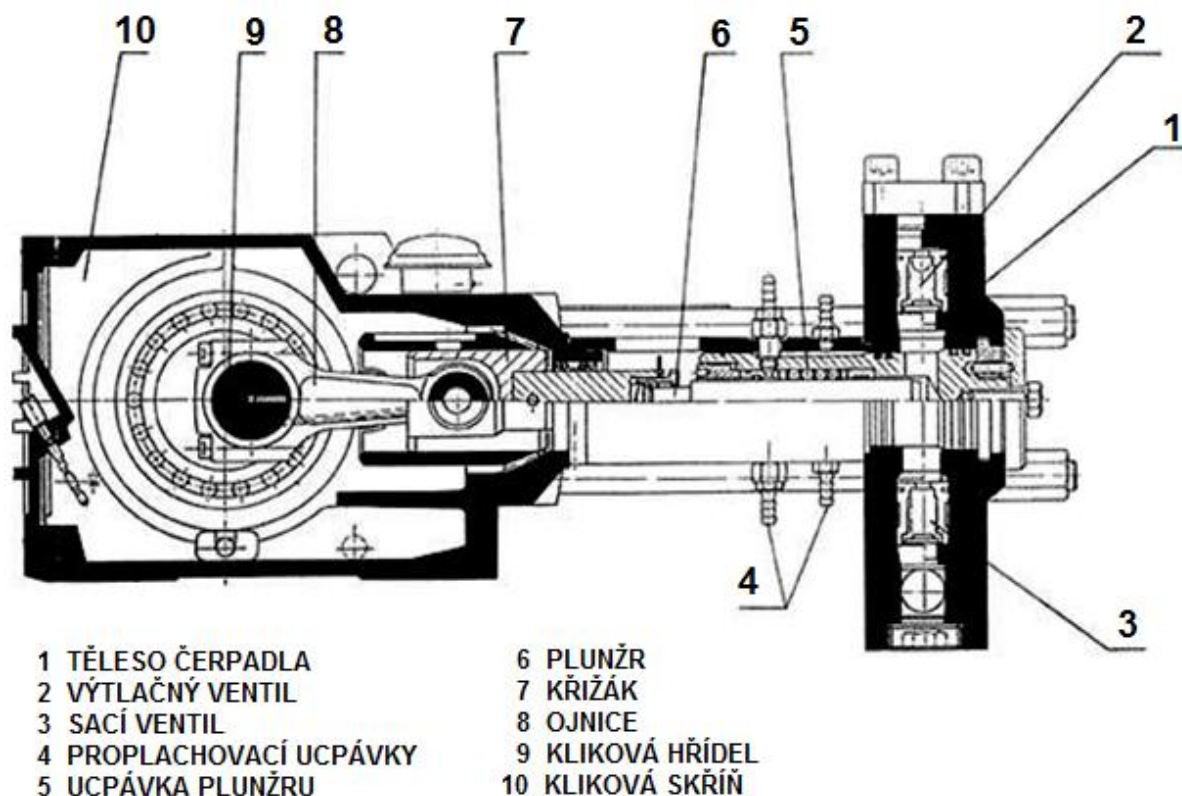
2.2 Generátory vysokotlaké vody

Jsou zařízení, jež musí zajišťovat stálý a nepřetržitý proud vody o předepsaném tlaku. Rozeznáváme dvě zařízení v závislosti na velikosti tlaku a průtoku vysokotlaké vody:

- triplexová pístová čerpadla – určená pro nízké a střední tlaky (do 300MPa),
- multiplikátory – používané pro vysoké tlaky (až 700MPa). [4]

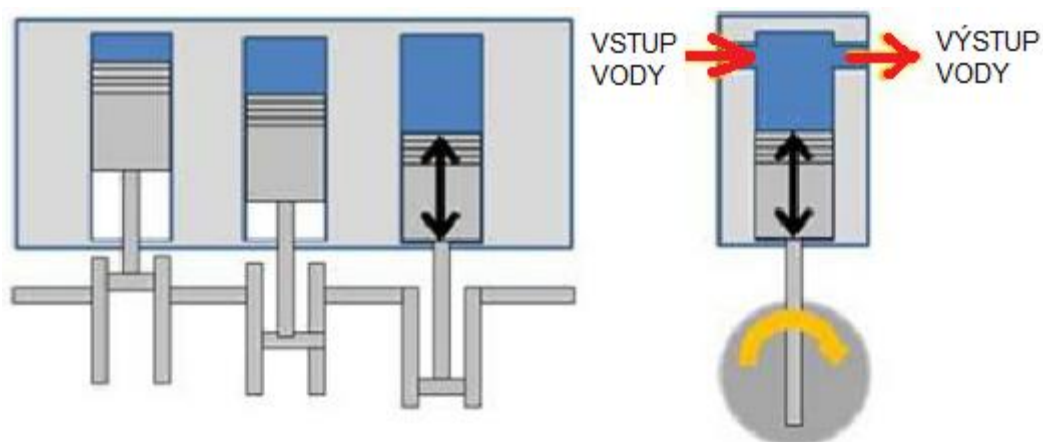
a) Plunžrová čerpadla

Tato čerpadla pracují na stejném principu jako čerpadla pístová. Na rozdíl od pístových čerpadel používají tzv. **plunžr** (pístní tyč a píst v čerpadle splývají v jednu součást o stejném průměru). Dříve se tento druh čerpadla s tlakem do 200MPa používal na odstraňování vrstev, čištění povrchů, sanací betonových povrchů, atd. Obr. 2.2a popisuje schéma plunžrového čerpadla české firmy Sigma Pumpy Hranice. Pohyb klikového mechanismu směrem k dolní úvrti má za následek zvětšení objemu v pracovním prostoru, což vede ke snížení tlaku a nasávání vody do pracovního prostoru skrze otevřené ventily. Následně nastává reverzní pohyb plunžru, jenž způsobuje zvětšení tlaku na hodnotu výtlačného tlaku v pracovním prostoru. Ventily pro přívod vody se postupně uzavřou a vysokotlaká kapalina je vytlačena do vysokotlakého potrubí. V současnosti plunžrová čerpadla využívaná pro technologii vodního paprsku pracují s tlaky do 350MPa, při výkonu 750kW a průtoku dosahujícím až $400 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. [4,36,37]



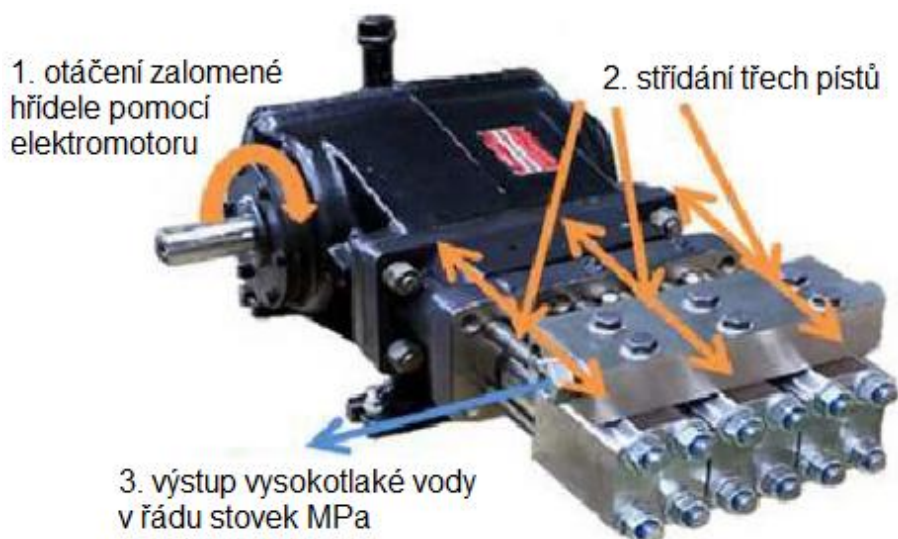
Obr. 2.2a Schéma plunžrového čerpadla firmy Sigma Pumpy Hranice [36].

Schéma triplexového plunžru (obr. 2.2b,c) naznačuje princip této technologie. Tlakový okruh je zde pouze jeden. Elektromotor otáčí zalomeným hřídelem, na kterém se nacházejí vedle sebe umístěné písty.



Obr. 2.2b Princip funkce stlačování kapaliny v komoře pístu [46].

Stlačení kapaliny probíhá postupně ve třech pístech (obr. 2.2c). Výsledný tlak vody dále směřuje vysokotlakým potrubím do řezné hlavice.



Obr. 2.2c Princip funkce triplexového plunžru [46].

b) Multiplikátory

Multiplikátor je zařízení, jež plní funkci hydraulického násobiče vody a využívá se pro vyvození tlakového rozdílu pracovních ploch pístu (obr. 2.3a). Skládá se ze dvou okruhů, přičemž do prvního nízkotlakého okruhu se přivádí olej o tlaku p_1 , který je dopravován do oblasti pístu o ploše S_1 . Druhý okruh dodává do systému přefiltrovanou vodu na opačnou stranu pístu o ploše S_2 . Z Pascalova zákona pak vyplývá rovnice (1). Jelikož objem vysokotlaké vody dodávané multiplikátorem není kontinuální, je nutné v systému použít akumulátor, jenž vyrovnává kolísání tlaku. Multiplikátory pro systém vodního paprsku generují tlaky do 700MPa, a dosahují výkonu téměř 90kW při průtoku $12 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. [4; 10]

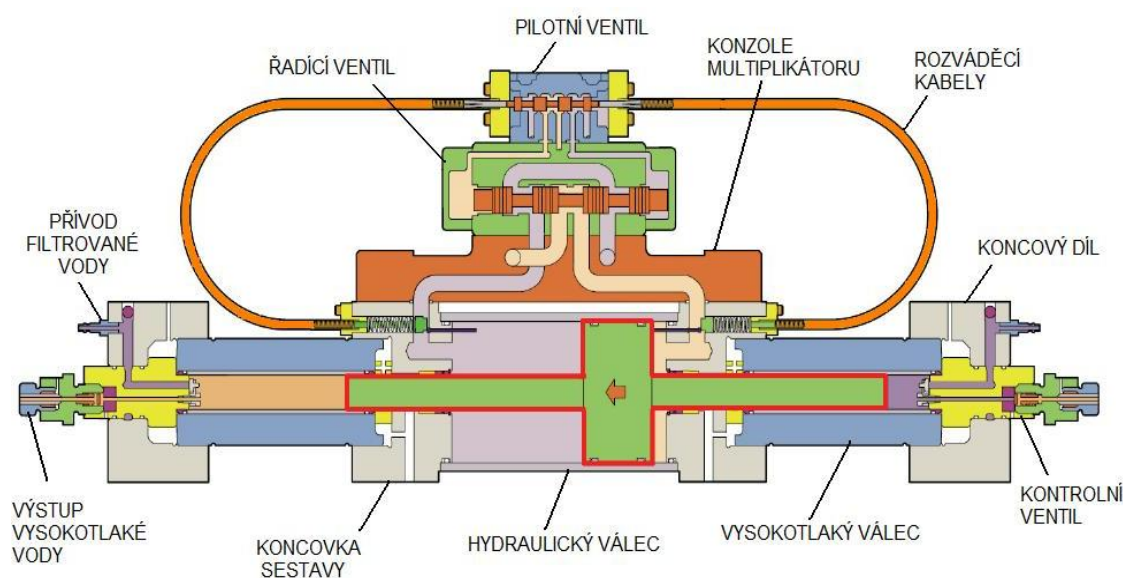
Pro výpočet výstupního tlaku pro dvojčinné multiplikátory, jež jsou v praxi užívány častěji, platí vztah:

$$P_2 = \frac{S_1 - S_2}{S_2} \cdot P_1 \text{ [Pa]} \quad (12)$$

Jelikož však v multiplikátoru dochází k nepatrným ztrátám (tření, hydrodynamické ztráty, ...), musíme vztah (12) upravit o hodnotu mechanické účinnosti ($\eta_m = 0,95$).

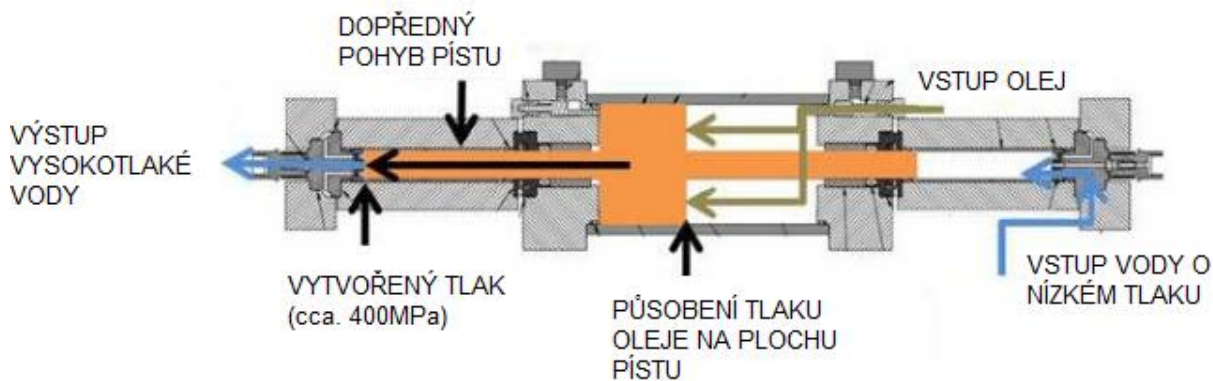
Získáme konečný vztah ve tvaru, dle [4]:

$$P_2 = \frac{S_1 - S_2}{S_2} \cdot P_1 \cdot \eta_m \text{ [Pa]} \quad (13)$$



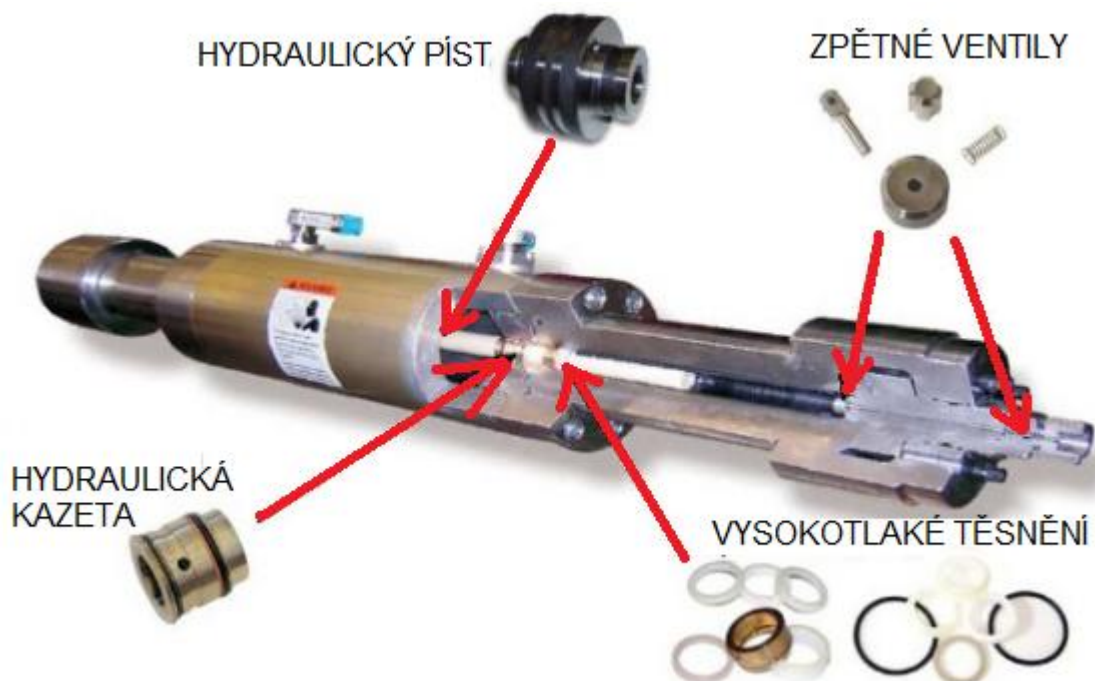
Obr. 2.3a Schéma multiplikátoru firmy Flow [1].

Zjednodušené schéma multiplikátoru na obr.2.3b popisuje děj vzniku vysokotlaké vody. Nízkotlaký okruh, jenž pracuje s tlakovým olejem o tlaku přibližně 20MPa řídí vysokotlaký okruh pracující s řeznou kapalinou. Výsledný tlak kapaliny, jež je na výstupu z multiplikátoru, dále pokračuje přes akumulátor a potrubí do řezací hlavy.



Obr. 2.3b Zjednodušený princip multiplikátoru [46].

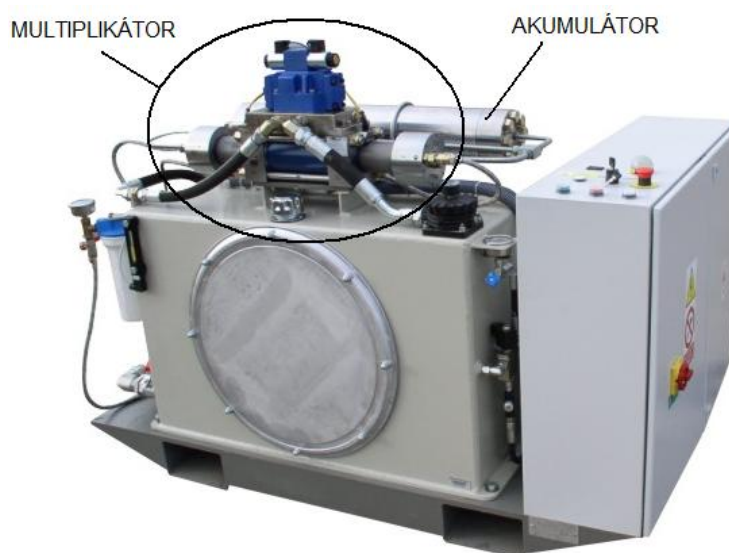
Reálný řez multiplikátorem s jednotlivými díly je zobrazen na obr.2.3c. Na každé straně multiplikátoru jsou umístěny dva zpětné ventily, kdy jeden slouží pro přívod vody do systému a druhý je určen pro výstup vysokotlaké vody dále do akumulátoru.



Obr. 2.3c Řez multiplikátoru s jednotlivými díly [46].

c) Akumulátory

Akumulátory jsou zařízení, jež slouží k vyrovnávání změn tlaku v systému zapříčiněné oscilačním pohybem pístu. Akumulátor je umístěn v systému za multiplikátorem (obr. 2.4). Jde o dutý hrubostěnný válec určitého objemu, v němž je stlačena pracovní kapalina na požadovaný pracovní tlak. V okamžiku, kdy dojde k lokálnímu poklesu tlaku vlivem zpětného pohybu pístu, kapalina ve válci expanduje a část jejího objemu proudí do systému řezací hlavy z důvodu vyrovnání poklesu tlaku a zabezpečení nepřetržitého toku kapaliny. Účelem akumulátoru je eliminace tlakových špiček v multiplikátoru a zajištění distribuce stabilního a plynulého toku vysokotlakého paprsku do řezací hlavy pro maximální efektivitu a bezpečnost celého systému. [4,33]



Obr. 2.4 Systém čerpadla s akumulátorem českého výrobce PTV (typ JETS -3.8/60 Basic). [38]

2.3 Vysokotlaké potrubí a hydraulické rozvody

Každá z firem, jež se zabývá výrobou systémů vodního paprsku, si volí svou ideální paletu armatur a spojovacích prvků s přihlédnutím na konkrétní aplikace. Celý systém vysokotlakého potrubí a hydraulických rozvodů musí odolat vysokým hydraulickým tlakům, dynamické zátěži v systému a vlastnostem řezné kapaliny. Jednotlivé spojovací prvky jsou normalizovány s ohledem na jejich složitost montáže, údržbu aj. Pro každý okruh systému budou uvažované rozdílné dimenzování rozvodů (např. pro rozvod kapaliny multiplikátorem bude vyšší kritérium náročnosti než pro přívod vody do celého systému vodního paprsku).

Vysokotlaké kapaliny s tlakem do 700MPa bývají dopravovány vysokopevným potrubím o vnějším průměru do 20mm a vnitřním do 7mm (obr. 2.5). Tato potrubí jsou vyrobena z vysokopevnostních korozivzdorných materiálů, jako jsou např. vysokopevnostní austenitické oceli třídy 17 (především ocel 17 351). [4, 33]



Obr. 2.5 Korozivzdorné potrubí pro vedení vysokotlaké vody. [33]

Při montáži hydraulických rozvodů je třeba dbát pokynů výrobce, jež má podrobné návody, a důsledně instalovat potrubí a jednotlivé spojovací prvky. Díky vysokopevnostním vlastnostem austenitické oceli je zajištěna bezpečnost systému rozvodu. Pokud dojde k prasknutí nebo poškození potrubí, stěny armatury se okamžitě zborští a tím dojde k utěsnění rozváděné vysokotlaké kapaliny. Toto zborštění je zajištěno díky speciální úpravě potrubí (autofretáži). [4, 33]

2.4 Těsnění

Těsnění jsou nejvíce opotřebovávanými částmi celého systému vodního paprsku, jelikož jsou na ně kladeny vysoké nároky z důvodu stability tlaku vody (obr.2.5a). U multiplikátoru, kde se tlak pohybuje v rozmezí 200-500MPa, je nutné, aby těsnění mělo nízké průsaky, co nejvyšší možnou životnost a minimální tření. Těsnění se umísťuje do komory multiplikátoru tak, aby se píst v něm mohl volně pohybovat. Těsnění s přirozeným utěsňováním zaručuje vytvoření malé kontrolované mezery pomocí pružného válcového pouzdra, jež se deformuje vlivem rozdílu na jeho vnější a vnitřní ploše. Dále se používají mezikroužky, které se deformují a utěsňují povrch pístu a válce. Jsou vyrobeny např. z teflonu, skelných vláken. Deformace lze dosáhnout dvěma způsoby, a to předpětím, jež vznikne působením přitlačné matice, kuželu a kovového kroužku, nebo autodeformací. Autodeformace využívá nízkotlakou kapalinu hydrogenerátoru, jež tlačí na píst a kužel, který pomocí kovového kroužku deformuje mezikroužek a tím utěsňuje prostor mezi pístem a válcem. [4]



Obr. 2.5a Těsnění firmy PTV [17].

2.5 Souřadnicové CNC stoly

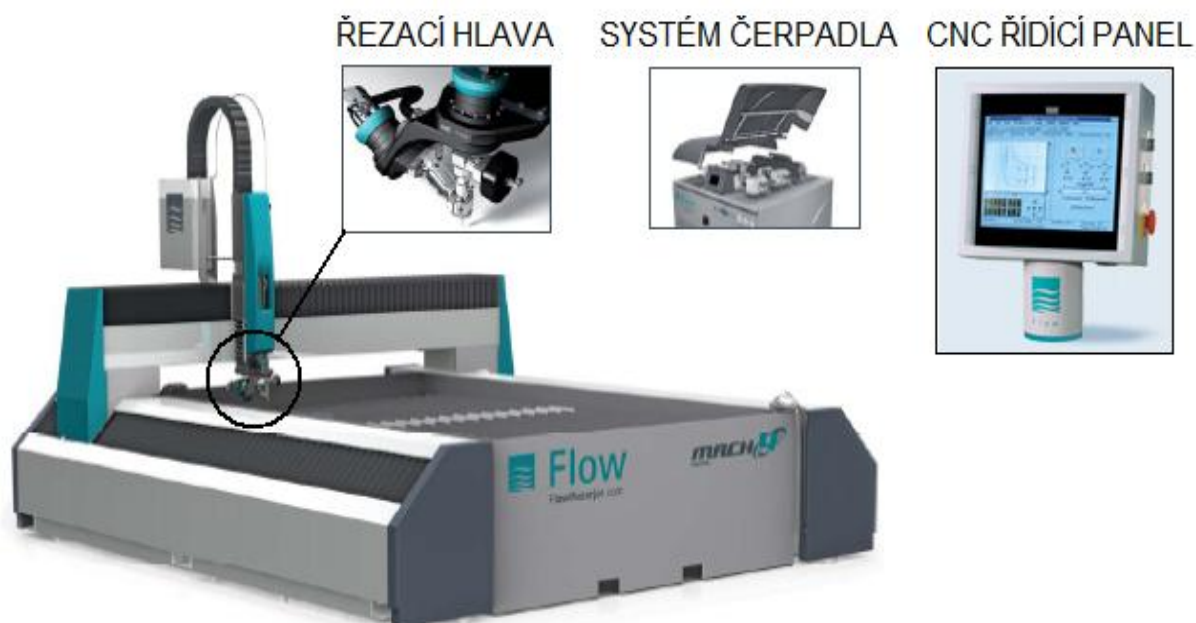
Ekonomická efektivnost systémů obrábění vodním paprskem je v technické praxi více výrazná ve spojení s NC dvou či víceosými stoly a téměř se všemi typy průmyslových robotů. Tímto spojením se zvyšuje produktivita až několikanásobně. V současnosti bývají CNC souřadnicové stoly vybavovány profesionální technologií na vysoké úrovni (např. kvalitními řídicími systémy s vysokou přesností mechanizace aj.). Takto vybavený stůl zaručuje vysokou kvalitu, přesnost řezu, z toho vyplývá později např. snížení nákladů. [4, 33]

Ve většině případů výrobci kladou důraz na kvalitu materiálů, a proto jsou téměř celé konstrukce stolů vyrobeny z korozi-vzdorných ocelí. Pracovní plocha stolu je vybavena kuličkovým povrchem, jenž zaručuje snadnou manipulovatelnost s obrobkem na ploše plechovými lamelami a rošty (nejvíce rozšířené v praxi). Mezi další vybavení patří odtokové kanálky pro odvod již použité řezné kapaliny s jemnými částičky odbroušeného materiálu. Systém kanálku ústí do lapačů vody, kde se voda čistí filtrací a odstraňují se z ní nečistoty (např. elektromagneticky – kovové částice). [4]

Stoly jsou vybaveny souřadnicovým portálem, jenž zabezpečuje přesný posuv řezací hlavy nad obráběným materiálem pomocí souřadnicového systému. Tento posuv je zabezpečen kuličkovými šrouby, jež jsou natolik přesné, že jej dokáží řídit s přesností jedné tisícin milimetru. Pro polohování stolů se používají zpravidla servomotory. Portálový souřadnicový systém je oddělen vany (lapače použité řezné kapaliny) a je vybaven u větších modelů oboustranným pohonem a automatickým systémem kontroly kolmosti vůči povrchu obráběného materiálu v průběhu provozu. K řízení posuvu slouží ozubené tyče a hřebenové válce, jež minimalizují vnikání nečistot a snižují hlučnost vodících prvků, které jsou kalené a povrchově upravené. [4]

Řezací hlavy jsou vedeny pomocí digitálních servomotorů s kódovacími zařízeními (osy Y, Z). Hlavy jsou vybaveny výškovými senzory a taktéž senzory, jež zabezpečují, aby nedošlo ke kolizi s obráběným materiálem. Celý stůl snese vysoká zatížení (řádově několik tun). Rozsahy pracovních stolů jsou uváděny zvlášť jednotlivými výrobci. Od nejmenších stolů s rozměry 1000 ku 2000mm (výška k šířce) až po individuální rozměry požadované zákazníkem. Jelikož je celá konstrukce do jisté míry individuálně řešena na žádost zákazníka, je možné měnit i počet řezných hlavic. [4]

Pro názornost je zde (obr. 2.6) uveden CNC řezací centrum vodním paprskem od firmy Flow.



Obr. 2.6 CNC centrum firmy Flow (model Mach 4), dle [39].

Na CNC zařízeních firmy Flow lze dělit WJM a AWJ paprskem téměř všechny druhy materiálů (např. kámen, dřevo, plasty, sklo, mramor, atd.) tlakem až 6500bar.

Tab. 2.2 Parametry CNC zařízení typu Mach 4C, dle [39].

stroje	MACH 4 3020c	MACH 4 3060c	MACH 4 4020c	MACH 4 4030c	MACH 4 4060c
rozsah řezání (X,Y,Z)	3 x 2 x 0,2 m	3 x 6 x 0,2 m	4 x 2 x 0,2 m	4 x 3 x 0,2 m	4 x 6 x 0,2 m
přesnost (+/-)	0,02 mm v délce 1 m				
přesnost opakovaného najetí (+/-)	0,025 mm				
rychloposuv	35 m.min ⁻¹				
rychlost řezání	25 m.min ⁻¹				

2.6 Řezací hlavy

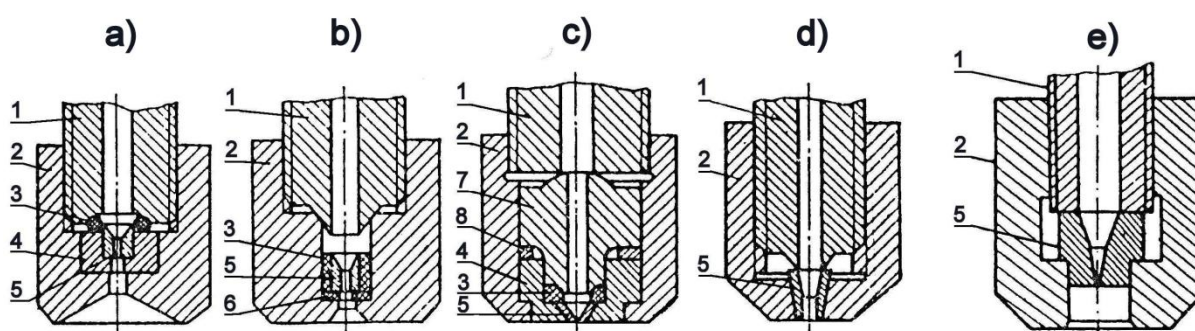
Řezací hlava s tryskou je nejdůležitější částí celého systému obrábění vodním paprskem, jelikož v konečném důsledku ovlivňuje kvalitu vodního paprsku a tak i kvalitu obráběné plochy. Řezací hlavy se vyrábějí s bajonetovým uzávěrem pro snadnou montáž a efektivnější upínání. Tímto způsobem odpadá kalibrace trysek při výměně z důvodu středícího systému uchycení. Důraz je kladen taky na hmotnost celé hlavy, aby nedocházelo k zatížení nosného ramene a tím snižování přesnosti řezání.

Jak již vyplynulo z předchozích kapitol, užívají se dvě nejčastější metody řezání vodním paprskem (řezání čistým a abrazivním vodním paprskem). Jelikož jsou obě metody odlišné, musí se používat pro každou specifické dýzy.

Proto z hlediska konstrukce rozdělujeme řezací hlavy:

- řezací hlavy pro WJM,
- řezací hlava pro AWJ,
- řezací hlava pro ASJ.

Jednotlivé druhy byly již popsány v kapitole druhy kapalinových (vodních) paprsků (Kap. 1.5). Hlavní částí každé řezací hlavy je dýza. Její jednotlivé geometrické prvky a vlastnosti dotvářejí konečný charakter řezného paprsku. Rozlišujeme pět základních tvarů vodních dýz (obr. 2.7). [4]



Obr. 2.7 Základní konstrukce řezacích hlavic s vodními dýzami, dle [4].

(1 – přívodní potrubí, 2 – těleso držáku, 3 – pružný člen, 4 – oporná podložka, 5 – vodní dýza, 6 – pružné těsnění, 7 – stabilizátor, 8 – těsnění).

Tvary dýz: **a)** válcová, **b)** kuželová s přechodem do válcové, **c)** kuželová, **d)** kónická, **e)** složená.

Materiály vodních dýz se volí dle působících tlaků:

- pro nízké tlaky – dýzy z tvrdokovu,
- pro střední a vysoké tlaky – rubínové, safírové dýzy popř. vyrobeny ze syntetického diamantu (obr. 2.8).

Vodní dýzy vyrobené ze syntetického diamantu dosahují až 10 násobek životnosti safírových či rubínových dýz, přičemž jsou až 10 násobně dražší. Jejich výhodou je možnost opakovaného čištění otvoru při zachování jeho vlastností. Čištění se provádí za pomoci ultrazvuku. Životnost dýz závisí na kvalitě pracovního média, především pak na druhu používané abrazivní směsi. Samotná výroba těchto dýz je velmi náročná a nákladná z důvodu vysokých požadavků kladených na přesnost, kvalitu materiálů atd. Průměr výstupního otvoru

dýzy (zuzující se geometrie tvaru) se pohybuje v rozmezí 0,06 mm až 1,7 mm. Rychlost vysokorychlostního paprsku tryskajícího z dýzy je cca v rozmezí 300 až 1200 m·s⁻¹ a to při velmi malém vnitřním průměru dýzy (výtokové části). Mezi hlavní kontrolované faktory při výrobě dýz patří drsnost vnitřního povrchu. [4,32]

Pro řezání WJM paprskem měkkých materiálu (např. guma, plasty, koberce, aj.), se užívá řezacích hlav, kdy není jejich součástí směšovací komora.

Použitím abrazivní trysky dochází ke zvýšení řezných schopností čistého vodního paprsku. Tento způsob lze popsat následovně, kdy přívodním potrubím proudí kapalina pod vysokým tlakem do směšovací komory. Vtékáním do rozšířeného prostoru směšovací komory dochází ke změně proudění z laminárního na proudění turbulentní. Následně dochází k částečnému víření pracovní kapaliny a vzniká podtlak, který přisává abrazivo z přívodního potrubí ze zásobníku, jež je dále strháváno paprskem vody ve směšovací komoře. Tento paprsek přiděluje část své kinetické energie abrazivu a napomáhá tak k efektivnímu procesu řezání. [4, 32]



Obr. 2.8 Jednotlivé části řezací hlavy (abrazivní tryska, řezací hlavice) [41].

2.7 Druhy abraziva a jejich vlastnosti

Řezná směs neboli abrazivo hraje velkou roli v technologii obrábění vodním paprskem AWJ, jelikož několikanásobně rozšiřuje možnosti v oblasti dělení materiálů. Efektivita obráběcího procesu velkou měrou závisí na druhu abraziva, jež je významným technologickým parametrem. Mezi nejvýznamnější kritéria abrazivních částic patří řezivost, zrnitost, tvrdost, pevnost, ad. [19]:

a) Řezivost

Dána krystalickou strukturou abrazivních částic, jež mají tvar kubické krystalové mřížky, která zaručuje částicím nižší hodnotu otupení. Při dopadu částice na hranu řezaného materiálu dochází k vytvoření nových hran na ploše částice. Díky tomu lze již jednou použité abrazivo recyklovat a znovu zavést řezný proces. Avšak tyto částice ztrácí již při prvním procesu řezání svůj řezný výkon cca o 30%. Proces recyklace je poměrně složitý a zpravidla se využívá ve státech, kde je nedostatek užitkové vody vhodné pro obrábění

vodním paprskem především z důvodu klimatických podmínek (Blízký východ, pouštní státy,...). [3, 33]

b) Zrnitost

můžeme charakterizovat jako velikost abraziva. Udává se v jednotkách MESH, která vyjadřují počet ok síta na čtvereční palec. Zrnitost můžeme rozdělit:

- Jemnou (MESH 100,120,150,...),
- Střední (MESH 60,80,...),
- Hrubou (MESH 10,16,36,...).

Velikost zrna se následně pohybuje od 0,1 až po 0,5 mm. Z toho vyplývá, že čím menší je velikost zrna, tím má řez nižší hodnotu drsnosti R_a , ovšem celý řezný proces nižší řeznou rychlost v_p .

c) Tvrdost

Při použití vhodného abraziva o dané tvrdosti pro konkrétní druh obráběného materiálu se zvyšuje maximální efektivita řezného procesu. V oblasti strojírenství můžeme jednotlivé druhy abrazivních materiálů (obr. 2.10) rozdělit do dvou základních skupin [29]:

- **Kovové materiály** (ocelový granulát, ocelová drť, korozivzdorný granulát)
- **Nekovové materiály** (balotina, hnědý a bílý korund, keramické a plastické abrazivo, křemičitý písek, granát, olivín)

V praxi se nejvíce užívají abraziva na bázi granátu (indický, australský – nejkvalitnější, ruský, čínský), jejich směsi s olivínem a křemičité písky.

Každá z firem vyrábějících abrazivo uvádí jiná chemická složení. Jako příklad Tab. 2.3 vytvořená z údajů firmy PTV s r.o.

Tab. 2.3 Složení abraziva (granátu GMA) australského původu [11].

chemické složení								
Prvek	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	CaO	MgO
Obsah %	36	20	30	2	1	1	2	6
minerální složení								
Minerál	Granát	Ilmenit	Zirkon	Křemen	Ostatní			
Obsah %	97 ÷ 98	1 ÷ 2	< 0,2	< 0,5	< 0,25			

Tento abrazivní materiál typu GMA je vhodný pro řezání mědi, žuly, uhlíkových ocelí, hliníku, gumy, skla, mramoru, korozivzdorných ocelí, dřeva a dalších materiálů.[11]

Fyzikální charakteristika granátu GMA [11]:

- sypná hmotnost $2,38 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$,
- měrná hmotnost $4,1 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$,
- tvrdost dle Mohra $7,5 \div 8,0$,
- bod tavení $1250 \text{ }^\circ\text{C}$,
- tvar přírodních zrn kubický.

Další charakteristiky [11]:

- vodivost max. $0,25 \text{ mS/cm}$
- radioaktivita není měřitelná nad podložím,
- absorpce vlhkosti není hydroskopický, je inertní,
- chloridy celkem $< 0,0025 \%$,
- volné Fe; Cu; ostatní $< 0,01 \%$.



Obr. 2.10 Druhy abrazivních materiálů, dle [29].

Na celkové hodnotě nákladů se abrazivo podílí asi z 50%. Proto je vhodné volit různě tvrdá abraziva a to podle tvrdosti obráběného materiálu. Cena australského granátu se v současnosti pohybuje okolo 7 Kč/kg.

2.8 Doprava abraziva do systému

V závodech, které sdružují více řezných stolů (popř. více řezných hlav na jednom stole), je nutné, aby se abrazivum dostalo rovnoměrně ke všem stolům najednou. Proto se používá systému dálkového dopravy abraziva, jež pomocí stlačeného vzduchu ze zásobníku posouvá abrazivo potrubím do dávkovačů (obr. 2.11) umístěných nad plošinami řezacích stolů.



Obr. 2.11 Dávkoč abraziva ATD IV firmy PTV [11].

Výhody použití řízeného dávkoče abraziva [11]:

- možnost plynule měnit průtok abraziva během procesu řezání bez zastavení řezání,
- manuální či automatická regulace pomocí software,
- kvalita řezu se zvyšuje s ohledem na regulaci,
- snížení nákladů úsporou abraziva,
- snížení rizika průniku vody do násypky dávkoče,
- snížení spotřeby tlakového vzduchu,
- snížení rizika ucpání abrazivní trysky.

2.9 Řídicí systém

Řezací CAD/CAM software slouží ke zpracování dílčích kroků zakázky a vytváření řezacího postupu s NC kódem. Za pomoci softwaru je vytvořen program, jehož lze využít opakovaně v dalších zakázkách. Rychlost řezných operací závisí především na kvalitní přípravě výroby a správném vyhotovení řezného programu. Většina výrobců obráběcích center vodním paprskem vytváření i svůj vlastní operační software, jako např. firma Flow software FlowMaster. [1,6]

Program FlowMaster (obr. 2.12) je inteligentní řídicí systém pro stroje na řezání vodním paprskem. Program běží pod operačním systémem MS Windows. Pomocí rozšířených možností menu lze nastavit správné parametry řezné rychlosti, děrování, funkce pumpy a stroje, které jsou včetně průběhu řezu zobrazovány na monitoru. [1,6]

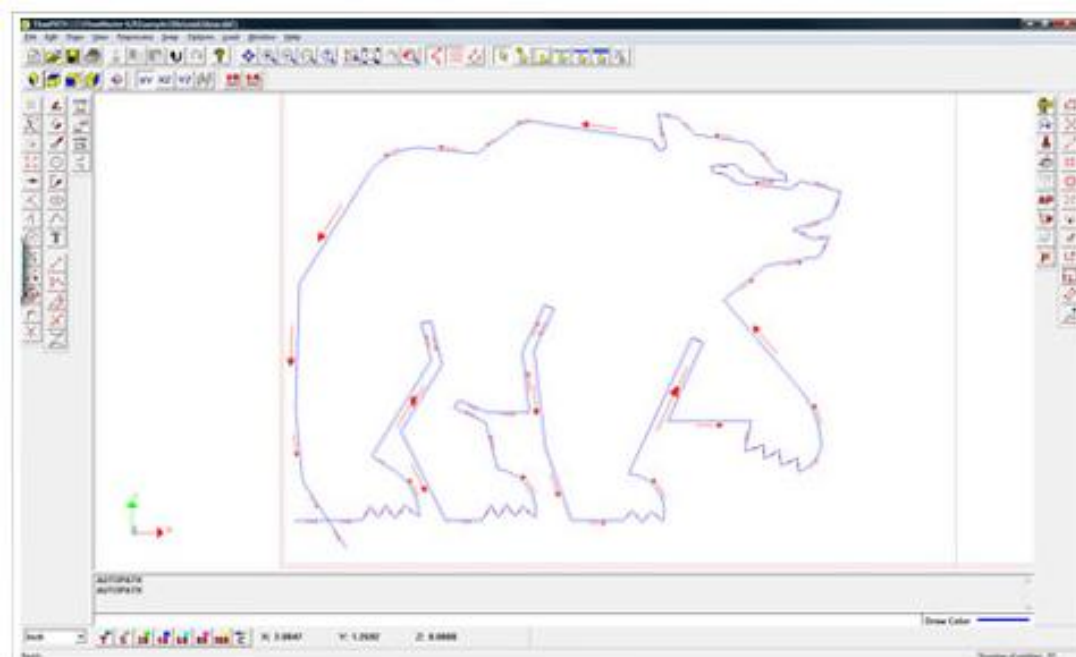
Předností programu je kromě jednoduché obsluhy také integrovaná databáze řezných parametrů pro prakticky všechny na trhu dostupné materiály a jejich síly. Díky kompatibilitě s CAD kreslení lze importovat nebo vytvořit jakýkoliv standardní kreslicí formát (dxf, igs, atd.). Dalšími možnostmi jsou automatická optimalizace rychlosti, řezné dráhy a další

parametry pro všechny materiály. Tím šetří uživateli mnoho času při postupném programování a nastavování jednotlivých funkcí. [1,6]

Práce s programem FlowMaster nevyžaduje znalost CNC programování. Všechny parametry (např. materiál, tloušťku, kvalitu řezu, atd.) lze zadat do softwaru a ten dopočítá zbylé parametry. [1,6]

Výhody programu FlowMaster [1,6]:

- jednoduchý software, není potřeba žádných speciálních znalostí,
- integrovaná databáze řezacích parametrů pro všechny materiály a tloušťky,
- operátor může současně řídit a monitorovat všechny funkce,
- pomocí kompatibility s CAD kreslením lze importovat jakýkoliv standardní kreslicí formát i skenované obrázky,
- automatická optimalizace řezné rychlosti, dráhu a obráběcí parametry pro všechny materiály.



Obr. 2.12 Kreslicí rozhraní programu FlowMaster [1].

2.9.1 Dynamic WaterJet (DWJ)

Tento systém vyřezávání tvarů společnosti Flow řeší problematiku povrchu v místě řezu (obr. 2.13). Princip řešení této problematiky spočívá ve vhodném natáčení obráběcí hlavy vůči obrobku, čímž dochází k eliminaci vzniku defektů (okem viditelným rýhám s vysokou hodnotou drsnosti povrchu) a zvýšení řezné rychlosti, aniž by došlo ke vzniku nežádoucích jevů. [1,6]

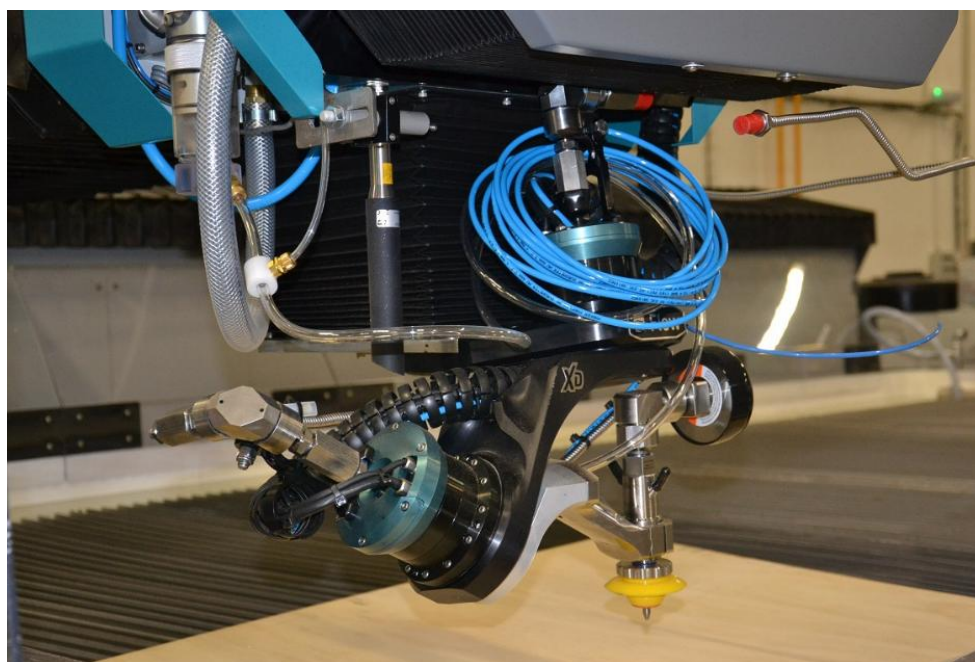
System DWJ pracuje na principu sledování vzoru obrysu a měnění úhlu sklonu dle požadavků kvality řezání. Skládá se z pohybového systému a matematických modelů řezání. System DWJ plně nahrazuje zastaralé systémy a otevírá nové možnosti výroby (např. výroba nástrojů, forem, součástek pro letecký a vojenský průmysl). [1,6]

Hodnota tolerance se i při řezání širších a tvrdších materiálů pohybuje v rozmezí $\pm 0,04 \text{ mm}$. V porovnání se staršími systémy dosahuje DWJ až o 50% snížení nákladů, při řezné rychlosti vyšší až o 10%. [1,6]

Princip systému DWJ spočívá v identifikaci řezné plochy a určení pro ni příslušný počet stupňů. Jestliže je úkos plochy menší či roven přiřazenému úhlu plochy, pak se nastaví rychlost zjištěná v polích rozvinutého modelu dialogu. Pokud je však úkos plochy větší, potom se rychlost určí na základě matematického vztahu, který nastaví řeznou rychlost dle hodnoty nalezeného na základě rozvinutého modelu dialogu a rychlostí v procentech přiřazenou objektu, jenž plochu obsahuje. System DWJ na základě předchozích vyhodnocení určí přesnou orientaci řezné hlavy a tím zvýší přesnost tvaru obrobku. [1,6]

Výhody systému DWJ [1,6]:

- zvýšení rychlosti řezání až o 350% než běžná zařízení pro AWJ a WJM,
- zlepšení přesnosti a geometrie dílů i přes dosažení vyšších rychlostí,
- zabránění jakýchkoli chybám úkosu hrany řezu,
- snižování nákladů na řezání až o 70%,
- řezání bez dokončovacích prací.



Obr. 2.13 Řezací hlava se systémem Dynamic Waterjet společnosti Flow ve firmě Kovovýroba Matušík. [41]

3 TECHNOLOGICKÉ MOŽNOSTI WJM A AWJ VE STROJÍRENSTVÍ

V současnosti se systémy WJM a AWJ používají nejen pro oblast dělení materiálů, ale i pro operace obrábění jako jsou soustružení, frézování, vrtání, gravírování, obrábění rotačních součástek různých tvarů a těžkoobrobitelných materiálů a další. Celý systém lze tak naplno využít v různých odvětvích průmyslové výroby.

3.1 Řezání (dělení) materiálu

Jedná se o historicky první využívanou a základní technologii v oblasti využití vodního paprsku. V poslední době se obě metody (WJM, AWJ) využívají především k procesu dělení. Oproti minulosti dnešní systém vodního paprsku dokáže dělit i vícevrstvé materiály (obr. 3.1), kompozity, atd. První zmínka použití vodního paprsku pro vícevrstvé materiály o různých vlastnostech se datuje do 60. let 20. století, kdy této technologii bylo využito pro stavbu raketoplánu. Výhodou pro řezání těchto materiálů je minimální silové působení vodního paprsku, jež nedeformuje slabší a méně pevné vrstvy materiálů sendvičového charakteru. Dalším mezníkem pro technologii vodního paprsku bylo zavedení softwaru řízených pohybů trysky, jež umožnilo řezání materiálů složitých tvarů z velmi tvrdých materiálů. Pomocí softwaru se optimalizuje umístění obrobků na polotovaru, což má za následek úsporu materiálu a snížení ztrát vzniklých odpadem.

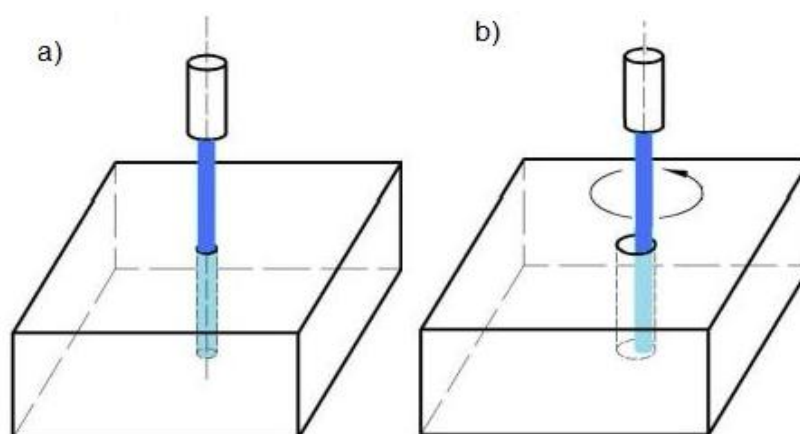


Obr. 3.1 Řezání vícevrstvých materiálů systémem společnosti Flow. [1]

3.2 Vrtání

Při **vrtání a vyvrtávání** existuje několik metod. Může být stacionární jak obrobek, tak paprsek, nebo je stacionární jen obrobek a paprsek rotuje nebo kmitá. Technologii vrtání a vyvrtávání abrazivním vodním paprskem využijeme především u jinak těžko obrobitelných materiálů, jako jsou keramika, niklové slitiny, sklo (nekalené) atd. V současnosti je známo několik způsobů vrtání děr, které jsou charakterizovány vzájemným pohybem vodního paprsku a obráběného materiálu. Rozeznáváme tyto 2 základní druhy vrtání (Obr. 3.2) [3]:

- a) vrtání děr
- b) vyvrtávání děr



Obr. 3.2 Způsoby vrtání pomocí technologie AWJ, dle [32,33].

Vrtání vodním paprskem se může zdát často jako nákladná metoda v porovnání např. s laserovou metodou. Avšak některé případy výroby tuto metodu striktně vyžadují. Např. výroba děrovaných filtrů obrazovek (obr. 3.3), z nichž každý filtr je složený z více než 1000 otvorů o průměru 12mm. Materiálem je plech z niklové slitiny o tloušťce 3mm. V porovnání s laserovou metodou, jež by byla rovněž reálná pro výrobu, metoda vodního paprsku neovlivňuje tepelně okraj řezu. Použití laseru je nevhodné z důvodu tepelného ovlivnění velkého množství děr, jelikož mezi nimi jsou malé vzdálenosti. Docházelo by k velkému přenosu tepla a následnému zkreslení či deformaci děr.



Obr. 3.3 Ukázka vyvrtávání děr materiálu z niklové slitiny. [42]

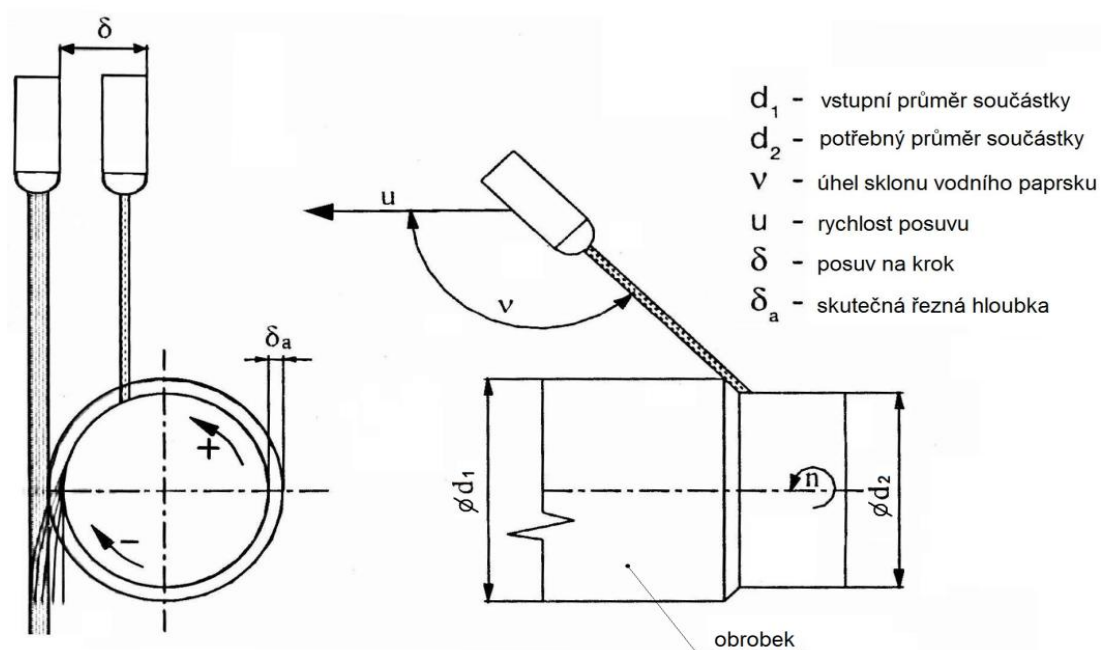
3.3 Soustružení

V porovnání s konvenčním soustružením je AWJ soustružení méně citlivé na geometrický profil obrobku, umožňuje např. obrábění dlouhých obrobků o malém průměru. Proces AWJ soustružení je vhodný zejména pro těžkoobrobitelné materiály, jako jsou keramika, grafitové kompozity, skla, lamináty, pískovec (Obr. 3.4), aj. [43]



Obr. 3.4 Ukázka soustružení pískovce technologií AWJ [43].

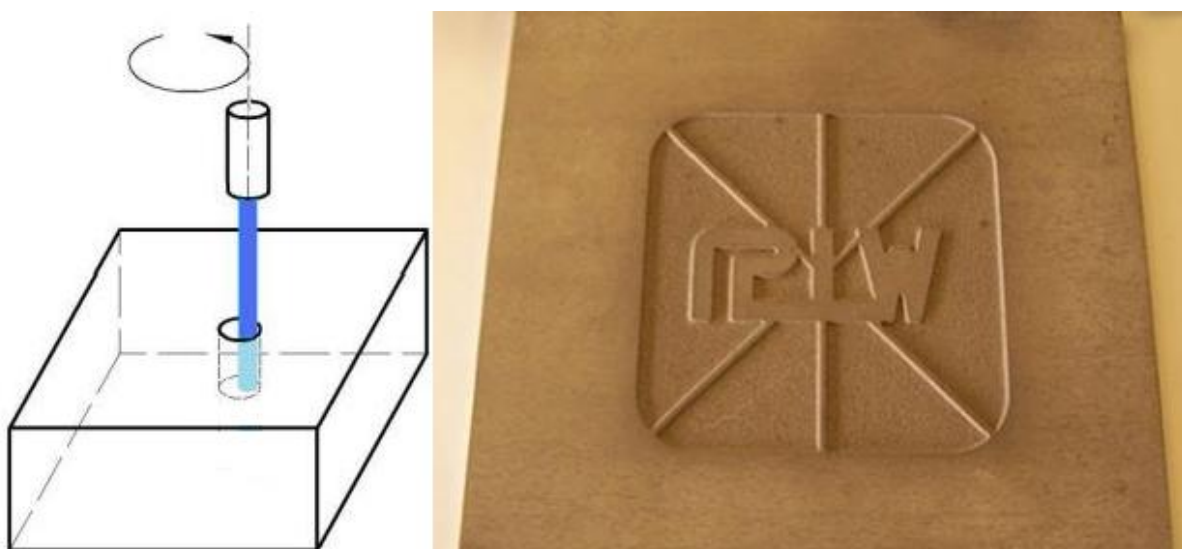
Při soustružení obrobek rotuje kolem své osy a AWJ paprsek se posouvá v axiálním směru k ose obrobku. Úběr materiálu je zabezpečený radiálním posuvem paprsku do požadované hloubky obrobku. Schematicky znázorněno na obr. 3.5.



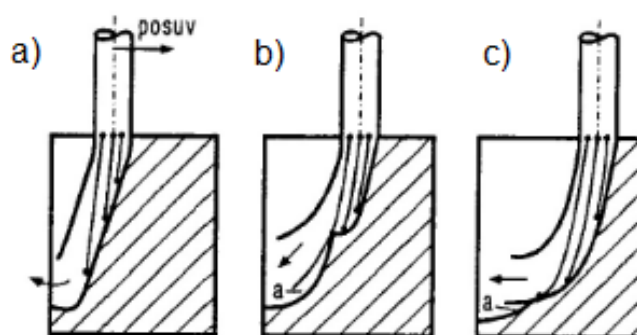
Obr. 3.5 Schéma soustružení technologií AWJ, dle [4].

3.4 Frézování

Frézování vodním paprskem se používá pro tvorbu tvarově složitějších dílů, jako jsou např. skořepiny či licí formy. Při frézování dochází k úběru materiálu řezáním ovšem jen do určité hloubky tak, aby nedošlo k prořezání (obr. 3.6). Tato metoda je podobná metodě gravírování, která je popsána dále. Při vysokotlakém vodním frézování paprsek přechází po obráběné ploše a postupným odebíráním vrstev materiálu tvoří konečný tvar obrobku (obr.3.6a). Pomocí této technologie lze obrábět materiály, které jsou běžnými technologiemi obtížné, ne-li nemožné obrobřit. [3,4]



Obr. 3.6 Ukázka vyfrézování loga do kamene pomocí technologie AWJ [44].

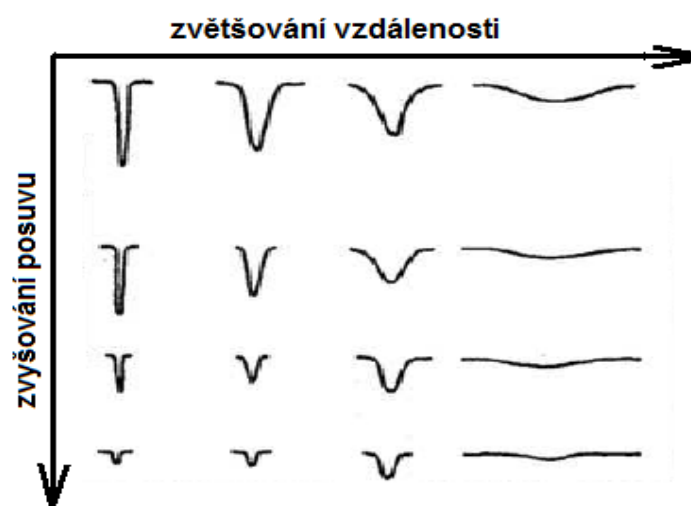


Obr. 3.6a Postupný cyklus frézování abrazivním vodním paprskem [3].

3.5 Gravírování

Gravírování je podobný způsob obrábění jako frézování technologií AWJ. Jedná se o tzv. 2,5D obrábění, kdy je materiál v podobě třísek odstraněn jen z určité hloubky povrchové vrstvy. Změnou posuvu v kombinaci se vzdáleností trysky nad materiálem (obr. 3.7) lze dosáhnout kvalitního gravírování. Tyto parametry nastavení zajišťuje program dodávaný při koupi stroje. Vodním paprskem je do materiálu vytvarován konečný reliéf, jenž bývá po opracování dotvořen následně konvenčními metodami. Materiálem bývají plasty, hliník, sklo

(obr. 3.8) aj. Gravírování se používá především v oblastech umění (ozdobné reliéfy,...). Výhodou gravírování technologií AWJ je samotná podstata řezu vodním paprskem. Díky němu lze oproti ostatním technologiím gravírovat veškeré materiály, a to i materiály hořlavé, křehké, těžko obrobitelné, pružné či sendvičové. U nebezpečných materiálů (tj. hořlavé nebo tepelně citlivé materiály) se nemusíme obávat vznícení, vzniku karcinogenních či jedovatých látek, nebo poškození obráběného dílu tepelným ovlivněním jako při použití laseru. Avšak vliv vlhkého prostředí na materiál může mít vliv na kvalitu obrobku. Z tohoto důvodu je nutné znát materiálové vlastnosti případného obrobku, např. hodnotu relativní nasákavosti, hloubku pronikání vody popř. stupeň poškození způsobený korozí. I přes velkou přesnost této metody může nastat nepřesnost obráběného tvaru (důvodem je průměr paprsku) daná vlivem zaoblení vnitřních rohů. Pro měkké a tenké materiály je průměr paprsku cca 0,25 mm. Pro silné a těžkoobrobitelné materiály je volen průměr paprsku AWJ v rozmezí 0,5 ÷ 2,5 mm. [45]



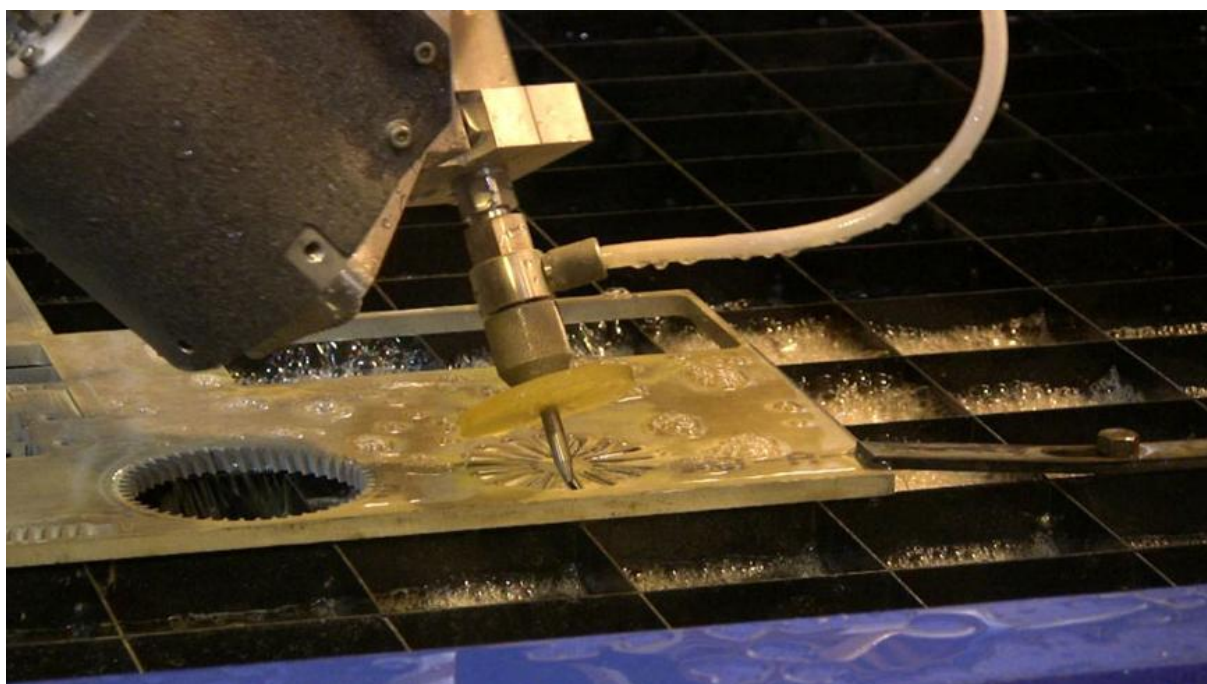
Obr. 3.7 Závislost tvaru povrchu na změně velikosti posuvu a hloubce záběru. [3]



Obr. 3.8 Ukázka gravírování reliéfů na mosaz a kámen technologií AWJ [16].

3.6 Trojrozměrné obrábění (řezání)

Jelikož jsou stále více kladeny nároky na možnost řezání různých tvarů vodním paprskem i pod úhlem, bylo nutné, aby se celý systém řezací hlavy přizpůsobil těmto požadavkům. Technologie prostorového obrábění (3D) je ve srovnání s běžným 2D obráběním daleko více kompaktnější díky vylepšenému řídicímu systému a pohybovým schopnostem řezné hlavy v pěti osách, jež je vybavena možností rotace kolem hlavní osy až o 360° a $\pm 90^\circ$ osy vedlejší. Z obr. 3.9 je patrné, že 3D technologií řezání vodním paprskem lze vyrábět tvarově velice složité výrobky. [1,6]



Obr. 3.9 Řezání lopatky pomocí 5osé řezací hlavy firmy Wardjet [46].

3.7 Průmyslové oblasti použití technologie WJM a AWJ

Tato technologie si získala pozici v nejdůležitějších oblastech výroby za desítky let využití díky své univerzálnosti a ekologickému hledisku. Díky ekologické čistotě lze zařízení provozovat nejen v uzavřených prostorech, ale i na prostranství bez znepokojení ze znečištění životního prostředí, či zdravotních následků na personálu obsluhujících zařízení. Na průmyslové využití technologie vodního paprsku poukazuje tab. 3.1 [3, 4].

Tab. 3.1 Užití technologie vodního paprsku v průmyslových odvětvích.

ODVĚTVÍ PRŮMYSLU	APLIKACE MOŽNÉHO POUŽITÍ
STROJÍRENSKÝ	Dělení kompozitních materiálů, extrémně tvrdých a těžkoobrobitelných materiálů titanu, wolframu, uranu, skel, izolačních materiálů, výroba tvarově složitých součástek, částí a lopatek tryskových i raketových motorů, turbín, kompresorů, atd.
ELEKTROCHEMICKÝ	Dělení plošných spojů, skla, keramických částí, elektroizolačního materiálu, a další
STAVEBNICTVÍ	Dělení polystyrénu, izolačních materiálů, skelných materiálu, azbestu, keramiky, betonu,...
CHEMICKÝ	Obrábění plastických hmot, výbušných látek, kompozitních a těžkoobrobitelných materiálů
POTRAVINÁŘSKÝ	Krájení masa, kostí, ovoce, zeleniny, sýrů,...
PAPÍRENSKÝ	Dělení papíru, novinového papíru, krabic, buničiny, fólií,...
SKLÁŘSKÝ	Řezání skla, plexiskla, plastových oken,...
KAMENICKÝ	Dělení kamenů, mozaiky, dlaždic, dekorační prvky,...
TEXTILNÍ	Dělení textilií, látek, textilních přípravků
OBUVNICKÝ	Dělení kůží, látek na obuv, různých plastických přípravků,...
METALURGICKÝ	Čištění odlitků, pro metalografické rozborů
HORNICKÝ	Hornické aplikace, proces eroze půdy, vrty,...
FARMACEUTICKÝ A MEDICÍNSKÝ	Operace nádorů, jater, ledvin aj., klinické a experimentální využití, odstraňování trombóz z cév, dělení léku,...
LETECKÝ A KOSMICKÝ	Dělení kompozitních materiálů, keramiky, titanu, hliníkových částí skeletů letadel, částí raketoplánu,...
VOJENSKÝ	Zneškodňování raketové munice, chemických zbraní, řezání pancéřových částí obrněných aut, speciálních částí tanků atd.
AUTOMOBILOVÝ	Dělení jednotlivých komponentů (nádrže, nárazníky, plechy karoserie, přístrojové desky, opěrky, interiérových prvků z PVC, čalounění, kompozitů, fólií, gumy, koberce keramické materiály, těsnění, různé mechanické součástky,...

Z dalších odvětví můžeme jmenovat gumárenský průmysl, umělecký průmysl (tvorba 2D i 3D soch, vytváření nápisů, znaků (obr. 3.10), reklamních tabulí, aj.). Je zřejmé, že využití technologie vodního paprsku je prakticky neomezené a plně se vyrovná konvenčním metodám.



Obr. 3.10 Umělecká tvorba pomocí technologie frézování vodním paprskem [47].

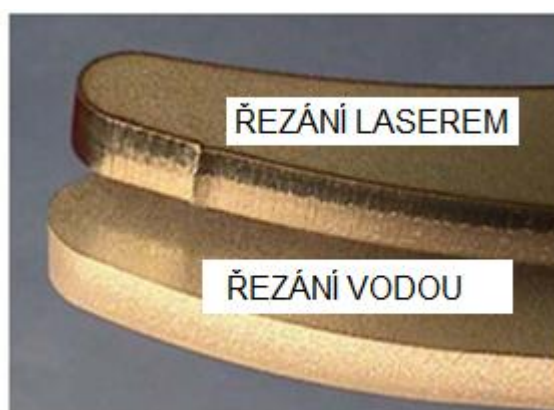
3.8 Výhody a nevýhody vodního paprsku

Každá z metod konvenčního či nekonvenčního obrábění má své výhody či nevýhody při srovnání mezi jimi samotnými. Proto je často složité vybrat správnou technologii pro výrobu dané součásti, aby bylo docíleno požadovaného standardu. U technologie vodního paprsku tomu není jinak.

3.8.1 Výhody technologií WJM a AWJ

- vysoká energetická účinnost (téměř 90%, laser 15%),
- nedochází k tepelnému namáhání materiálu,
- obrobek bez vnitřního pnutí, zbytkových napětí ani mechanické deformace,
- studený řez,
- bezprašný proces řezání (nevznikají páry, plyny),
- řezání probíhá bez dotyku nástroje a materiálu,
- vysoká ekologičnost technologie,
- malé ztráty materiálu z důvodu úzkého řezu,
- možnost řezání pod hladinou,
- řezání bez omezení tvarů, směrů, úkosů, obrysů apod.,
- relativně vysoká životnost trysek (200h u WJM a 100 u AWJ),
- lze řezat měkké, lepivé, křehké, hořlavé i další druhy materiálů,
- řezání sendvičových materiálů o různém chemickém složení a fyzikálních vlastnostech,
- kvalitní řez bez otřepů => není potřeba dalšího opracování,
- vysoká přesnost řezu (až $\pm 0,04 \text{ mm}$, běžně $\pm 0,1 \text{ mm}$),

- jednoduchost a spolehlivost obsluhy,
- řezání bez upnutí obrobků (řešeno dorazy),
- vysokotlaké čerpadlo může napájet více trysek současně,
- velká pracovní plocha (závisí na velikosti stroje),
- použití jiných kapalin kromě vody (oleje, tuky apod. v potravinářství),
- relativně nízká pořizovací cena (2 až 4 miliony Kč v základní výbavě), možnost dokoupení dalších komponentů a softwaru,
- možnost zaměnitelnosti komponentů od jiných výrobců,
- a další výhody systému vodního paprsku [12,20,21,25,27].



Obr. 3.11 Srovnání řezu technologií AWJ vs. Laser. [1]

Na obr. 3.11 lze vidět hlavní výhodu vodního paprsku AWJ vůči laseru, a to tepelně neovlivněnou oblast řezu.

3.8.2 Nevýhody technologií WJM a AWJ

- problémy při řezání materiálů, jež neodolávají vlhkosti,
- nutnost ošetřit povrchy některých materiálů, aby nevznikala povrchová koroze,
- delší doba vysoušení, popř. vyšší znečištění u nasákavých povrchů,
- vysoká hluchnost,
- zaoblení vnitřních rohů závisující na průměru vodního paprsku,
- prořez podkladového roštu,
- zdrsnění povrchu spodní části řezu (tzv. fenomén rýh),
- nižší rezná rychlost u tvrdších materiálů,
- celý systém musí být dokonale utěsněn, aby nedocházelo ke ztrátám výkonu řezného paprsku [12,25,27,50].

4 ŘEŠENÍ NÁVRHU VÝROBY NÁHRADNÍHO DÍLU ČERPADLA

Praktická část vychází ze znalostí získaných ze studia na vysoké škole a také z výrobní činnosti firmy Vy-TECH steel s.r.o. se sídlem v Lipůvce u Brna.

Firma Vy-TECH steel je ryze česká společnost s desetiletou zkušeností v technologii řezání vodním paprskem. Zabývá se zakázkovou výrobou různých druhů a tvarů materiálů (ocel konstrukční, korozivzdorná, tepelně zpracovaná, návarová s extrémní tvrdostí, slitiny hliníku, titanu, mědi, niklu, kompozity, sklolamináty, plasty, žula, mramor, pískovec, beton, dlažba, obklady, sklo, pěnové materiály a další).

Firma je vybavena americkým CNC strojem na řezání vodním paprskem společnosti FLOW (obr. 4.1). Jedná se technologickou řadu s označením MACH 3. Tento stroj dokáže řezat téměř jakékoliv materiály, od nejměkčích (př. papír) až po nejtvrďší (př. speciální slitiny). Je vybaven nejmodernější technologií Dynamic Waterjet, jež byla již dříve zmíněna, a vysokotlakým čerpadlem HyPlex™, jehož dílem se zabývá praktická část diplomové práce.



Obr. 4.1 Strojní zařízení MACH 3 pro řezání vodním paprskem ve firmě Vy-TECH.

4.1 Čerpadla

Stroj MACH 3 firmy Vy-TECH je vybaven hyplexovým čerpadlem firmy FLOW (obr. 4.2). Jedná se o přímo poháněné čerpadlo, kdy pomocí klikového hřídele jsou přímo poháněny plunžry ve vysokotlakých válcích. Konstrukce zaručuje celému systému stabilitu tlaku, snadnou údržbu a především vysokou účinnost. Ta u HyPlex čerpadel dosahuje až 95%, což znamená, že při stejném výkonu dodávají tato čerpadla asi o 30% více vody do systému než čerpadla s intenzifikátorem (násobičem tlaku). [6,15]

Hyplexová čerpadla firmy FLOW se vyrábějí ve dvou řadách a to podle velikosti příkonu hlavního motoru 23 kW a 37 kW (tab. 5.1). Čerpadla jsou navržena pro bezpečný a spolehlivý chod při řezání vodním paprskem v těžkých průmyslových podmínkách. [6,15]

Čerpadla HyPlex využívají regulační tlakový ventil k zajištění rychlé reakce v případě kolísání provozního tlaku, nebo otevření či uzavření průtoku vody řeznou tryskou. Použití regulačního tlakového ventilu je mnohem jednodušší a provoz je spolehlivější než u řešení, která využívají k regulaci průtoku vody obtokový ventil nebo dvojitou trysku. [6,15]

Tab. 4.1 Řady HyPlex čerpadel firmy FLOW [6].

ČERPADLO	Tlak [Bar]	Příkon [kW]	Průtok [$\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$]	Napájení [V]	Příkon [kVA]
HyPlex 30	3800	23	3,1	380	17
HyPlex 50	3800	37	4,7	380	29



Obr. 4.2 Systém hyplexového čerpadla ve firmě Vy-TECH.

4.2 Analýza materiálu dílu KONCOVKY

Zjištění chemického složení a struktury materiálu bylo provedeno na Ústavu materiálových věd a inženýrství fakulty strojního inženýrství VUT v Brně.

Příprava metalografických výbrusů se prováděla běžným způsobem, tedy broušením na metalografických papírech za mokra, leštěním diamantovými pastami a naleptáním mikrostruktury leptadlem Vilella - Bain. Ze vzorku materiálu poskytnutého firmou Vy-TECH bylo pomocí optického emisního spektrometru s označením Spectrumat GDS 750 (obr. 4.4) zjištěno chemické složení, jež odpovídá následujícímu materiálu:

Materiál: **Korozivzdorná ocel X5CrNiCuNb16-4** (Precipitačně vytvrditelná, martenzitická ocel), (viz. listy přílohy).

Norma: DIN EN 10088/1-3-97 – korozivzdorné oceli.

Vlastnosti: Ocel, jež má vynikající odolnost vůči korozi srovnatelnou s austenitickými korozivzdornými ocelmi typu 18CrNi10. V některých případech ještě austenitické korozivzdorné oceli uvedeného typu předčí vlivem přítomnosti Cu. Struktura oceli po odpovídajícím tepelném zpracování je odolná proti mezikrystalové korozi. Odolává taky korozní únavě při cyklickém namáhání v korozním prostředí a koroznímu praskání. Díky vysoké pevnosti po vytvrzení ocel velice dobře odolává i erozi v korozním prostředí.

Charakteristickou vlastností těchto ocelí je získávání požadovaných mechanických vlastností tzv. vytvrzováním. Vytvrzování lze provádět na již obrobeném dílu při relativně nízkých teplotách. To je jejich výhodou oproti martenzitickým ocelím, které je třeba k dosažení požadované pevnosti kalit a popouštět. U austenitických ocelí lze zase mechanické vlastnosti ovlivnit pouze chemickým složením nebo tvářením při normální teplotě. Podle probíhajících strukturních změn v průběhu vytvrzování, lze tyto oceli rozdělit do dvou skupin:

Martenzitické, precipitačně vytvrditelné oceli – u tohoto typu dochází během tepelného zpracování nejprve k martenzitické přeměně a následně k precipitaci v martenzitu. Při vytvrzování mezi 400 až 500°C se z martenzitu vylučují fáze typu Ni₃Ti a Ni₃Cu, které vyvolávají růst pevnosti na 1300 až 1500MPa.

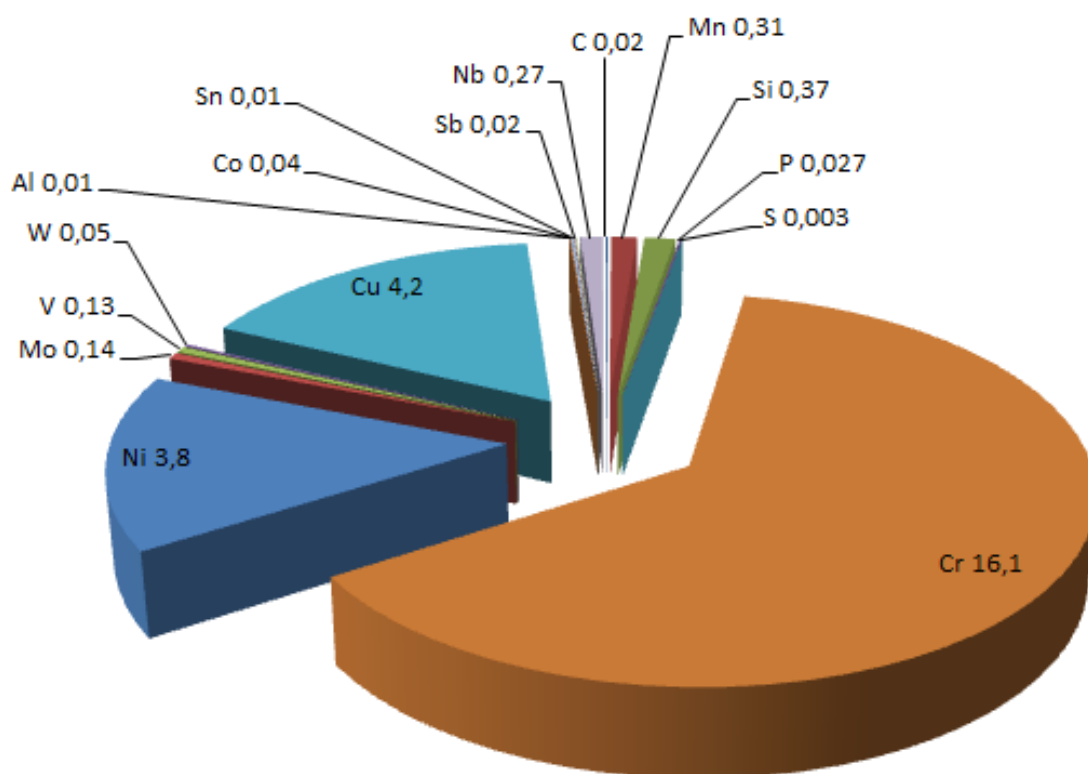
Ostatní vlastnosti: ocel je magnetizovatelná.

Polotovary: EN 10088-3 (polotovary, válcovaný drát, profily, tyče) – všeobecné použití,
EN 10088-2 (plechy a pásy) – užití ve zvláštních případech, kdy je možno provést precipitační žíhání.

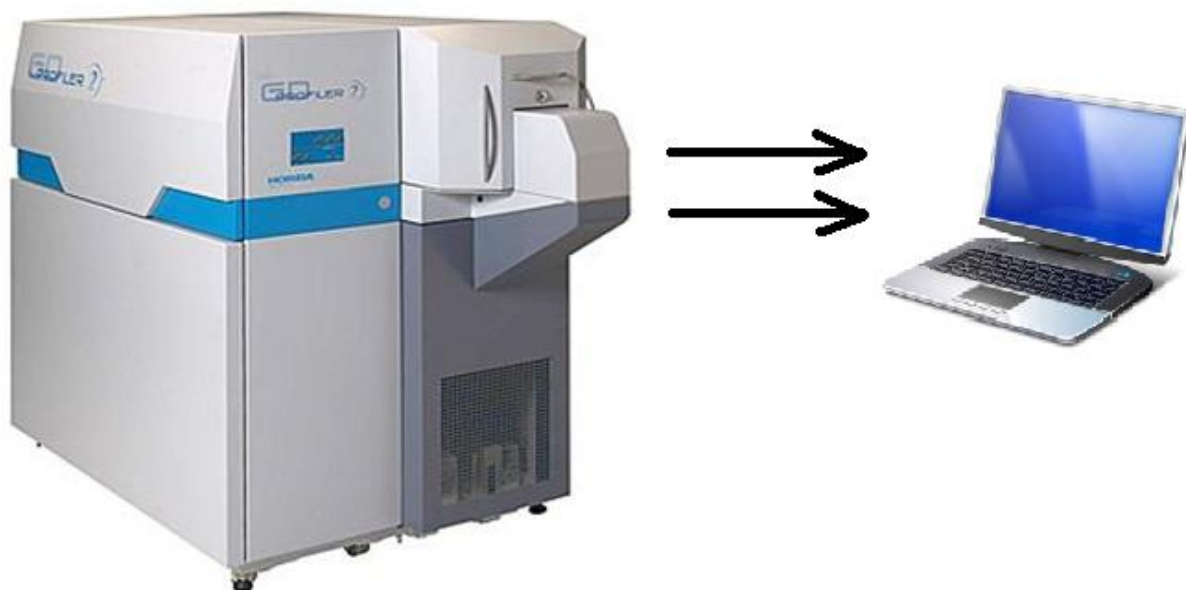
Použití: kola a víka kompresorů, materiál na šrouby a vřetena v armaturách, ventily ropných věží, vybavení chemických zařízení, části letadel, tlakové uzávěry čerpadel, součásti jaderných reaktorů, ozubená kola, části tryskových motorů a další možnosti uplatnění v průmyslu.

Tab. 4.2 Chemické složení korozivzdorné oceli v procentech hmotnosti (zbytek do 100 hmot. % tvoří Fe).

Prvek	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo
Obsah [%]	0,02	0,31	0,4	0,027	0,003	16,1	3,8	0,14
	V	W	Cu	Al	Co	Sn	Sb	Nb
	0,13	0,05	4,2	0,01	0,04	0,01	0,02	0,27

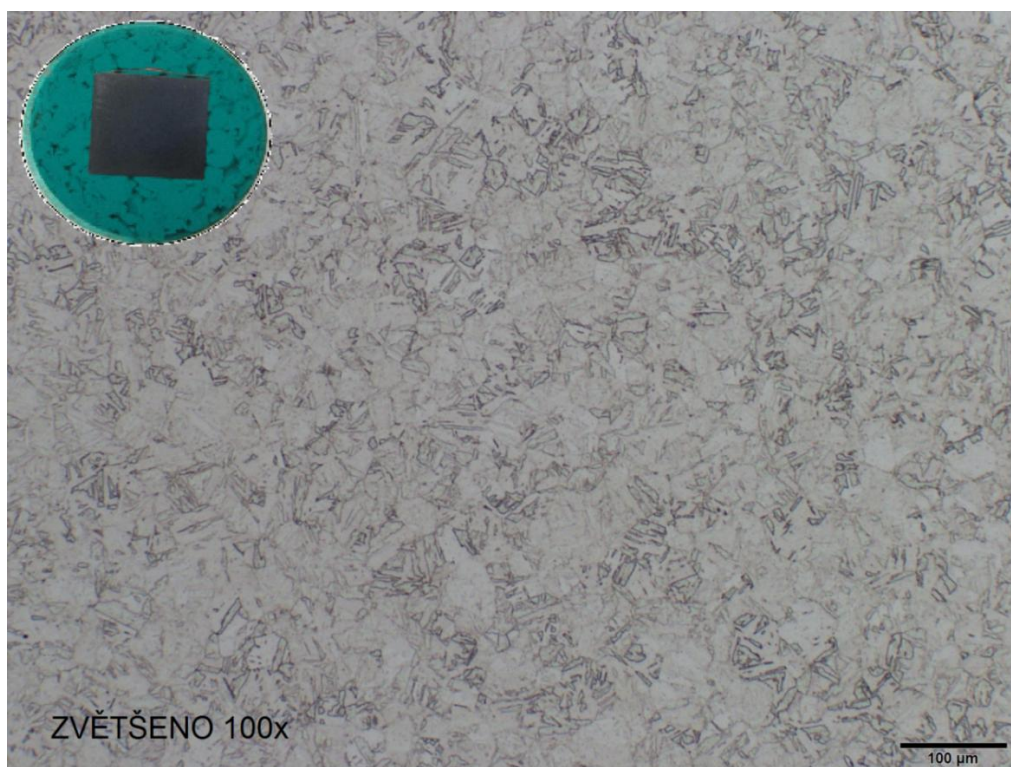


Graf 4.3 Grafické vyjádření chemického složení korozivzdorné oceli v hmot. % (kromě Fe).

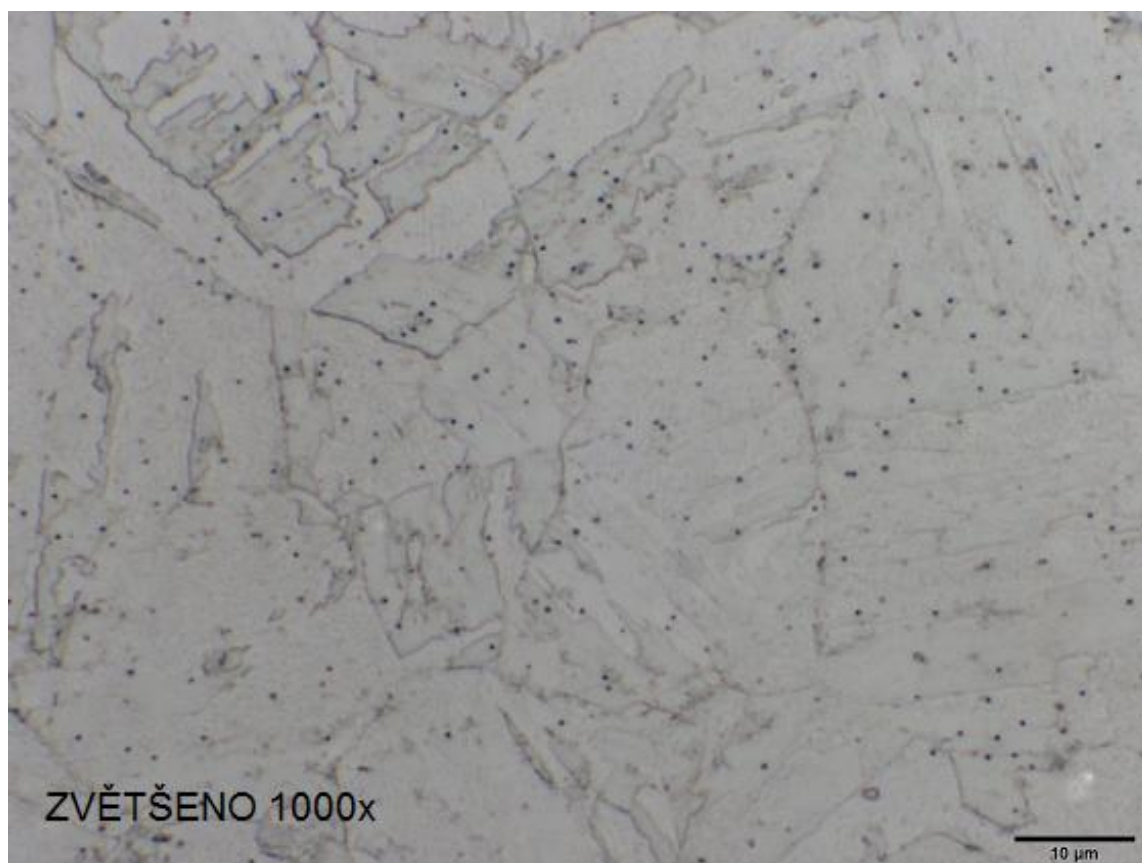
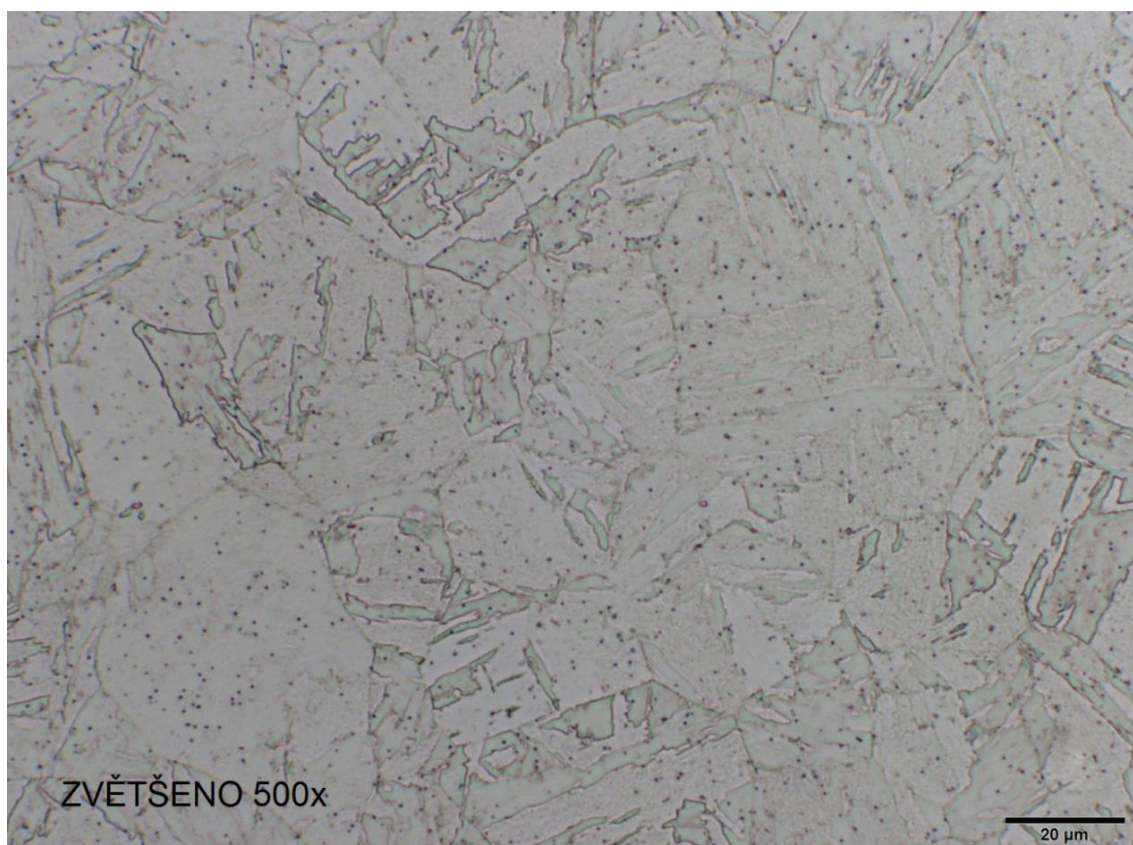


Obr. 4.4 Schéma vyhodnocení dat (tab. 4.2) získaných ze vzorku pomocí optického emisního spektrometru s doutnavým výbojem - Spectramat GDS [49].

Analýza mikrostruktury povrchu vzorku (obr. 4.5a,b) materiálu korozivzdorné oceli X5CrNiCuNb16-4 byla provedena na světelném mikroskopu Neophot 30 a Olympus GX51 s CCD kamerami.



Obr. 4.5a Martenzitická struktura korozivzdorné oceli X5CrNiCuNb16-4 (vlevo nahoře zalisovaný a leptaný vzorek)



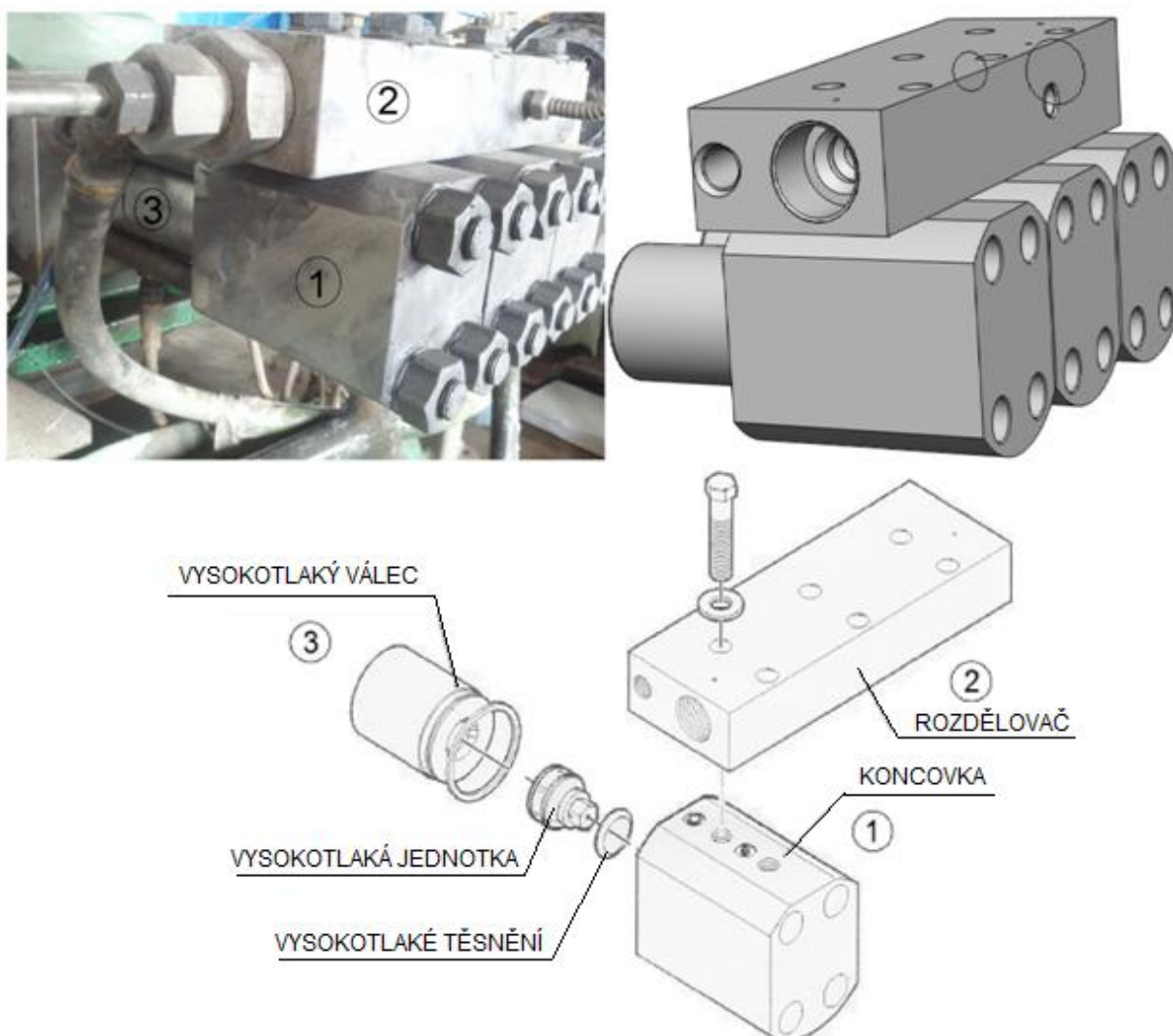
Obr. 4.5b Martenzitická struktura korozivzdorné oceli X5CrNiCuNb16-4.

4.3 Problematika dílu KONCOVKY

Díl koncovky je koncovým dílem čerpadla (obr. 4.6), ve kterém díky systému přítoku vody do plunžrového čerpadla Hypelex firmy Flow a poháněním vody pomocí plunžrového pístu přes speciální vysokotlakou jednotku vzniká tlak vody až 3800 bar.

Tento díl speciální vysokotlaké jednotky je umístěn mezi vysokotlakým válcem (3) a koncovkou (1), kde přes jednoduchý systém 6 děr na ploše vstupní strany od plunžrového pístu a jednou dírou (velikost díry cca. 1,5 mm) na výstupu do komory koncovky (1) dosahuje systém čerpadla již zmíněného tlaku.

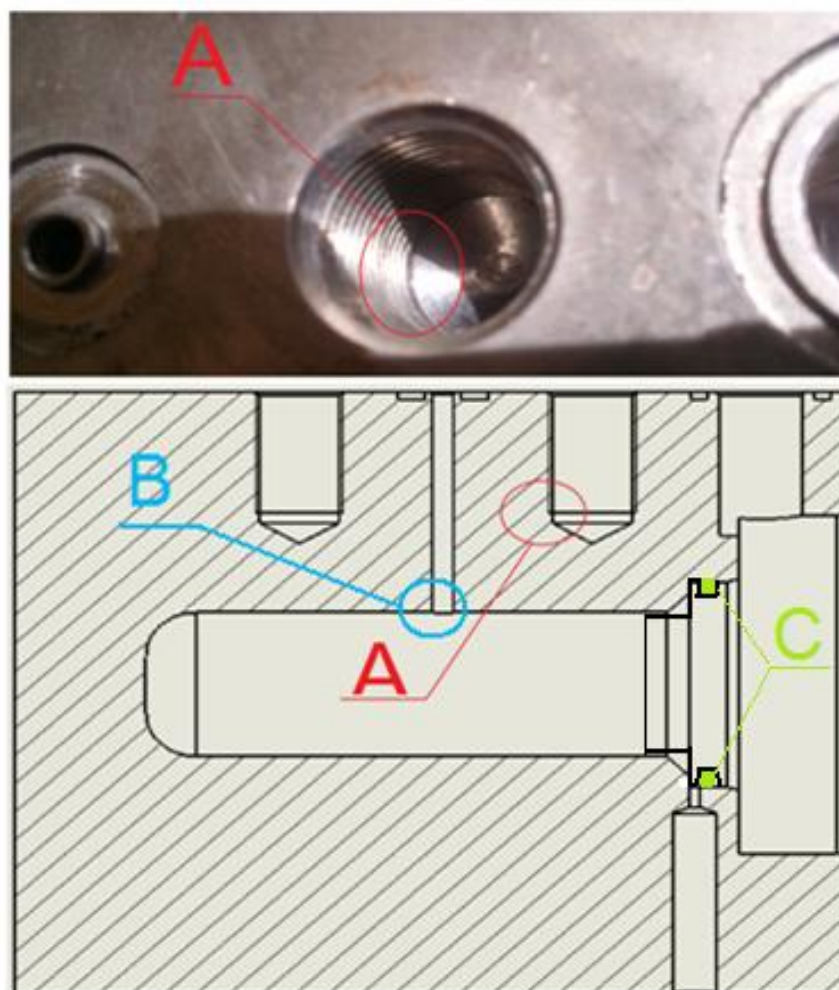
Díky vysokému tlaku vznikají značné vibrace, jež mají veliký vliv na technologické spojení jednotlivých dílů čerpadla, především na závity.



Obr. 4.6 Schéma koncových vysokotlakých částí plunžrového čerpadla Hypelex (vpravo nahoře sestava vytvořená v programu Solidworks).

Celý systém řezání vodním paprskem je závislý na dokonalé těsnosti všech částí stroje tak, aby nedocházelo k poruchám tlakových ztrát v rozvodné vysokotlaké síti potrubí a hadic. Jestliže dojde k snížení tlaku vysokotlaké kapaliny v rozvodné síti, pak se viditelně zhorší kvalita řezu obrobku. Jednotlivé díly čerpadla jsou řešeny tak, aby vzniklý přetlak byl vyrovnáván pomocí odtokových komor. Avšak někdy je přetlak natolik veliký, že jednotlivé díly nevydrží tento tlakový nápor a dochází k trvalému poškození. Vysokotlaká těsnění jsou nejvíce opotřebované části celého systému vodního paprsku, jelikož jsou vyrobená z měkčích materiálů a při vyšších tlacích se postupně rozpadají. Jejich životnost je v řádu maximálně stovek hodin. Jsou umístěna v systému tak, aby se při jejich rozpadu dalo jednoznačně určit místo úniku tlaku. U dílu koncovky je těsnění (C) umístěno mezi vysokotlakou jednotkou a tlakovou komorou koncovky (obr. 4.7).

Avšak v dílu koncovky (1) dochází k jinému problému, a to konkrétně k namáhání na vnitřní stěny tlakové komory působením vysokého tlaku a následně k vibracím celého čerpadla. To má za následek vytváření trhlin (obr. 4.7) v místě díry s vnitřním závitem M12x1,25 (A).

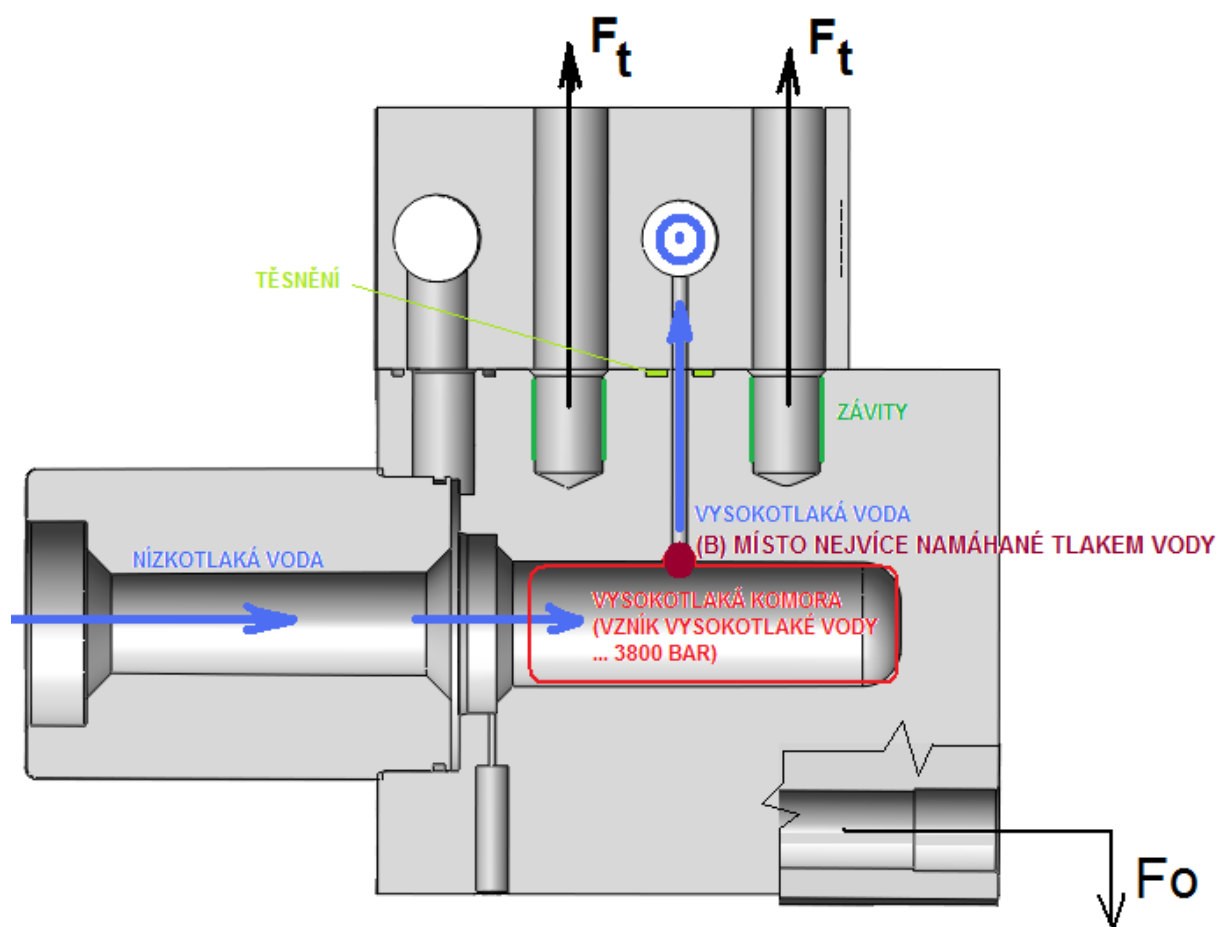


Obr. 4.7 Místo vzniku trhlin v závitové díře M12x1,25 v dílu koncovky.

Možné příčiny vzniku trhliny:

- působení vysokých tlaků na vnitřní stěny čerpadla => vznik vibrací
- špatný technologický postup tepelného zpracování materiálu
- špatný postup technologického zpracování dílu koncovky (tzn. soustružení, frézování, vrtání, tvorba závitů aj.)

4.4 Namáhání koncových vysokotlakých částí



Obr. 4.7a Síly působící na sestavu.

Síla F_o je tíhová síla, která působí na šrouby celé sestavy spojené s komorou klikové hřídel. Síla vyvolává ohyb šroubu. Síla F_t je tahová síla vyvolaná vysokotlakou vodou působící na komoru rozdělovače (2). Způsobuje tažení šroubu a taky tlak vyvolaný v závitě M12x1,25. Pokud by tato síla překročila jistou mez, mohlo by docházet k působení vysokotlaké vody na spodní část rozdělovače (2) u těsnění. Největší namáhání je však vyvoláno tlakem vody ve vysokotlaké komoře a to způsobuje vibrace.

4.5 Simulace namáhání dílu koncovky

Simulace namáhání je nedílnou součástí zjišťování příčin tvorby vad ve struktuře materiálu každých obráběných dílů. Podává jasný důkaz toho, co se bude dít s materiálem, pokud jej budeme zatěžovat silou či tlakem.

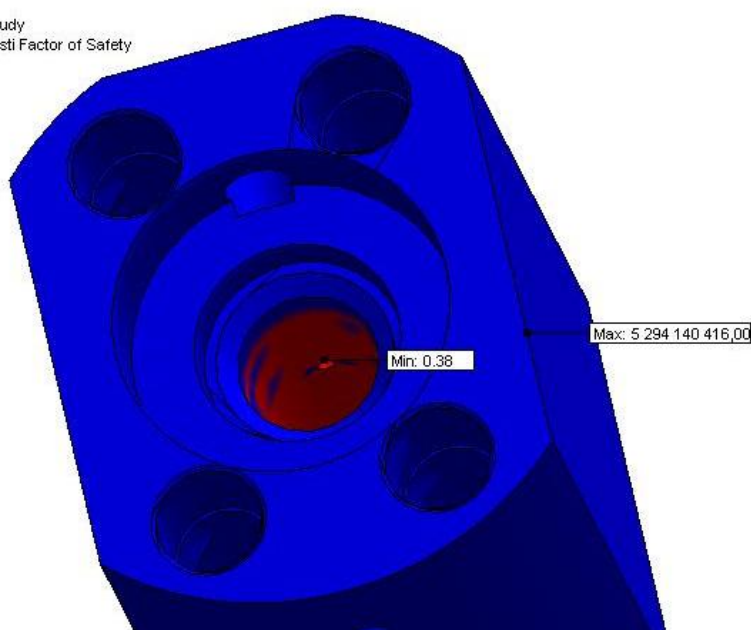
Simulace namáhání dílu koncovky byla provedena pomocí programu Solidworks, analýzou SimulationXpress. Tento program podporuje jen analýzu pevných dílů o jednom těle, což u dílu koncovky bylo dostačující. Přesnost výsledků závisí na uchycení, zatížení a vlastnostech materiálu a proto byly tyto parametry nastaveny tak, aby odpovídali co možná nejpřesněji.

- materiál dílu koncovky (tzn. korozivzdorná ocel X5CrNiCuNb16-4), dostupný s parametry v knihovně materiálů,
- maximální tlak působící na vnitřní stěny $p_{\max} = 3800$ bar,
- uchycení provedeno dle způsobu namáhání.

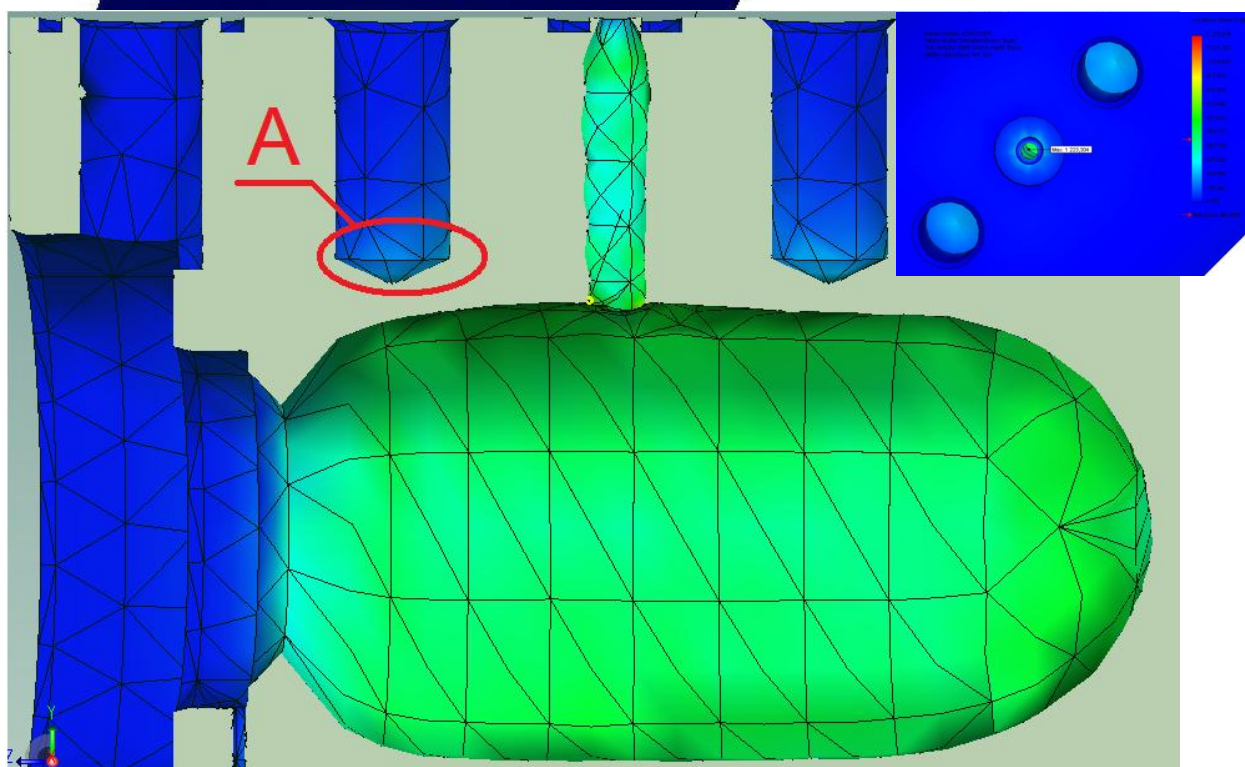
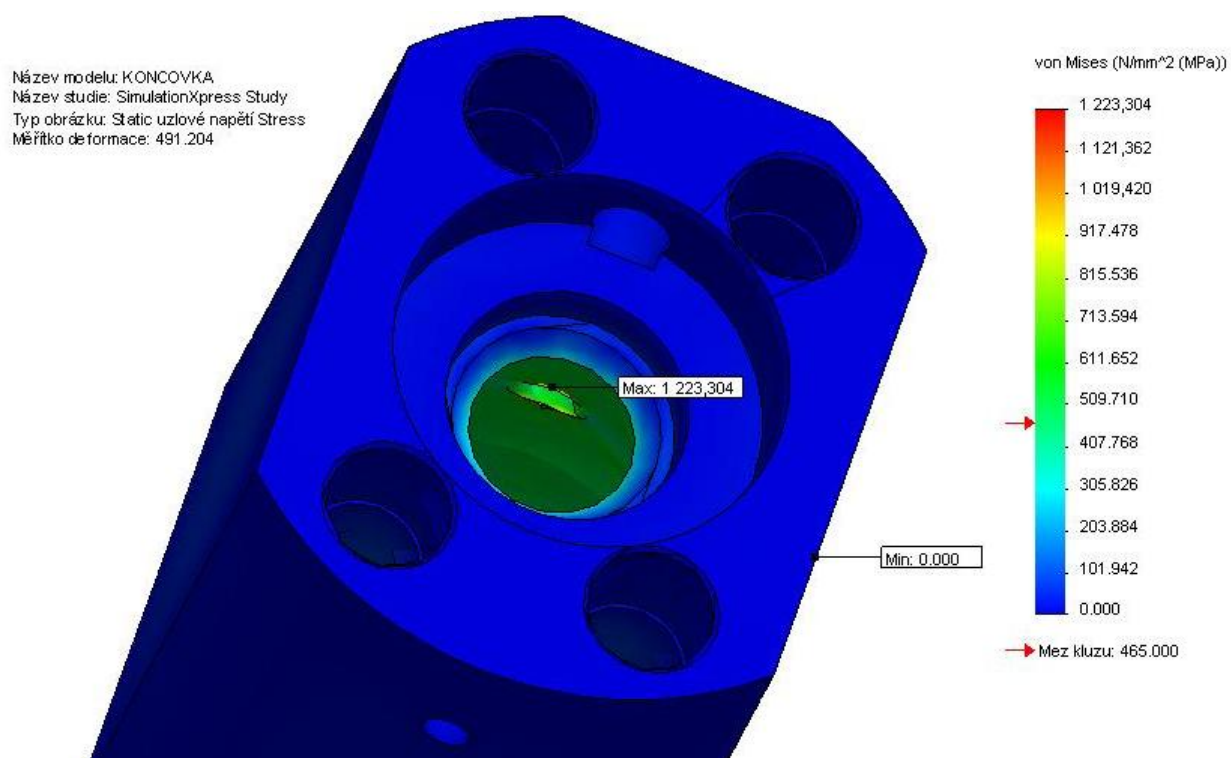
Na základě těchto parametrů byly vytvořeny dvě simulace, jež porovnávají jednotlivé stavy při stejných podmínkách, avšak první simulace byla provedena s původním vnitřním závitem M12x1,25 a hloubkou závitové díry 22 mm a druhá simulace byla provedena s vnitřním závitem M14x1,5 s hloubkou závitové díry 18 mm.

Simulace namáhání dílu koncovky s vnitřním závitem M12x1,25

Název modelu: KONCOVKA
Název studie: SimulationXpress Study
Typ obrázku: Koefficient bezpečnosti Factor of Safety
Kritérium: von Mises napětí
Červená < FOS = 1 < Modrá

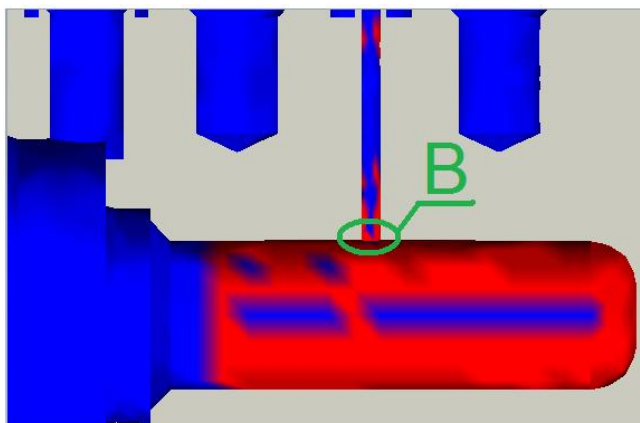


Obr. 4.8 Minimální koeficient bezpečnosti spočten na hodnotu $0,38 < 1$, v místě (B).

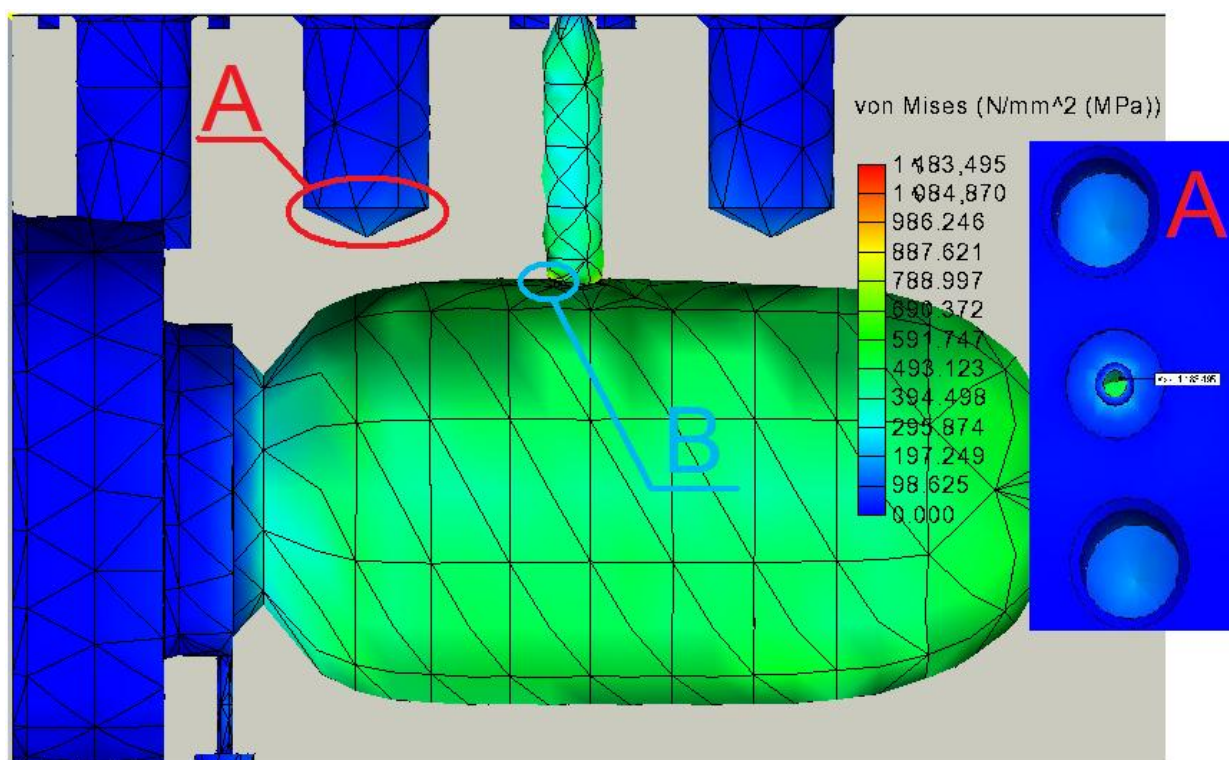


Obr. 4.9 Maximální hodnota uzlového napětí byla spočtena na základě kritéria maximálních napětí von Mises na 1223,304MPa v místě (B), ve spodní části lze spatřit pásmo ovlivněné napětím na dně díry závitu (A).

Simulace namáhání dílu koncovky s vnitřním závitem M14x1,5



Obr. 4.10 Minimální koeficient bezpečnosti spočten na hodnotu $0,39 < 1$, v místě (B).



Obr. 4.11 Maximální hodnota uzlového napětí byla spočtena na základě kritéria maximálních napětí von Mises na 1085,495MPa v místě (B), ve spodní části lze spatřit pásmo ovlivněné napětím na dně díry závitu (A).

Pokud porovnáme napětí ve spodní části díry závitu na obr. 5.6 s obr. 5.7, můžeme jednoznačně říci, že napětí působící v oblasti (A) se snížilo výrazným způsobem o několik desítek MPa. Touto simulací lze vyvodit závěr, že zvýšením tloušťky stěny mezi tlakovou komorou a dírou závitu bude mít podstatný vliv na životnost díry závitu, samotný závit a v poslední řadě i na celý díl koncovky.

4.6 Návrhy řešení

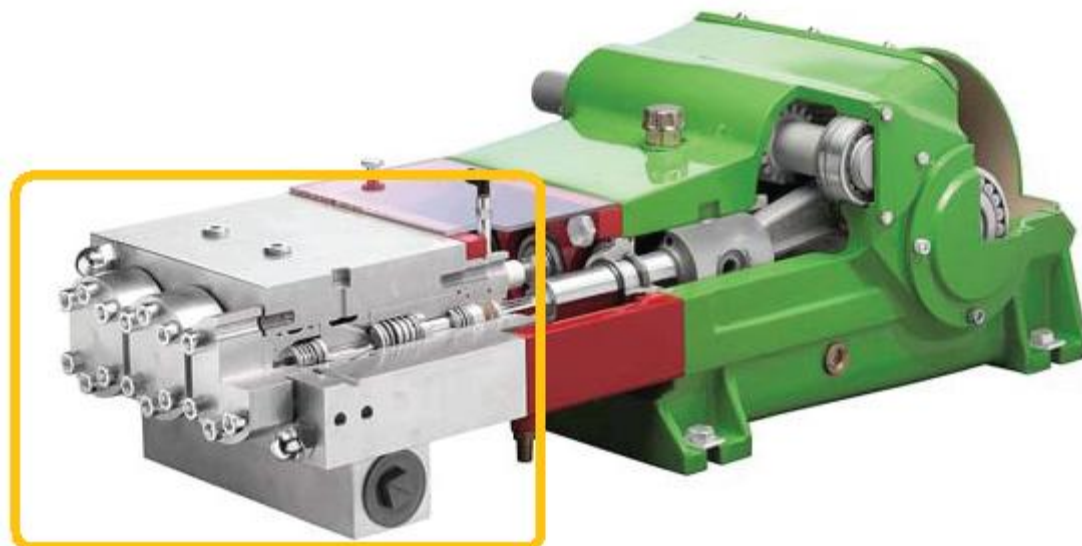
Jednotlivé návrhy řešení vychází z technologického a konstrukčního provedení daného dílu.

- **změna závitu z M12x1,25 na M14x1,5**

Jak již bylo ověřeno simulací, toto technologické provedení umožňuje snížení napětí v místě (A) a tím i zvýšení životnosti daného dílu. Avšak touto technologickou změnou je nutné zvětšit průchozí díry u dílu rozdělovače (2) => nutná změna šroubového spojení.

- **vytvoření „zpevňujícího“ dílu (obr. 4.12)**

Tento díl by měl za cíl zpevnit všechny 3 díly koncovky tak, že by minimalizoval vibrace, jež vznikají při práci vysokotlakého čerpadla.



Obr. 4.12 Uložení tří dílů koncovek ve „zpevňujícím“ dílu. [50]

- **změna materiálu dílu koncovky**

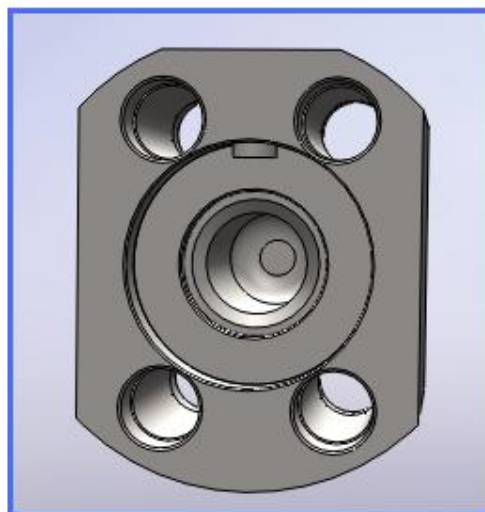
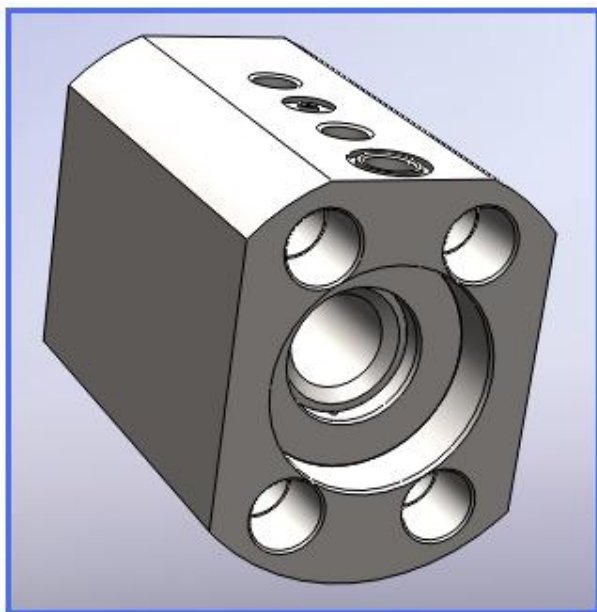
Tato změna obnáší velké materiálové znalosti (např. způsob tepelného zpracování), následně změnu výroby dílu dle materiálového listu. Tato varianta zahrnuje nutnosti provedení simulací napětí a provedení následných zkoušek. Jedná se o drahou a příliš časově náročnou variantu.

Uvažované další materiály na výrobu dílu:

- korozivzdorná vytvrditelná ocel **X7CrNiAl17-7** (DIN 1.4568),
- korozivzdorná vytvrditelná ocel **X5CrNiMoCuNb14-5** (DIN 1.4594).

5 ŘEŠENÍ TECHNOLOGICKÉHO POSTUPU

Díl koncovky je součástí vysokotlakého plunžrového čerpadla, jež se používá v systému technologie řezání vodním paprskem. Koncovka je vyráběna tak, aby odolala tlakům vysokotlaké vody a rozváděla ji dále do systému potrubí.



Obr. 5.1 Model a foto koncovky.

5.1 Rozbor polotovaru

Jako polotovar je určen tyčový materiál korozivzdorné oceli X5CrNiCuNb16-4 o $\varnothing 100$ mm a délce 3000 mm. Největší průměr na součástce je 100mm. Tyče jsou vyráběny pomocí válcování za tepla.

5.2 Postup výroby

Použitý tyčový materiál je dodáván v délce 3000 mm a je nutné jej v první řadě nařezat na patřičnou délku 352 mm, jež se bude dále dělit pro výrobu 3 koncovek. Pro tento účel lze použít strojní CNC pilu Transverse 610.440 GANC značky Bomar, nebo lze řezat díl přímo ve firmě Vy-TECH vodním paprskem na stroji MACH 3.

Celou součást lze vyrobit na obráběcím centru MCV 1000 SPEED výrobce KOVOSVIT MAS, a.s. Dokončovací práce odjehlováním bude provedena na vodním centru SUGINO.

Kontrola rozměrů probíhá přímo na pracovišti (vizuální kontrola, kontrola pomocí sond, přezkoumání základních parametrů pomocí ručních měřidel).

6 VÝROBA DÍLU KONCOVKY

6.1 Dělení materiálu

Na dělení materiálu je využita CNC pásová pila BOMAR Transverse 610.440 AUTOMAT.



Obr. 6.1 CNC pásová pila firmy BOMAR. [51]

Plně automatizovaná pásová pila s CNC řízením. Posuv materiálu do řezu, upínání materiálu a posuv ramene pilového pásu do řezu a zpět jsou ovládány hydraulicky. Zadání počtu řezaných kusů a spouštění se provádí na displeji. Délka posuvu v jednom kroku je 600 mm a snímá se lineárním měřícím systémem s vysokým rozlišením (přesné délky řezaných kusů). Podávací svěrák má plovoucí uložení a je vedený na tvrzených vodicích tyčích s lineárními valivými ložisky. Průběžná válečková dráha zajišťuje jednoduché zavedení a bezpečné uložení i u krátkých kusů. V automatickém cyklu jsou možné úhlové řezy do 45°, v poloautomatickém režimu až 60°. Stroj má rozsáhlé základní vybavení včetně plynule regulovatelného, výkonného pohonu pilového pásu, přesného tvrdokovového vedení pilového pásu, automatické regulace přítlaku do řezu, digitálního ukazatele úhlu řezu, digitálního ukazatele rychlosti pásu, poháněného kartáče na odstraňování pilin, výkvného ovládacího pultu, hydraulických plnozdvihových svěráků, elektronické kontroly napnutí a přetržení pilového pásu a další. Ke stroji je k dispozici široká nabídka přídatného vybavení jako válečkové dopravníky a dorazy, systém minimálního mazání. Rychlost pilové pásu je v rozmezí 20 až 90 m.min⁻¹.

Jako alternativní řešení dělení lze zvolit stroj MACH 3 na řezání materiálu vodním abrazivním paprskem ve firmě Vy-TECH.



Obr. 6.2 Řezání vodním paprskem na CNC stroji MACH3. [6]

Pokud porovnáme obě tyto metody, dojdeme k závěru, že metoda dělení vodním paprskem je daleko efektivnější. Kvalita řezu je patrná na pohled, jelikož hodnota drsnosti řezu je několikanásobně vyšší u řezání pilovým pásem. Jestliže dále budeme srovnávat ztrátu materiálu prořezem, tak opět na tom bude líp technologie vodního paprsku, jež řeže paprskem užším než je šířka pilového pásu. Navíc při řezání pilovým pásem vzniká tření, což má za následek tepelné ovlivnění materiálu => nutnost chlazení řezu. Nakonec náklady na řezání budou daleko nižší při řezání vodním paprskem, jelikož se operace bude provádět v rámci výroby ve firmě Vy-TECH.

6.2 Frézování

Pro frézovací operace bylo vybráno CNC obráběcí centrum MCV 1000 SPEED (obr. 6.3).

Celá součást se bude obrábět na několik upnutí a budou využity poháněné nástroje, díky kterým lze vyrobit součást jen na tomto obráběcím centru.



Obr. 6.3 Obráběcí centrum MCV 1000 SPEED výrobce KOVOSVIT MAS, a.s. [52]

6.3 Odjehlování

Operace odjehlování je konečnou operací výroby dílu koncovky. Bude prováděna na stroji, jenž je kombinací CNC obráběcího centra se systémem vysokotlakého vodního paprsku pracujícího s tlakem 35 a 50MPa (obr. 6.4). Vysokotlaká voda je přiváděna do revolverové hlavy se třemi pozicemi. Každá z nich může být osazena jinou vysokotlakou vodní tryskou nebo kartáčem. Tvar trysek dává molekulám vody dostatečnou kinetickou energii k odstranění třísek všech typů materiálů.

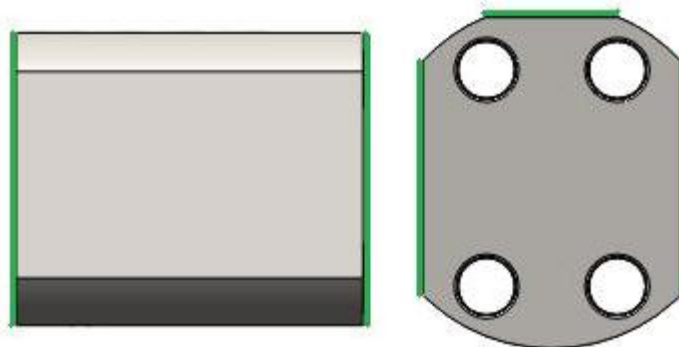


Obr. 6.4 Odjehlovací vodní centrum firmy SUGINO. [49]

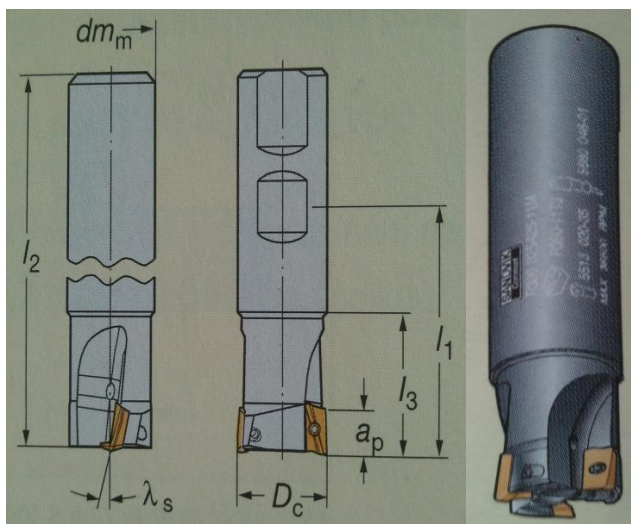
7 VOLBA NÁSTROJŮ PRO JEDNOTLIVÉ OPERACE VÝROBY

(pozn. Obrázky fréz a vrtáku, které nejsou číslovány, jsou poskytnuty z [56]).

7.1 Frézování ploch obvodu – čelní frézování

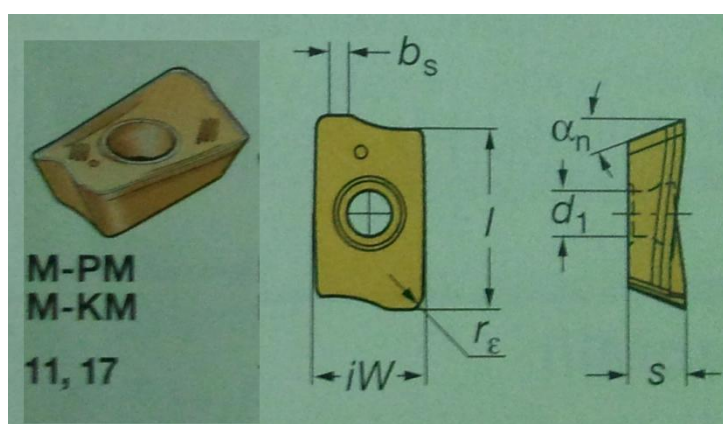


Stopková válcová čelní fréza CoroMill 390 (velikost kužele na stroji ISO 40/50)



Dc (mm)	ap (mm)	dmm (mm)	l2 (mm)	l3 (mm)	λ_s (°)
80	max. 15,7	32	130	40	8.16

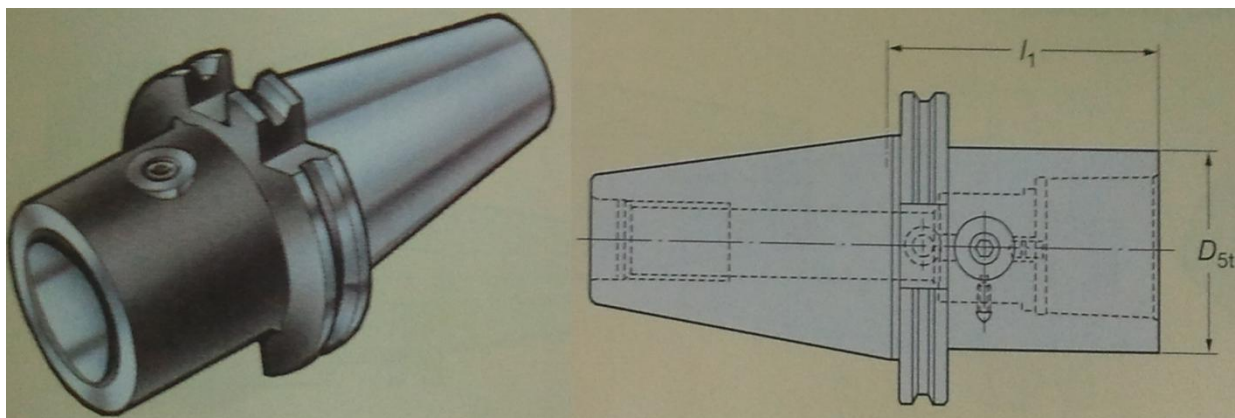
VBD pro Coromill 390



VBD pro Coromill 390	M-PM	střední 17	s (mm)	bs (mm)	r _e (mm)	α_n (°)
l (mm)	iW (mm)	d1 (mm)				
11	9,6	1,4	4,76	1,5	0,4	19

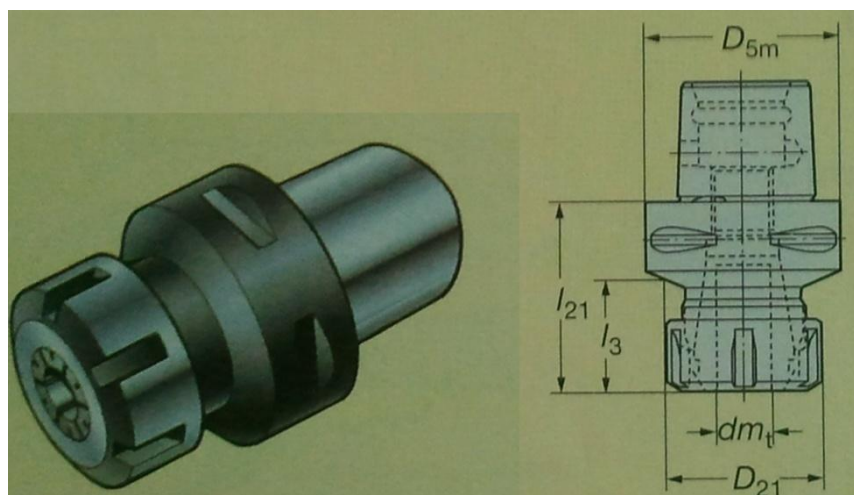
System upínání

Čelní upínání norma ISO 7388/1 (DIN 6987- A), základní držák Coromant Capto



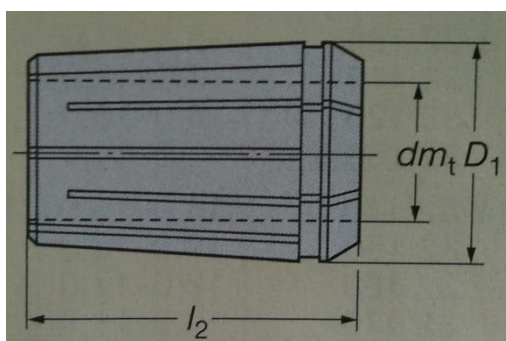
kužel ISO 50	velikost spojky C8	D5t=80mm	l1=105mm
--------------	--------------------	----------	----------

Nástavec pro kleštinové sklíčidlo (DIN 6499)



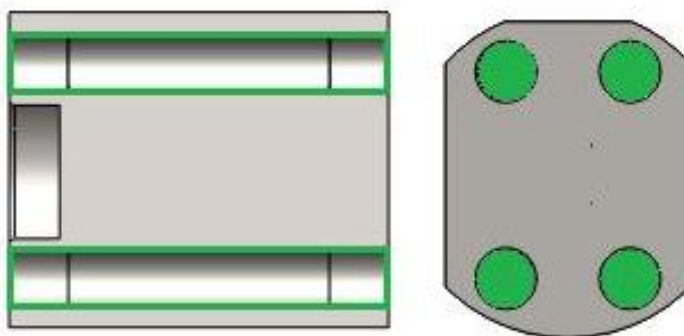
D21=78mm	velikost spojky C8	D5m=80mm	dmt=6-34 mm	l3= 50 mm	l21=80
----------	--------------------	----------	-------------	-----------	--------

Kleština (DIN 6499 - B)

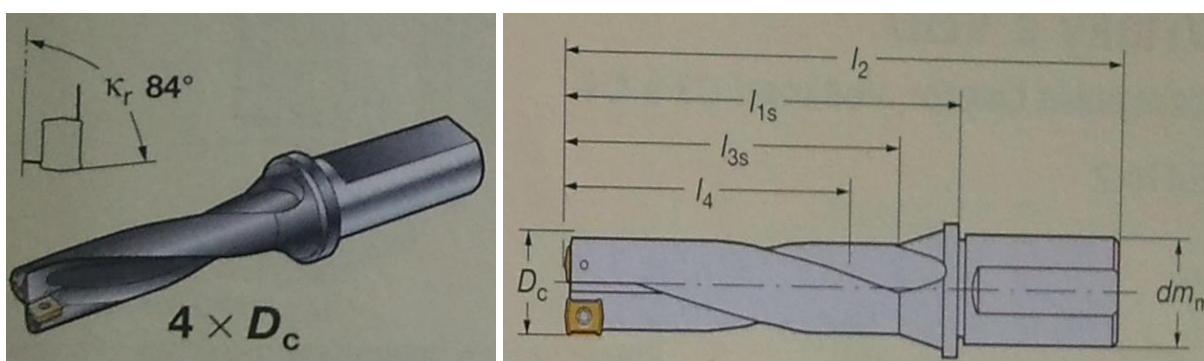


dmt=32-30 mm	l2= 60 mm	D1=52mm
--------------	-----------	---------

7.2 Vrtání průchozích děr pro šroubové spojení

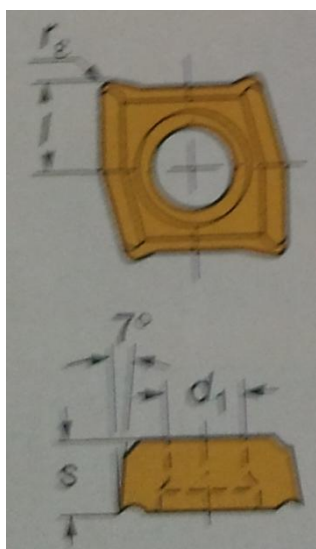


Vrtáky s VBD Coromant U (válcová stopka s ploškou ISO 9766)



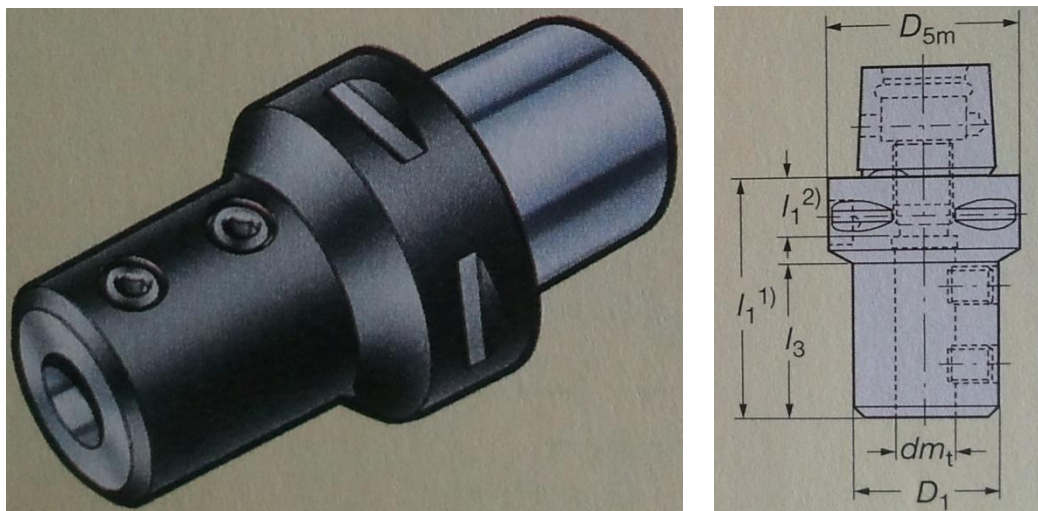
Dc (mm)	max Dc (mm)	dmm (mm)	l2 (mm)	l3s (mm)	l4 (mm)	l1s (mm)
16,5	17,7	20	134	69	66	84

VBD pro vrtáky (LCMX 02 02 04 P-53)



l=2,68mm	d1=2,5mm	s=2,38mm	rε=0,4mm
----------	----------	----------	----------

Upínání vrtáku – nástavec pro vrtáky Coromant U (stopka ISO 9766)



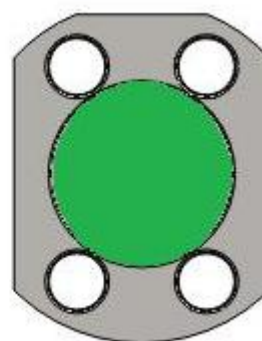
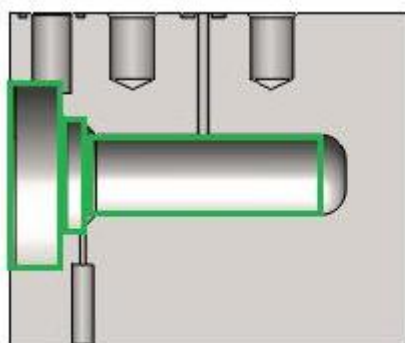
velikost spojky C8

D5m=80mm

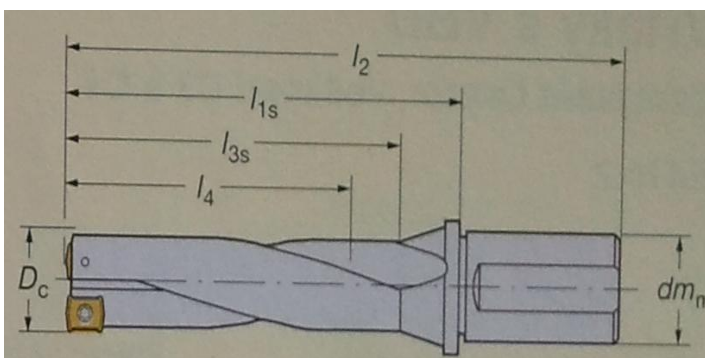
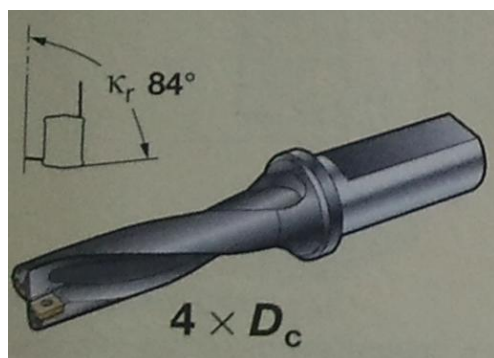
dmt=20mm

l3= 43,8 mm

7.3 Frézování vnitřní díry

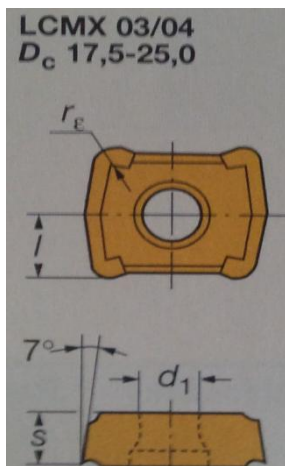


Vrtáky s VBD Coromant U (válcová stopka s ploškou ISO 9766)



Dc (mm)	max Dc (mm)	dmm (mm)	l2 (mm)	l3s (mm)	l4 (mm)	l1s (mm)
23	25	25	170	95	92	114

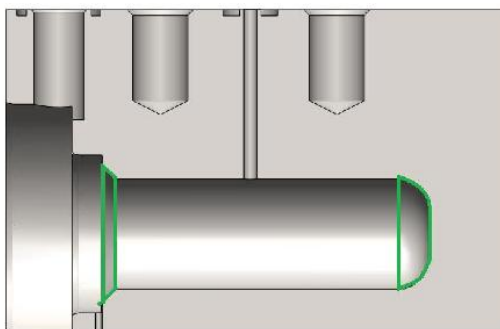
VBD pro vrtáky (LCMX 04 03 08 T-53)



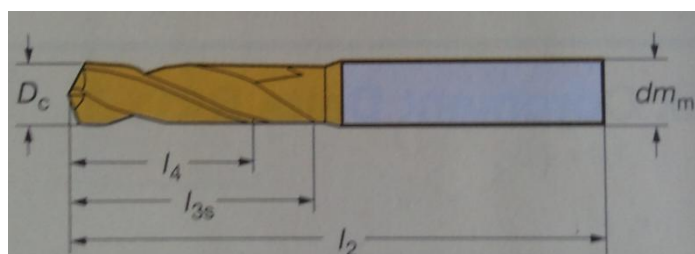
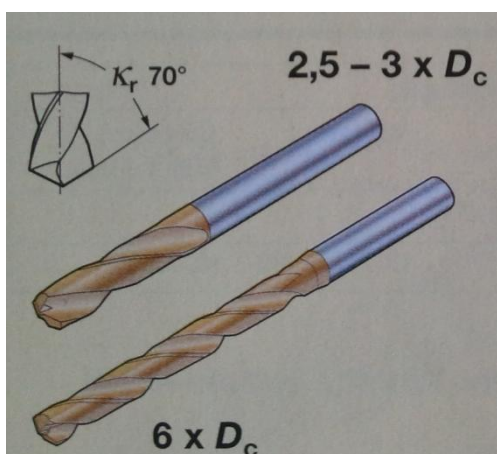
$l=4,0\text{mm}$	$d_1=2,8\text{mm}$	$s=3,18\text{mm}$	$r_e=0,8\text{mm}$
------------------	--------------------	-------------------	--------------------

Upínání vrtáku – nástavec pro vrtáky Coromant U (stopka ISO 9766), viz 7.2.

7.4 Frézování (vrtání) ve spodní části díry



Vrtáky HSS Coromant Delta-S (dlouhé provedení 6xDc)

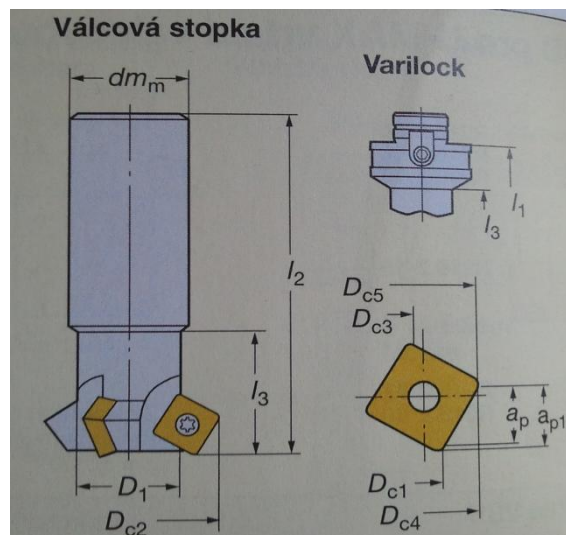
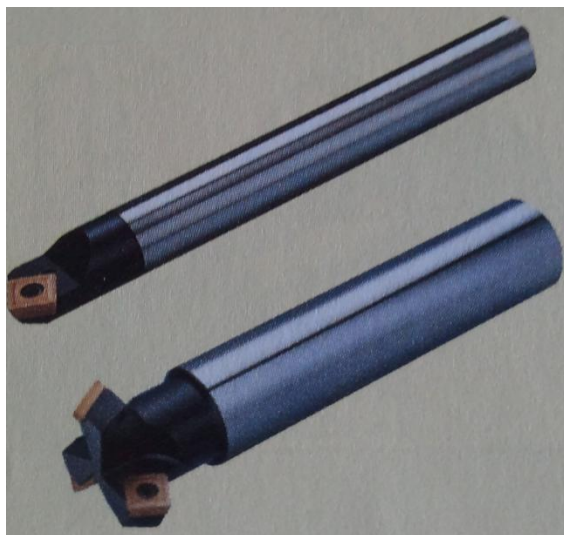


Dc (mm)	dmm (mm)	l2 (mm)	l3s (mm)	l4 (mm)
12	12	158	101	80

Upnutí vrtáku - nástavec pro kleštinové sklíčidlo (DIN 6499), viz 7.1 (užití odpovídající kleštiny).

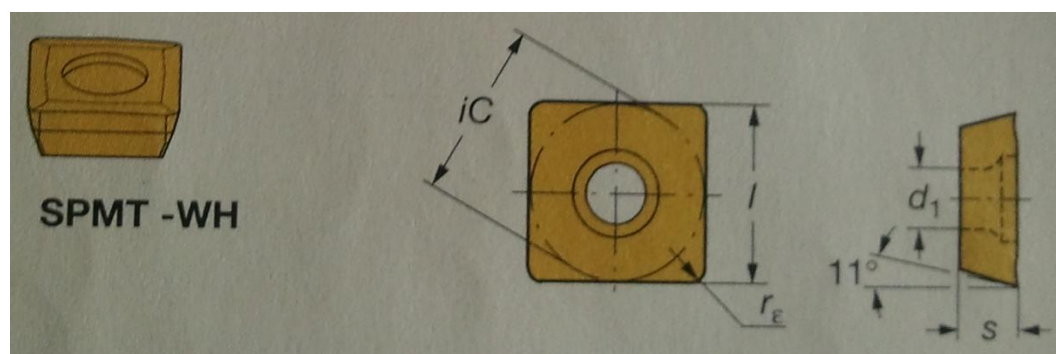
Frézování zkosení vnitřní hrany 3x45°

Válcová čelní fréza pro srážení hran



Dc1(mm)	Dc2(mm)	dmm (mm)	D1 (mm)	Dc4 (mm)	l2(mm)	l3(mm)	κr
11,7	27,1	20	19,4	26,7	175	37,8	45°

VBD pro válcové frézy ke srážení hran (SPMT 12 04 08-WH)



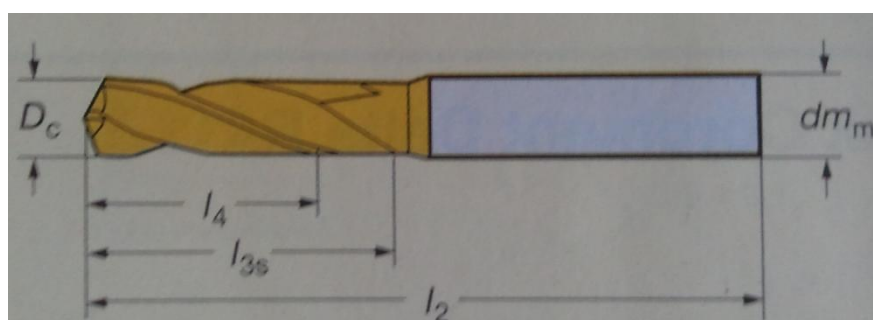
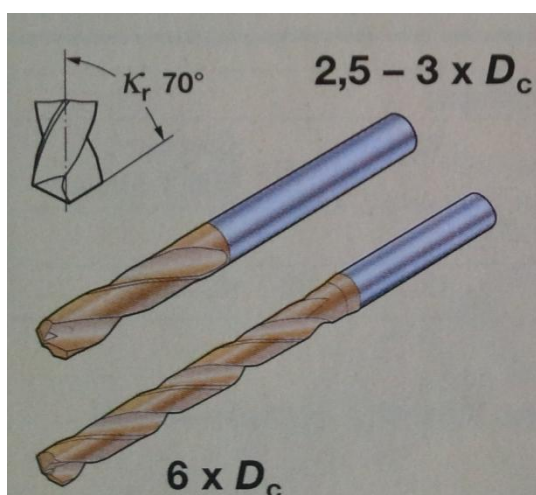
iC=l (mm)	d1 (mm)	s (mm)	rε (mm)
12,7	4,4	4,76	0,8

Upnutí vrtáku - nástavec pro kleštinové sklíčidlo (DIN 6499), viz 7.1 (užití odpovídající kleštiny).

7.5 Vrtání odtokové díry $\varnothing 6$ mm na spodní straně



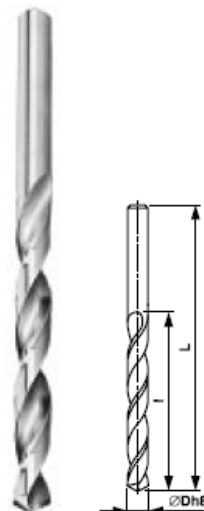
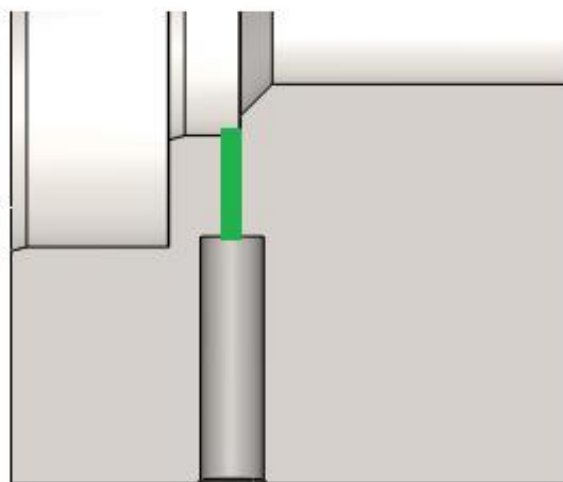
Vrtáky HSS Coromant Delta-S (dlouhé provedení 6xDc)



Dc (mm)	dmm (mm)	l2 (mm)	l3s (mm)	l4 (mm)
6	6	101	57	47

Upnutí vrtáku - nástavec pro kleštinové sklíčidlo (DIN 6499), viz 7.1 (užití odpovídající kleštiny).

7.6 Vrtání přetlakové díry $\varnothing 1,6$ mm



Obr. 7.1 Vrták NAREX [53].

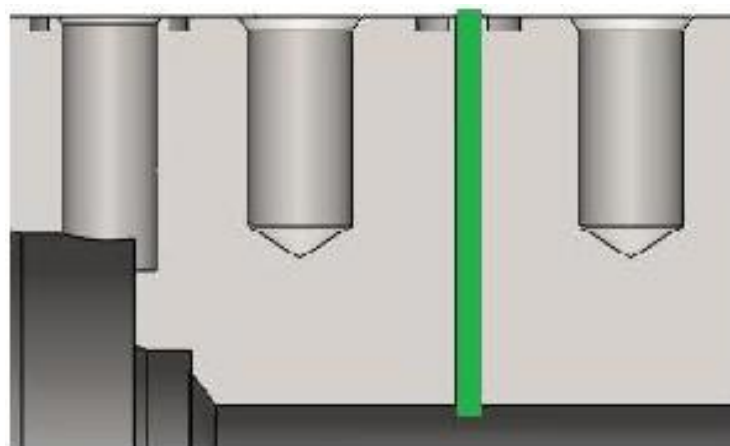
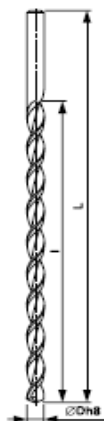
$\varnothing Dh8 = 1,6\text{mm}$	$l = 30\text{ mm}$	$L = 63\text{ mm}$
----------------------------------	--------------------	--------------------

Vrták s válcovou stopkou HSSCo8 (DIN 338)

Použití: speciální vrták použitelný pro vrtání titanových slitin a austenitických ocelí odolných vůči korozi, vyznačuje se vysokou výkonem a tvrdostí

7.7 Vrtání vysokotlaké díry $\varnothing 3$ mm

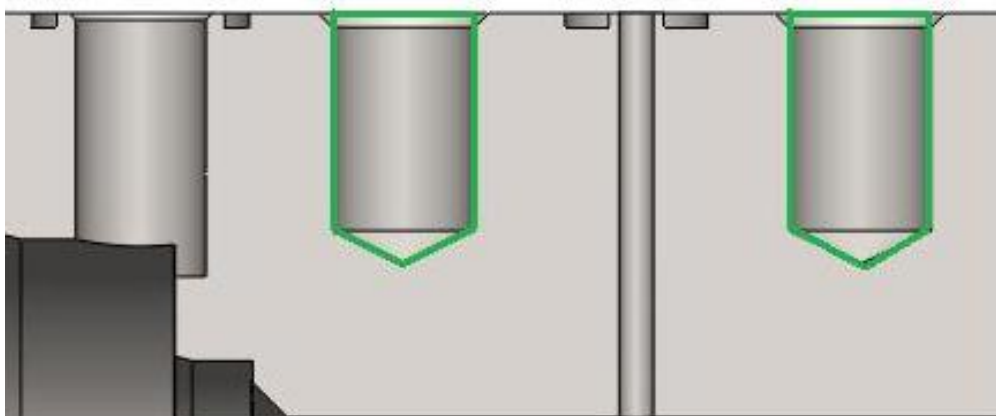
Vrták s válcovou stopkou z rychlořezné oceli (DIN 340 RN), vyznačuje se dobrou tepelnou odolností, vhodný pro vrtání korozivzdorných ocelí.



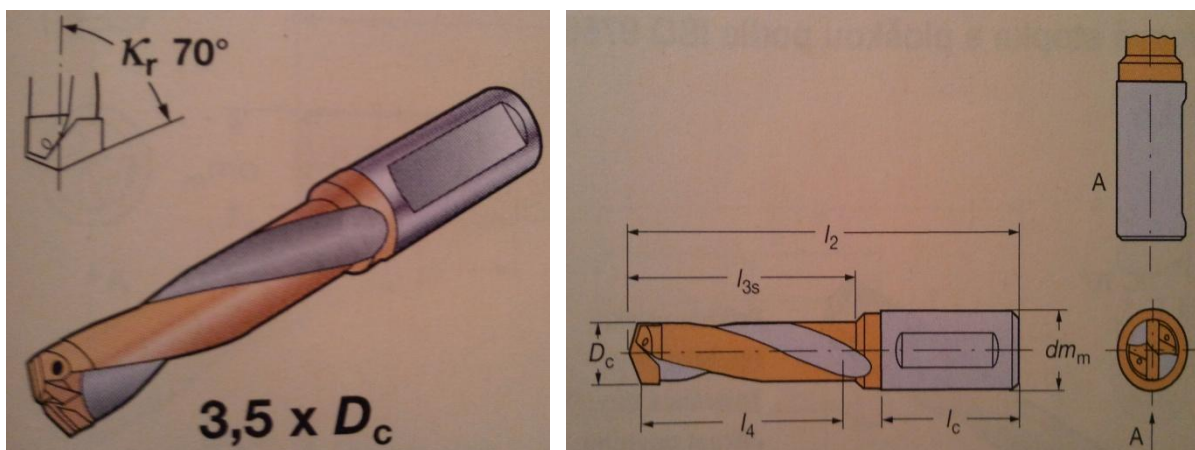
$\varnothing Dh8 = 3\text{mm}$	$l = 66\text{ mm}$	$L = 100\text{ mm}$
--------------------------------	--------------------	---------------------

Obr. 7.2 Vrták Narex [53].

7.8 Vrtání děr se závitem m14x1,5



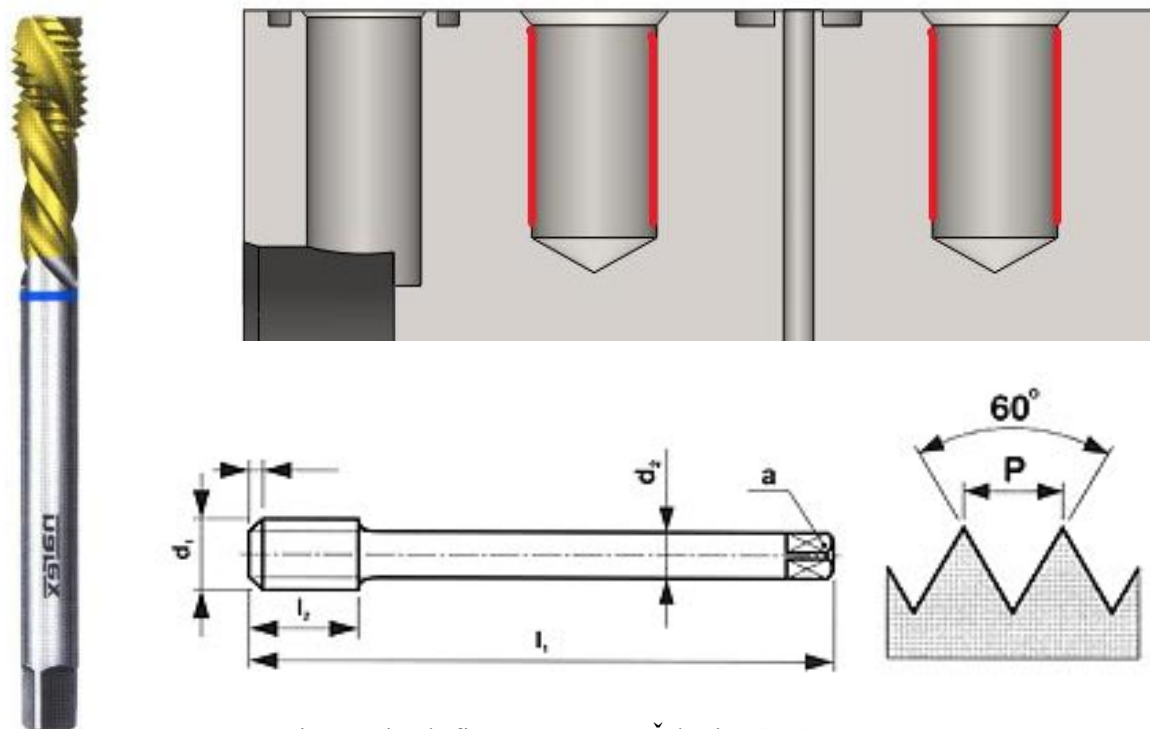
Vrtáky Coromant Delta – vrták s pájenou BD SK (válcová stopka s ploškou dle ISO 9766)



Dc (mm)	dmm (mm)	l2 (mm)	l3s (mm)	l4 (mm)	lc (mm)
12,5	16	111	52	44	48

Upínání vrtáku – nástavec pro vrtáky Coromant U (stopka ISO 9766), viz 7.2.

7.9 Vytvoření závitů M14x1,5



Obr. 7.3 Strojní závitník firmy NAREX Ždánice [54].

Strojní závitník s povlakem nitridu titanu DIN374-4260-M14x1,5

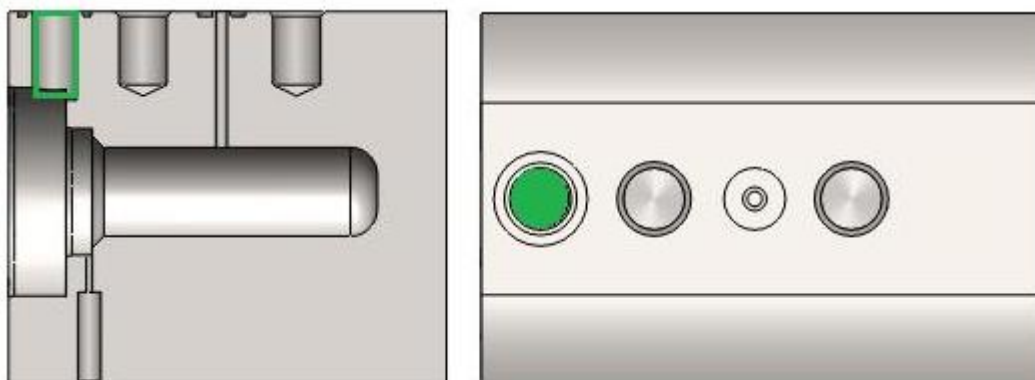
Použití: korozivzdorné a žáruvzdorné oceli, konstrukční, středně legované nástrojové oceli, hliník legovaný.

Materiál: HSSE - vysoce výkonná rychlořezná ocel legovaná 5% Co TiN.

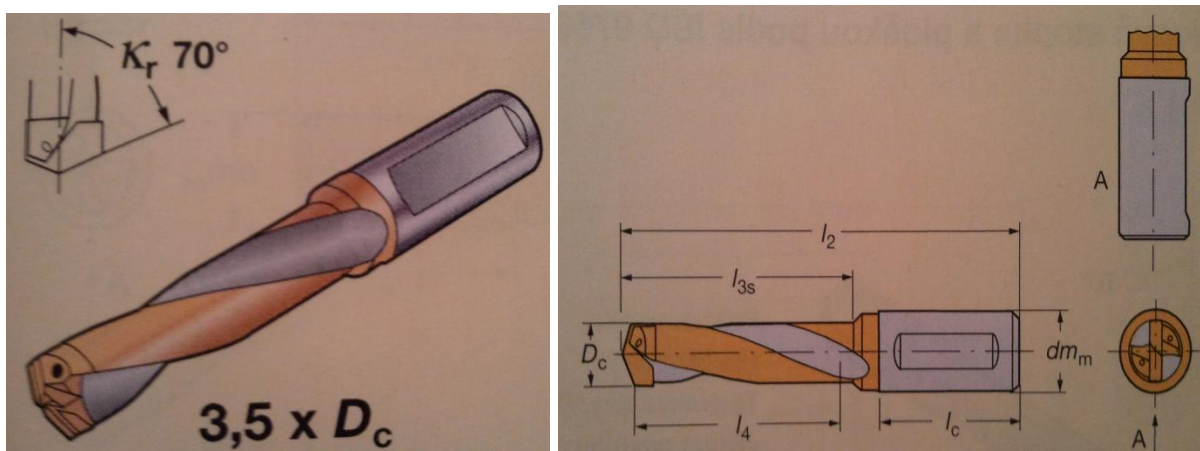
d1=M14	P=1,5mm	l1=100mm	l2=16mm	d2=11mm	a=9mm
--------	---------	----------	---------	---------	-------

Upnutí vrtáku - nástavec pro kleštinové sklíčidlo (DIN 6499), viz 7.1 (užití odpovídající kleštiny).

7.10 Vrtání díry o $\varnothing 11,4$ mm



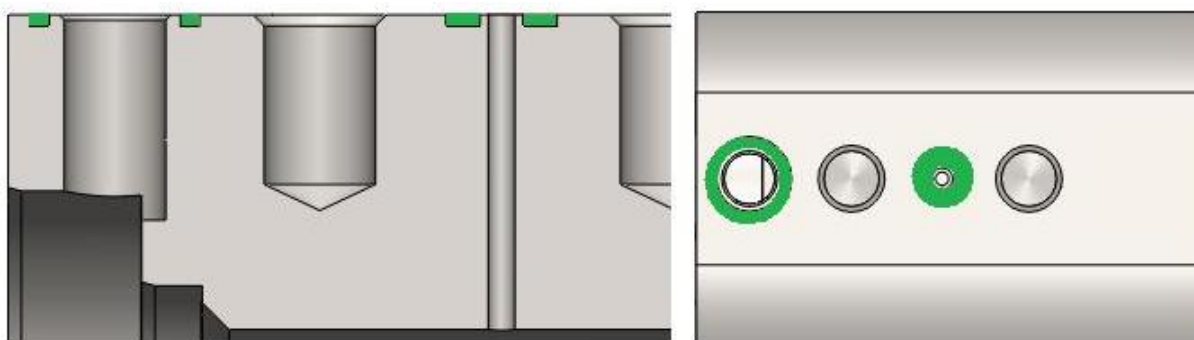
Vrtáky Coromant Delta – vrták s pájenou BD SK (válcová stopka s ploškou dle ISO 9766)



D _c (mm)	d _m (mm)	l ₂ (mm)	l _{3s} (mm)	l ₄ (mm)	l _c (mm)
11,4	16	105	46	40	48

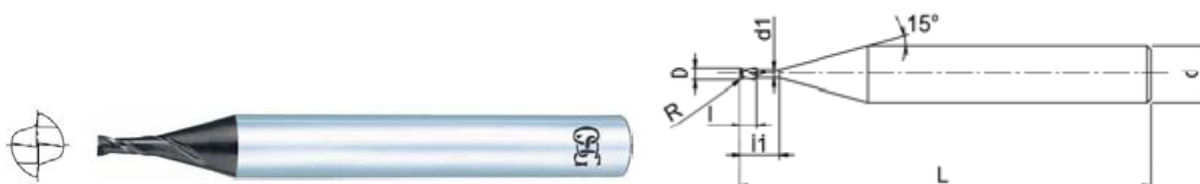
Upínání vrtáku – nástavec pro vrtáky Coromant U (stopka ISO 9766), viz 7.2.

7.11 Frézování drážek pro těsnění



Povlakovaná fréza FX-CR-EDS-6 je určena pro vysokorychlostní obrábění na obráběcích centrech.

D (mm)	l ₁ (mm)	R (mm)	L (mm)	l (mm)	d ₁ (mm)	d (mm)
2	5	0,1	50	3	1,95	6



Obr. 7.4 Fréza firmy Clarkson [55].

Upnutí vrtáku - nástavec pro kleštinové sklíčidlo (DIN 6499), viz 7.1 (užití odpovídající kleštiny).

K sražení zkosení hran vnitřních děr se použijí kopírovací frézy či záhlubníky, jež budou odpovídat úhlu zkosení dle strojního výkresu.

7.12 Seřízení nástrojů a měření

Jelikož stroj disponuje šedesáti pozicemi, jež mohou být obsazeny jinými nástroji, je nutné překontrolovat jednotlivé pozice a pokud je většina obsazena, tak je nahradit nástroji nutnými k výrobě dílu koncovky. Stroj je vybaven mechanickou rukou podle provedení vřetena, jež nám umožňuje snadnou a rychlou výměnu daného nástroje. Nástroje se upínají do vřetena s kuželi ISO 40 nebo ISO 50, lze použít i držáky nástrojů ISO 7388/1 40; 50; a nástavce pro upínání nástrojů ISO 7388. Poloha dílu je odměřována lineárními pravítky.

Průběžné měření dílu při výrobě pomocí:

- Spínací 3D snímací sonda
- Nástrojová sonda

Stroj lze vybavit i sondou pro digitalizaci 3D tvarů ovšem jen pro software HEIDENHAIN TNC 426 M.

Měření dílu koncovky pro výrobu

Na měření běžných volných rozměrů bylo použito posuvné měřítko výrobce Mitutoyo série 500 dle normy DIN862. Toto měřítko je vhodné pro dílenské měření díky vysoké odolnosti vůči nárazům.



Obr. 7.1 Posuvné měřítko [15].

Závit M12 a veškeré vnitřní rozměry byli měřeny kalibry.



Obr. 7.2 Kalibr na tolerované otvory a závity [16].

8 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

V technické části zhodnocení je prioritou např. výběr správných břitových destiček a vrtáků, jež byly při návrhu použity, jejich vlastnosti při řezání tak specifického materiálu jako je vytvrditelná korozivzdorná ocel. Důležitým faktorem je výběr jednotlivých strojů použitých při výrobě, jejich výrobní možnosti a náklady na provoz a výrobu dílu. Víceosé stroje budou hrát velkou roli při výrobě i přes vyšší náklady na provoz.

Při určování řezných podmínek nástrojů pro daný typ oceli je využíváno doporučených hodnot výrobce. Pouze v případě nevhodné jakosti povrchu lze tyto hodnoty upravit. U některých druhů fréz a vrtáků je nutné snižovat řezné rychlosti a následně i posuv z důvodu nízkého rozsahu otáček u poháněných držáků. Je vhodné použít zrychlené držáky, jež zvyšují otáčky a kompenzují řezné hodnoty.

Při určování výrobní technologie jsou důležitým hlediskem celkové náklady výroby na možných použitých strojích, jelikož cena dílu koncovky je společností Flow pevně stanovena na 550 EURO (cca. 13915Kč), díl rozdělovače 1500 EURO (cca. 37950). Dle cen lze vyvodit i vysoké náklady na výrobu jednotlivých dílů čerpadla, jelikož jsou na ně kladeny vysoké nároky, co se týče životnosti a spolehlivosti.

Při návrhu výroby je nutné zaměřit se na místa, kde lze snižovat náklady na samotnou výrobu jednotlivých dílů. Např. v práci je zohledněno snížení nákladů na řezání tyčového materiálu použitím nekonvenční metody řezání abrazivním vodním paprskem ve firmě Vy-TECH na místo použití konvenční metody řezání pásovou pilou.

Jelikož se jedná o návrh výroby třech dílů koncovky, tedy kusové výroby, budou náklady na výrobu vyšší, než kdyby se jednalo o např. o malosériovou výrobu.

Cena tyčového materiálu korozivzdorné oceli (DIN 1.4542) Ø100 a délky 3000mm vyjde přibližně na 37000 Kč dle dodavatelů v ČR, ceny se mohou lišit. Z toho cena materiálu potřebného na jeden díl koncovky (Ø100 délky 114mm) je přibližně 1415 Kč.

Váha tyčového materiálu (Ø100 délky 114mm) před obráběním činí 7 kg. Čistá váha vyrobeného dílu koncovky je 4,6 kg.

Ztráty obráběním třískami q_0 [kg] lze vyjádřit z rozdílu hmotnosti polotovaru Q_p [kg] a hotového dílu Q_o [kg]:

$$q_0 = Q_p - Q_o \quad [\text{kg}] \quad (14)$$

Dosazením příslušných hodnot získáme ztráty obráběním 2,4 kg, což tvoří 34,3% z celkové hmotnosti polotovaru.

ZÁVĚR

Diplomová práce se ve své teoretické části zabývala rozborem technologie vodního paprsku. Získané teoretické znalosti byly následně využity v praktické části při popisu dění možných zatížení a vlivů působících na díl vysokotlakého čerpadla ve firmě Vy-TECH steel, s.r.o. v Lipůvce u Brna.

Na základě pozorování těchto vlivů byla provedena studie simulace tlakového zatížení. Toto zatížení bylo vyvoláno působením vysokotlaké vody na vnitřní stěny dílu koncovky a následně vznikaly vibrace působící na celé čerpadlo. Ze získaných dat byl řešen návrh výroby dílu koncovky čerpadla.

Důležitým aspektem práce bylo zjištění materiálu dílu koncovky na ústavu materiálového inženýrství VUT, kdy díky těmto výsledkům byla následně vybrána technologie návrhu výroby daného dílu.

Tento návrh výroby je zaměřen na oblast využití konvenčních technologií obrábění, na němž se největší měrou podílí technologie vrtání. Navržená technologie na obráběcím centru MCV 1000 SPEED byla shledána jako jedna z možných variant technologií výroby dílu koncovky čerpadla. Při určování řezných podmínek nástrojů byl kladen důraz na hodnoty doporučené výrobcem a jejich nároky na chlazení a mazání. Návrh výroby dílu koncovky je plně realizovatelný, požitím daných strojů a nástrojů.

Při posuzování ekonomického hlediska je výroba z části zaměřena na snižování nákladů použitím metody vodního paprsku.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Flow International Corporation [online].[vid. 2011-05-15]. *Flow International Corporation*. Dostupné z: <<http://www.flowwaterjet.com/>>.
2. HASHISH, Mohamed. In Memoriam - Dr. Norman Charles Franz. WJTA JetNews [online]. [vid. 2013-04-20]. Dostupný z: <http://www.wjta.org/images/wjta/JetNews/JetNews_Dec07.pdf>.
3. MAŇKOVÁ, I. *Progresívne technologie*. Viena Košice, 2000. 270s. ISBN 80-7099-430.3.
4. KRAJNÝ, Z. *Vodný lúč v praxi - WJM*. Bratislava: 1998. 384s. ISBN 80-8057-091-4.
5. MORÁVEK, R. *Nekonvenční metody obrábění*, 2.vyd. Plzeň: Západočeská universita, Fakulta technologie obrábění, 1999. 102s. ISBN 80-7082-518-9.
6. Flow International Corporation [online].[vid. 2012-04-10]. *Flow czech web pages*. Dostupné z: <<http://www.flowcorp.cz/>>.
7. MILLER, Richard. K. *Waterjet cutting: Technology and industrial applications*, USA: The Fairmont Press, 1991. 154 s. ISBN 0-88173-068-8.
8. Vodovody a kanalizace [online].[vid. 2012-03-20]. *Ukazatel kvality vody*. Dostupné z: <www.vodakhu.cz/tvrдостvody.html>.
9. JET EDGE [online].[vid. 2012-04-25]. *JET EDGE Waterjet systems*. Dostupné z: <<http://www.jetedge.com/>>.
10. Parameters and equipment [online].[vid. 2012-04-22]. *Pressure generation systems*. Dostupné z: <<http://lyle.smu.edu/rcam/research/waterjet/par3.html>>.
11. PTV, spol. s.r.o. [online].[vid. 2012-04-21]. *Abrazivo*. Dostupné z: <<http://www.ptv.cz/ptv/jnp/cz/produkty/abrazivo/index.html>>.
12. Řežem vodou [online].[vid. 2012-04-21]. *Řezání vodním paprskem Ostrava*. Dostupné z: <<http://www.rezeme-vodou.cz/>>.
13. MILCO Waterjet [online].[vid. 2012-04-21]. *Advantages to Waterjet Cutting*. Dostupné z: <<http://www.milcowaterjet.com/advantages.php>>.
14. CHPS s.r.o. [online].[vid. 2012-04-21]. Řezání vodním paprskem, laserem, zpracování kovů. Dostupné z: <<http://www.chps.cz/>>.
15. Vy-TECH steel s.r.o., Firemní materiály a podklady pro systém čerpadla
16. Gravírování [online].[vid. 2012-05-21]. *Gravírovací motivy*. Dostupné z: <http://sdchencan.en.alibaba.com/product/286450515-209344847/Waterjet_engraving_machine.html>, <http://www.alibaba.com/product-gs/281562475/marble_engraving_machine_with_waterjet_system.html>.
17. PTV, spol. s.r.o. [online].[vid. 2012-04-21]. *Těsnění*. Dostupné z: <http://www.ptv.cz/ptv/public/d0/36/9b/4e/4705_24683_Cenik___bez_cen.pdf>.
18. KOČMAN, Karel; PROKOP, Jaroslav. *Technologie obrábění*. 2. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.

19. HÍREŠ, Ondrej, Michal HATALA a Sergej Hloch. *Delenie kovových materiálov okružnou pilou, vodným prúdom a plazmovým oblúkom*, 1. vyd. Jiří Pustina: Ostrava - Poruba, 2007. 147 s. ISBN 978-80-8073-769-6.
20. Vy-TECH steel s.r.o. [online],[vid. 2012-05-20]. *Řezání vodním paprskem*. Dostupné z: <www.vytech.cz>.
21. ELNA servis s.r.o. [online],[vid. 2012-04-30]. *Řezání vodním paprskem*. Dostupné z: <<http://www.elnaservis.cz/voda.htm>>.
22. *Wikipedia-Water jet cutter* [online],[vid. 2012-03-20]. Dostupné z:<http://en.wikipedia.org/wiki/Water_jet_cutter>.
23. *Abrasive Waterjet Cutting – Application and Capability* [online],[vid. 2012-03-20], Dostupné z: <<http://www.accustream.com/pdf/waterjet-cutting-white-papers.pdf>>.
24. Alcom Alval s.r.o. [online],[vid. 2012-05-20]. *Kvalita řezu a přesnost*. Dostupné z:<<http://www.hlinik.cz/nabizime/tvarove-rezani/kvalita-rezu-presnost>>.
25. Kovojuza s.r.o. [online],[vid. 2012-05-20]. *Technologie řezání vodním paprskem*. Dostupné z:<<http://www.kovojuza.cz/vodni-paprsek.html>>.
26. Waterjet Cutting [online],[vid. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.mfg.mtu.edu/cyberman/machining/non_trad/waterjet/>.
27. Gumex s.r.o, Strážnice [online],[vid. 2012-05-20]. *Řezání vodním paprskem*. Dostupné z: <http://www.gumex.cz/www/rezani-vodnim-paprskem/?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=sluzby>.
28. AxFlow s.r.o., Praha [online],[vid. 2012-05-20]. *Pístová a plunžrová čerpadla*. Dostupné z: <<http://www.axflow.com/cz/Group-Site-Management/cerpadla-a-servis/Produkty/Cerpadla/plunzrova-cerpadla-FMC/>>.
29. PKIT s.r.o., Praha. [online],[vid. 2012-05-20]. *Tryskací materiály*. Dostupné z: <<http://www.pkit.cz/tryskaci-materialy.php>>.
30. AWAC s.r.o, Brno [online],[vid. 2012-05-20]. *Systémy dělení materiálu*. Dostupné z: <<http://www.awac.cz/?lang=cz&m1=2&m2=1&m3=0&m4=0>>.
31. HORÁČEK, Lukáš. *Využití nekonvenčních paprskových technologií (laser/vodní paprsek) ve strojírenství*. Diplomová práce. Brno, 2008. [online],[vid. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=5663>.
32. PRAX, Ondřej. *Nekonvenční metoda obrábění vodním paprskem*. Diplomová práce. Brno, 2011. [online],[vid. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=39104>.
33. BRYM, Radek. *Trendy vývoje obrábění vodním paprskem*. Diplomová práce. Brno, 2008. [online],[vid. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=5167>.
34. KOPEČNÝ, Libor. *Abrazivní vodní paprsek*. Diplomová práce. Brno, 2011. [online],[vid. 2012-05-20]. Dostupné z: <<http://www.scribd.com/doc/79949154/16/Frezovani-vodnim-paprskem>>.

35. Systém řezání vodním paprskem [online],[cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.industrycentral.eu/images/stories/articles/2010_10_01_008.jpg>.
36. SIGMA PUMPY HRANICE s.r.o., Hranice [online],[vid. 2012-05-20]. *Plunžrová čerpadla*. Dostupné z: <<http://www.sigma.sk/program/pcd.htm>>.
37. Plunžrové čerpadlo. [online],[vid. 2012-05-20]. Dostupné z: <<http://mve.energetika.cz/jineturbiny/plunzrove-cerpadlo.htm>>.
38. PTV s.r.o. [online],[vid. 2012-05-20]. *Plunžrové čerpadlo PTV-JETS*. Dostupné z: <http://www.ptv.cz/ptv/jnp/cz/produkty/vysokotlaka_cerpadla/PTV_75_60_basic/index.html>.
39. Flowcorp s.r.o. [online],[vid. 2012-05-20]. *MACH 4*. Dostupné z: <http://www.flowcorp.cz/upload/File/Pdf/Mach/Flyer_MACH4_CZ.pdf>.
40. AccuStream. [online],[vid. 2012-04-20]. *WaterJet parts*. Dostupné z: <<http://www.accustream.com/waterjet-parts/kmt/orifices-nozzles/11280D-xxx.html>>, <<http://www.accustream.com/waterjet-parts/omax/nozzles-orifices/12780-030-.html>>, <<http://www.accustream.com/waterjet-parts/kmt/cutting-head-components/12903.html>>.
41. KOVOVÝROBA Jiří Matušík. [online],[vid. 2012-05-20]. *Řezání vodním paprskem*. Dostupné z: <<http://www.matusik.cz/cz/28-rezani-vodnim-paprskem.html>>.
42. EWL WaterJet. [online],[vid. 2012-05-20]. *WaterJet cutting money alloy 400*. Dostupné z: <http://www.ewlwaterjet.com/case_study/water_jet_cutting_monel_alloy_400/>.
43. Ústav geoniky AV ČR.[online],[vid. 2012-05-20]. *Soustružení vodním paprskem*. Dostupné z: <<http://www.ugn.cas.cz/index.php?l=cz&p=about/about3.php>>.
44. Jet Edge [online],[vid. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.jetedge.com/includes/show_image.cfm?image=/images/case/93/100_3741.JPG>.
45. MMSpektrum [online],[vid. 2012-05-20]. *Frézování a gravírování nekonvenční technologií AWJ*. Dostupné z: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/frezovani-a-gravirovani-nekonvencni-technologie-awj.html>>.
46. WARDJet [online],[vid. 2012-05-20]. *3D řezání vodním paprskem, multiplikátor*. Dostupné z: <<http://www.wardjet.com>>.
47. AWAC, spol. s.r.o. [online],[vid. 2012-05-20]. *Ocel, dlažba – mozaika*. Dostupné z: <<http://www.awac.cz/?lang=cz&m1=2&m2=1&m3=9>>.
48. Direct Industry. [online],[vid. 2012-05-20]. *Spectrometer GDS*. Dostupné z: <<http://www.directindustry.com/prod/horiba-jobin-yvon/glow-discharge-spectrometers-gds-25366-596636.html>>.
49. Sugino [online],[vid. 2012-05-20]. *Odjehlování vodním paprskem*. Dostupné z: <<http://www.sugino.cz/index.php?page=washing.htm>>.
50. Sigmet s.r.o. [online],[vid. 2012-05-20]. *Vysokotlaká plunžrová čerpadla*. Dostupné z: <http://www.sigmet.cz/sortiment/prumyslovacerpadla/hydrostaticka/pdf/cerpadla_armatury.pdf>.

51. BOMAR, s.r.o. [online],[vid. 2012-05-20]. *Pásová pila*. Dostupné z:
<<http://www.bomar.cz/cs/cz-transverse/automaticke/transverse-610440-ganc>>.
52. KOVOSVIT MAS, a.s. [online dostupné pouze z IP adresy VUT FSI],[vid. 2012-05-13]. *Obráběcí centrum MCV 1000 SPEED*. Dostupné z:
<<http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/?page=publikace>>.
53. Narexcon [online],[vid. 2012-05-20]. *Vrtáky*. Dostupné z:
<http://www.narexcon.cz/content/file/NC_obrabeni.pdf>.
54. MT závitníky [online],[vid. 2012-05-20]. *Závitníky*. Dostupné z:
<<http://www.i-zavitniky.cz/i-zavitniky/eshop/4-1-Strojni-zavitniky/444-4-pro-nerez-oceli/5/1947-DIN374-4260-M14x1-5-TiN-sroubova-drazka>>.
55. Clarkson [online],[vid. 2012-05-20]. *Stopkové frézy malých průměrů*. Dostupné z:
<<http://www.clarkson.cz/files/frezy%20osg.pdf>>.
56. Katalog SANDVIK Coromant. *Rotační nástroje*. Dánsko: Stibo Graphic. 1999.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Rozdělení jednotlivých obráběcích technologií, dle [4].	10
Obr. 1.2 Základní rozdělení kontinuálního vodního paprsku.	11
Obr. 1.3 Vodní paprsek v 2. pol. 20. stol. [1,2,30].	12
Obr. 1.4 Dynamické řezání vodním paprskem [1].	13
Obr. 1.5 Schéma principu vysokotlakého čerpadla [35].	14
Obr. 1.6 Charakter řezu kapalinového paprsku [4,30].	16
Obr. 1.7 Rozdělení kapalinových (vodních) paprsků.	17
Obr. 1.8 Mísení abraziva s vysokotlakým paprskem AWJ ve směšovací komoře, podle [31].	19
Obr. 1.9 Princip technologie systému AWJ, podle [4,30].	19
Obr. 2.1 Rozsah oblastí jednotlivých filtračních postupů [4].	23
Obr. 2.2a Schéma plunžrového čerpadla firmy Sigma Pumpy Hranice [36].	25
Obr. 2.2b Princip funkce stlačování kapaliny v komoře pístu [46].	26
Obr. 2.2c Princip funkce triplexového plunžru [46].	26
Obr. 2.3a Schéma multiplikátoru firmy Flow [1].	27
Obr. 2.3b Zjednodušený princip multiplikátoru [46].	28
Obr. 2.3c Řez multiplikátoru s jednotlivými díly [46].	28
Obr. 2.4 Systém čerpadla s akumulátorem českého výrobce PTV (typ JETS -3.8/60 Basic). [38].	29
Obr. 2.5 Korozivzdorné potrubí pro vedení vysokotlaké vody. [33].	30
Obr. 2.5a Těsnění firmy PTV [17].	30
Obr. 2.6 CNC centrum firmy Flow (model Mach 4), dle [39].	32
Obr. 2.7 Základní konstrukce řezacích hlavic s vodními dýzami, dle [4].	33
Obr. 2.8 Jednotlivé části řezací hlavy (abrazivní tryska, řezací hlavice) [41].	34
Obr. 2.10 Druhy abrazivních materiálů, dle [29].	36

Obr. 2.11 Dávkočabraziva ATD IV firmy PTV [11].....	37
Obr. 2.12 Kreslicí rozhraní programu FlowMaster [1].....	38
Obr. 2.13 Řezací hlava se systémem Dynamic Waterjet společnosti Flow ve firmě Kovovýroba Matušik. [41].....	39
Obr. 3.1 Řezání vícevrstvých materiálů systémem společnosti Flow. [1].....	40
Obr. 3.2 Způsoby vrtání pomocí technologie AWJ, dle [32,33].	41
Obr. 3.3 Ukázka vyvrtávání děr materiálu z niklové slitiny. [42]	41
Obr. 3.4 Ukázka soustružení pískovce technologií AWJ [43].....	42
Obr. 3.5 Schéma soustružení technologií AWJ, dle [4].....	42
Obr. 3.6 Ukázka vyfrézování loga do kamene pomocí technologie AWJ [44].....	43
Obr. 3.7 Závislost tvaru povrchu na změně velikosti posuvu a hloubce záběru. [3].....	44
Obr. 3.8 Ukázka gravírování reliéfů na mosaz a kámen technologií AWJ [16].....	44
Obr. 3.9 Řezání lopatky pomocí 5osé řezací hlavy firmy Wardjet [46].....	45
Obr. 3.10 Umělecká tvorba pomocí technologie frézování vodním paprskem [47].....	47
Obr. 3.11 Srovnání řezu technologií AWJ vs. Laser. [1].....	48
Obr. 4.1 Strojní zařízení MACH 3 pro řezání vodním paprskem ve firmě Vy-TECH.....	49
Obr. 4.2 Systém hyplexového čerpadla ve firmě Vy-TECH.	50
Obr. 4.4 Schéma vyhodnocení dat (tab. 4.2) získaných ze vzorku pomocí optického emisního spektrometru s doutnavým výbojem - Spectrumat GDS [49].....	53
Obr. 4.5a Martenzitická struktura korozivzdorné oceli X5CrNiCuNb16-4 (vlevo nahoře zalisovaný a leptaný vzorek).....	53
Obr. 4.5b Martenzitická struktura korozivzdorné oceli X5CrNiCuNb16-4.	54
Obr. 4.6 Schéma koncových vysokotlakých části plunžrového čerpadla Hyplex (vpravo nahore sestava vytvořená v programu Solidworks).....	55
Obr. 4.7 Místo vzniku trhlin v závitové díře M12x1,25 v dílu koncovky.....	56
Obr. 4.7a Síly působící na sestavu.	57
Obr. 4.8 Minimální koeficient bezpečnosti spočten na hodnotu $0,38 < 1$, v místě (B).	58
Obr. 4.9 Maximální hodnota uzlového napětí byla spočtena na základě kritéria maximálních napětí von Mises na 1223,304MPa v místě (B), ve spodní části lze spatřit pásmo ovlivněné napětím na dně díry závitu (A).	59
Obr. 4.10 Minimální koeficient bezpečnosti spočten na hodnotu $0,39 < 1$, v místě (B).	60
Obr. 4.11 Maximální hodnota uzlového napětí byla spočtena na základě kritéria maximálních napětí von Mises na 1085,495MPa v místě (B), ve spodní části lze spatřit pásmo ovlivněné napětím na dně díry závitu (A).	60
Obr. 4.12 Uložení tří dílů koncovek ve „zpevňujícím“ dílu. [50]	61
Obr. 5.1 Model a foto koncovky.....	62
Obr. 6.1 CNC pásová pila firmy BOMAR. [51].....	64
Obr. 6.2 Řezání vodním paprskem na CNC stroji MACH3. [6]	65
Obr. 6.3 Obráběcí centrum MCV 1000 SPEED výrobce KOVOSVIT MAS, a.s. [52]	66
Obr. 6.4 Odjehlovací vodní centrum firmy SUGINO. [49].....	66
(pozn. Obrázky fréz a vrtáku, které nejsou číslovány, jsou poskytnuty z [56]).	67
Obr. 7.1 Vrták NAREX [53].....	74

Obr. 7.2 Vrták Narex [53].....	74
Obr. 7.4 Fréza firmy Clarkson [55].	77
Obr. 7.1 Posuvné měřítko [15].....	78
Obr. 7.2 Kalibr na tolerované otvory a závity [16].....	78

SEZNAM TABULEK A GRAFŮ

Tab. 2.1 Určení tvrdosti vody ($1\text{mmol.l}^{-1} = 5,6^\circ \text{DH} = 7,02^\circ \text{ang.} = 10^\circ \text{F} = 100^\circ \text{amer.}$) [8]. ..23	
Tab. 2.2 Parametry CNC zařízení typu Mach 4C, dle [39].	32
Tab. 2.3 Složení abraziva (granátu GMA) australského původu [11].	35
Tab. 3.1 Užití technologie vodního paprsku v průmyslových odvětvích.	46
Tab. 4.1 Řady HyPlex čerpadel firmy FLOW [6].	50
Tab. 4.2 Chemické složení korozivzdorné oceli v procentech hmotnosti (zbytek do 100 hmot. % tvoří Fe).	52
Graf 4.3 Grafické vyjádření chemického složení korozivzdorné oceli v hmot. % (kromě Fe).	52

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Koncovka (obrázky)
Příloha 2	Rozdělovač (obrázky)
Příloha 3	Vysokotlaký válec (obrázky)
Příloha 4	Nástrojový list
Příloha 5	Technologický postup
Příloha 6	Protokol o chemickém složení
Příloha 7	Materiálové listy
Příloha 8	Výkres dílu koncovky

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

<u>Zkratka/Symbol</u>	<u>Jednotka</u>	<u>Popis</u>
NTO	[-]	Nekonvenční technologie obrábění
CAD	[-]	Computer Aided Design - počítačem podporované navrhování
CAM	[-]	Computer Aided Manufacturing - počítačem podporovaná výroba
WJM	[-]	Water Jet Machining - čistý vodní paprsek
AWJ	[-]	Abrasive Water Jet Machining - abrazivní vodní paprsek
ASJ	[-]	Abrasive Water Injection Jets - paprsek abrazivní suspenze
CNC	[-]	Computer Numerical Control - počítačem řízené obrábění stroje
CCD	[-]	Charge - coupled device (zařízení s vázanými náboji)
HSS	[-]	High speed steel (rychlořezná ocel)
VBD	[-]	vyměnitelná břitová destička
SK	[-]	slinutý karbid
P_1	[Pa]	tlak na ploše S_1
P_2	[Pa]	tlak na ploše S_1
μ	[-]	výtokový součinitel
ρ	[kg·m ⁻³]	hustota vody
v_p	[m·s ⁻¹]	rychlost pístu
S_1	[m ²]	plocha velkého pístu
S_2	[m ²]	plocha malého pístu
S_0	[m ²]	plocha průřezu otvoru
Q	[m ³ ·min ⁻¹]	objem protékající vody
Q_c	[m ³ ·min ⁻¹]	průtokové množství hydrogenerátoru
P	[W]	výkon hydrogenerátoru
E_{kin}	[J]	kinetická energie
m	[kg]	hmotnost
W	[J]	práce
h_{max}	[m]	maximální hloubka
σ_0	[-]	kavitační číslo
p_i	[Pa]	impaktní tlak
p_s	[Pa]	stagnační tlak
V_0	[m·s ⁻¹]	rychlost nárazu paprsku
C_0	[m·s ⁻¹]	rychlost zvuku v řezné kapalině
η_m	[N]	hodnota mechanické účinnosti = 0,95

PŘÍLOHA 1

KONCOVKA



PŘÍLOHA 2

ROZDĚLOVAČ



PŘÍLOHA 3

VYSOKOTLAKÝ VÁLEC

