

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

STUDIE POUŽITÍ VODNÍHO PAPRSKU

STUDY USE OF WATER JET

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MARTIN TVARŮŽEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. KAREL OSIČKA, Ph.D.

BRNO 2012

Zadání

Licenční smlouva

ABSTRAKT

V diplomové práci se provádí studie možnosti nákupu vlastní technologie vodního paprsku. Studie má za úkol v konkrétních číslech poskytnout dané firmě obraz, který jí může pomoci při rozhodování o vynaložení finančních prostředků do investice na nákup vlastního zařízení pro vodní paprsek.

Klíčová slova

Vodní paprsek, provozní náklady, doba návratnosti

ABSTRACT

The study of the purchase possibilities of one's own water jet technology is being conducted in the thesis. The study is aimed at providing a conception in concrete numbers to a particular company, which would help it with making decisions about investing funds in investments to the purchase of one's own equipment for the water jet.

Key words

Water jet, operational expenses, period of return

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TVARŮŽEK, M. *Studie použití vodního paprsku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 76 s., 5 příloh. Vedoucí diplomové práce Ing. Karel Osička, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Studie použití vodního paprsku* vypracoval samostatně a použil jsem jen pramenů, které cituji a uvádím v přiloženém soupisu literatury.

V Brně dne 15. května 2012

.....
Bc. Martin Tvarůžek

Poděkování

Děkuji tímto Ing. Karlovi Osičkovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a trpělivost při vypracování diplomové práce.

OBSAH

Abstrakt.....	4
Prohlášení.....	5
Poděkování	6
Obsah	7
Úvod	10
1 TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ	11
1.1 Nekonvenční technologie obrábění.....	11
1.2 Historie vodního paprsku	13
2 PRINCIP ŘEZÁNÍ VODNÍM PAPERSEM	15
2.1 Zařízení pro vodní paprsek	16
2.1.1 <i>Hydraulická jednotka</i>	17
2.1.2 <i>Multiplikátory</i>	18
2.1.3 <i>Plunžrová čerpadla</i>	19
2.1.4 <i>Akumulátor</i>	19
2.1.5 <i>Filtry</i>	19
2.1.6 <i>Řezací hlavy</i>	19
2.1.7 <i>Vysokotlaké potrubí</i>	21
2.1.8 <i>Úprava vody</i>	21
2.1.9 <i>Aditiva</i>	21
2.1.10 <i>Lapač vody</i>	22
2.1.11 <i>Souřadnicový stůl</i>	22
2.2 Možnosti technologie vodního paprsku	24
2.2.1 <i>Oblasti použití technologie vodního paprsku</i>	25
2.2.2 <i>Řezání</i>	25
2.2.3 <i>Vrtání</i>	25
2.2.4 <i>Frézování</i>	26
2.2.5 <i>Soustružení</i>	27
2.2.6 <i>Gravírování</i>	27
2.2.7 <i>Řezání sendvičových materiálů</i>	28
2.2.8 <i>3D obrábění</i>	29

2.3	Výhody a nevýhody vodního paprsku	30
3	ÚBĚR MATERIÁLU	31
3.1	Mechanismus makroskopického procesu	31
3.2	Řezná rychlost	32
3.3	Fenomén rýh.....	34
3.4	Struktura povrchu.....	35
3.5	Chyby při dělení vodním paprskem.....	36
3.5.1	<i>Odchylka kolmosti</i>	<i>37</i>
3.6	Geometrie a tvarové řezání	38
3.7	Stupně kvality řezu.....	39
4	ABRAZIVO	40
4.1	Vlastnosti abraziva.....	40
4.2	Druhy abraziva.....	41
5	VÝROBNÍ MOŽNOSTI FIRMY ARENIA S.R.O.	42
5.1	Historie firmy	42
5.2	Současný stav ve firmě	42
5.3	Strojní vybavení firmy	43
6	ROZBOR TECHNOLOGIČNOSTI KONSTRUKCE RÁMU	47
6.1	Technologičnost konstrukce	47
6.1.1	<i>Dodržení výrobních úchylek rozměrů a jakosti povrchu</i>	<i>48</i>
6.2	Druh použitého materiálu	48
6.3	Návrh polotovaru pro vodní paprsek	49
6.3.1	<i>Polotovar čelních desek rámu skříně</i>	<i>49</i>
6.3.2	<i>Polotovar čelních desek ochranné trubky</i>	<i>50</i>
6.3.3	<i>Využitelnost materiálu</i>	<i>50</i>
7	KOOPERACE VÝROBY	52

8 ÚVAHA O POŘÍZENÍ VLASTNÍ TECHNOLOGIE	55
8.1 Flow Eastern Europe, s.r.o.	55
8.2 AWAC spol. s r.o.	56
8.3 PTV spol. s r.o.	58
9 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	60
9.1 Využití vodního paprsku ve firmě	60
9.2 Efektivní časový fond zařízení	60
9.3 Provozní náročnost vodního paprsku	62
9.4 Výpočet účetních odpisů	63
9.5 Úspory	65
9.5.1 Porovnání cen kooperace a vlastní výroby	65
9.5.2 Recyklace abraziva	66
9.6 Návratnost investice	67
Diskuze	68
Závěr	70
Seznam použitých zdrojů	71
Seznam použitých zkratk a symbolů	74
Seznam příloh	76

ÚVOD

Voda a technologie využívající její sílu jsou známy již tisíce let. Největšího pokroku se technologie vodního paprsku dočkala v druhé polovině 20. století. Na přelomu sedmdesátých a osmdesátých let firma Flow International (USA) používala vysokotlaký vodní paprsek a hydroabrazivní paprsek pro dělení rozličných materiálů. Z počátku se tato technologie používala jen pro vojenský a kosmický program. V dnešní době se již jedná o velice rozšířenou a běžnou technologii, která je využívána především pro dělení materiálů.

Podstatou této metody dělení materiálů je obrušování děleného materiálu tlakem vodního nebo hydroabrazivního paprsku. Díky svým přednostem dělit jakýkoliv materiál (kov, slitiny, kámen, sklo, sklolaminát, gumu, pryž, pěnové materiály atd.) bez silového namáhání a tepelného ovlivnění děleného materiálu (studený řez) se značně odlišuje od ostatních nekonvenčních metod dělení materiálu jako je laserový a plazmový paprsek.

Arenia s. r. o. (dále jen Arenia) je firmou zabývající se zámečnickými a svářečskými pracemi. Jejím hlavním výrobním programem je výroba rámu skříně, která slouží pro indukční ohřev materiálu. Pro výrobu a dělení materiálu čelních desek rámu skříně (viz obr. 1) a dalších dílů, které jsou z korozivzdorné oceli, je využívána technologie vodního paprsku. Arenia zařízení pro vodní paprsek nevlastní, proto tuto činnost řeší u konkurenčních firem. Tato kooperace je uskutečňována v takové míře, že vedení firmy zvažuje pořízení vlastní technologie.

Tato studie si klade za úkol předložit vedení firmy ucelený souhrn poznatků potřebných při rozhodování o koupi vlastní technologie vodního paprsku. Jsou předvedeny nabídky od tří firem: Flow Eastern Europe, s. r. o., AWAC, spol. s r. o. a PTV spol. s r. o. Každá nabídka obsahuje zařízení, která byla nabídnuta podle zadaných požadavků, jejich parametry a samozřejmě výši ceny.

Studie se věnuje výpočtu provozních nákladů spojených s chodem zařízení vodního paprsku, porovnání finančního zatížení formou kooperace a provozem vlastní technologie. Je studována výše úspor získaných při vlastním provozu a doba návratnosti vynaložené investice.



Obr. 1 Díly rámu skříně

1 TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ

Technologie obrábění jako vědní obor studuje, zkoumá a analyzuje vzájemné souvislosti a faktory obráběcího procesu jako integrální složky výrobního procesu strojírenských součástí. Obráběcí proces se realizuje v obráběcím systému, který lze obecně členit na subsystémy obráběcích strojů, řezných nástrojů, manipulačních prostředků a obráběcího prostředí. Objektem obráběcího procesu je obrobek a základním výstupem procesu jsou příslušné obrobené plochy.

Obrábění je tedy technologický proces, kterým jsou vytvářeny povrchy obrobku určitého tvaru, rozměrů a jakosti odebráním částic materiálu účinky mechanickými, elektrickými, chemickými, případně jejich kombinací¹.

1.1 Nekonenční technologie obrábění

Nekonvenční technologie obrábění představují soubor technologií, které nevyužívají pro obrábění a dělení materiálu klasických nástrojů, nýbrž procesů zakládajících se na přírodních zákonitostech o erozi materiálu. Při těchto metodách nikdy nedochází k přímému kontaktu „nástroje“, který bývá zpravidla zastoupen tryskou, drátkem, elektrodou apod., s materiálem. Tyto nástroje pak mají za úkol produkovat formu energie, která podporuje v obráběném materiálu erozivní účinky, a tím dochází k obrušování nebo dělení materiálu². Tab. 1.1 představuje možné oblasti použití nekonvenčních metod obrábění.

Tab. 1.1 Aplikační oblasti nekonvenčních metod obrábění¹.

Obráběný materiál	Nekonvenční metody obrábění								Konvenční obrábění	
	Mech. účinek		Teplený účinek				Chemický účinek			
	USM	AWJM	EDM	EBM	LBM	PBM	CM	ECM	F	S
Slitiny Al	C	C	B	B	B	A	A	B	A	A
Oceli	B	D	A	B	B	A	A	A	A	A
Superslitiny	C	D	A	B	B	A	B	A	B	B
Keramika	A	D	D	A	A	D	C	D	D	C
Sklo	A	D	D	B	B	D	B	D	D	C
Křemík	-	-	D	B	B	D	B	D	D	B
Plasty	B	B	D	B	B	D	C	D	B	C
Lepenky	D	A	D	-	-	D	D	D	D	D
Textil	D	A	D	-	-	D	D	D	D	D

Kde: A – velmi dobré, B – vhodné, C – obtížné, D – nelze aplikovat.

Rozdělení nekonvenčních technologií¹*Oddělování materiálu mechanickým účinkem:*

- ultrazvukové obrábění (Ultrasonic Machining – **USM**),
- obrábění paprskem vody (Water Jet Machining – **WJM**, Abrasive Jet Machining – **AWJM**).

Oddělování materiálu tepelným účinkem:

- elektroerozivní obrábění (Electro Dischining Machining – **EDM**),
- obrábění paprskem plazmy (Plasma Beam Machining – **PBM**),
- obrábění paprskem laseru (Laser Beam Machining – **LBM**),
- obrábění paprskem elektronů (Electron Beam Machining – **EBM**).

Oddělování materiálu elektrochemickým nebo chemickým účinkem:

- elektrochemické obrábění (Electro Chemical Machining – **ECM**),
- chemické obrábění (Chemical Machining – **CM**, **CHM**).

Nekonvenční metody obrábění si na poli techniky začaly vydobývat své místo spolu s nutností obrábět a dělit vysoce pevné materiály zejména v leteckém a kosmickém průmyslu. Se zvyšujícími se nároky na tvarovou a rozměrovou přesnost obrobků docházelo postupně k dalšímu zdokonalování těchto technologií až na současnou úroveň, kdy je díky nim možno obrábět velice přesné součásti. Dnes už jsou nekonvenční metody obrábění běžnou součástí strojího parku výrobních podniků, kde naleznou využití nejčastěji při výrobě tvarově složitých střížníků a střížnic pro stříhání a přesné stříhání, při výrobě hlubokých děr o průměru od 0,1 do 3 mm, při výrobě součástí s tepelně neovlivněnou oblastí v místě řezu a podobně². Obecné charakteristiky účinků nekonvenčních metod obrábění jako je např. úběr materiálu, přesnost rozměrů a drsnost povrchu znázorňuje tab. 1.2.

Tab. 1.2 Obecná charakteristika účinků nekonvenčních metod obrábění¹.

Charakteristika	Nekonvenční metody obrábění								Konven. obrábění	
	Mech. účinek		Teplený účinek				Chemický účinek			
	USM	AWJM	EDM	EBM	LBM	PBM	CM	ECM	F	S
Úběr materiálu	C	C	C	D	D	A	B-D	B	A	B
Přesnost rozměrů	A	B	A-D	A	A	D	A-B	B	B	A
Drsnost povrchu	A	A	B-D	B	B	D	B	B	B-C	A

Kde: A – vynikající, B – dobré, C – uspokojivé, D – špatné.

Základní důvody zavádění a rozšiřování nekonvenčních metod obrábění jsou rostoucí nároky na³:

- konstrukci strojních součástí, vedoucí ke zvyšování podílu těžkoobrobitelných materiálů (žáropevné, žáruvzdorné a vysokopevnostní),
- tvarovou složitost součástí, střížných a tvářecích nástrojů, kokil pro tlakové lití a forem pro lisování plastických hmot,
- řezných nástrojů z RO a SK (např. monolitní tvarové nástroje),
- komplexnost obráběných tvarů forem a zápusťek pro tváření, vyvolávané zcela novými konstrukčními pojetími výrobků,
- výrobu přesných miniaturních součástí,
- produktivitu s cílem vytvořit předpoklady pro zavedení automatizace výroby pro stroje s CNC řízením i systémy CAD/CAM a CIM.

Výhodou u těchto metod je, že obrobitelnost materiálu nezávisí na mechanických vlastnostech, ale na fyzikálních. Dochází k bezsilovému obrábění a minimálnímu tepelnému zatížení obrobku. Na druhou stranu nedostatkem je malá produktivita a vysoká energetická náročnost, ale také i vysoká pořizovací cena obráběcích strojů³.

1.2 Historie vodního paprsku

Počátky použití paprsku vody v průmyslu se datují od roku 1853, kdy kalifornští zlatokopové začali používat proudy vody pro dobývání měkké zlaté rudy. Tento proud vody měl relativně velkou rychlost toku a tlak několik desítek MPa⁴.

Tato metoda dobývání zlata se začíná masivně využívat na Klondiku v období zlaté horečky. Dopravovaná o vysoké rychlosti unášela částice sedimentu a tím pomohla zlatokopům ke snadnějšímu způsobu dobývání nerostného bohatství. Zdaleka se ale nejednalo o vodní paprsek, který známe nyní. Při prvních pokusech využití vody k obrábění nešlo ani tak o řezání materiálu, ale spíše o vymílání a odplavování lehčích nánosů. Vznik myšlenky a vývoj technologie vodního paprsku, jaký známe dnes, se datuje do poloviny 20. století⁵.

Prvním člověkem, který začal studovat účinky vody, jako řezného nástroje, byl v roce 1950 lesnický inženýr Dr. Norman Franz⁴.

Byl první osobou, která studovala použití velmi vysokého tlaku vody jako řezného nástroje. Podmínka vysokého tlaku je definována tlakem větším jak 30 000 liber na čtvereční palec. Proto je Dr. Norman Franz považován za otce vodního paprsku⁶.

Pouštěním těžkých závaží na sloupec vody a napojením této kapaliny do úzké trysky, docílil impulzu vysokotlaké kapaliny. Dr. Norman Franz zjistil, že těmito rázy je schopen štípat dřevo a další materiály⁴.

Při vývoji prvního vysokotlakého vodního paprsku se nechal Dr. Franz inspirovat metodou, která zjišťovala únik páry z tlakových nádob pro přehřátou páru pomocí koštěte. V případě, kdy se v tlakové nádobě vyskytnul kaz (díra), pak unikající pára z tlakových hrnců měla dostatečnou kinetickou energii k našťípnutí násady koštěte⁵.

Jeho pozdější studie zahrnovala více přetržitých proudů vody, ale bylo velmi složité dosáhnout nepřetržitosti paprsku. Navíc, život rezného nástroje byl měřený v minutách – ne v týdnech nebo měsících jak je tomu dnes⁴.

Pozdější spolupráce s firmou McCartney Manufacturing přivedla Dr. Franze k výrobě prvního komerčního zařízení, využívajícího vysokotlaký vodní paprsek pro řezání materiálu. Zařízení bylo zakoupeno firmou Alton Box Board, která tento stroj použila na obrábění nábytku⁵.

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

Zásadním milníkem ve vývoji řezání vodním paprskem byl rok 1980. Dr. Mohamed Hashish, tehdy studující na Concordia University v Montrealu, studoval řezání vodním paprskem a sestavil si vlastní řezací jednotku. Při postgraduálním výzkumu si kladl otázku přidávání abraziva do vody. Naplnil tedy nádobu z polystyrenu popelem z popelníku a umístil ji na řezanou desku ze dřeva. Po spuštění stroje řezal paprsek vody daleko rychleji než dříve, což ho přesvědčilo o správnosti jeho teorie. Hashish byl najat firmou Flow jako výzkumný pracovník. Experimentoval s různorodými abrazivními materiály, jako je granát, písek dokonce i popel ze sopečné erupce hor St. Helen. S touto metodou mohl řezat téměř každý materiál. Proto se tato inovovaná technologie začala rychle rozšiřovat do průmyslu⁴.

Od myšlenky Dr. Normana Franze, který se snažil vyvinout novou technologii na řezání dřeva, přes nápad Dr. Mohameda Hashishe s přidáním abraziva do procesu řezu se z technologie označované jako nekonvenční stává technologický fenomén, který by se dal zejména svým zájmem ze strany firem a využíváním v praxi zařadit mezi technologie konvenční⁵.

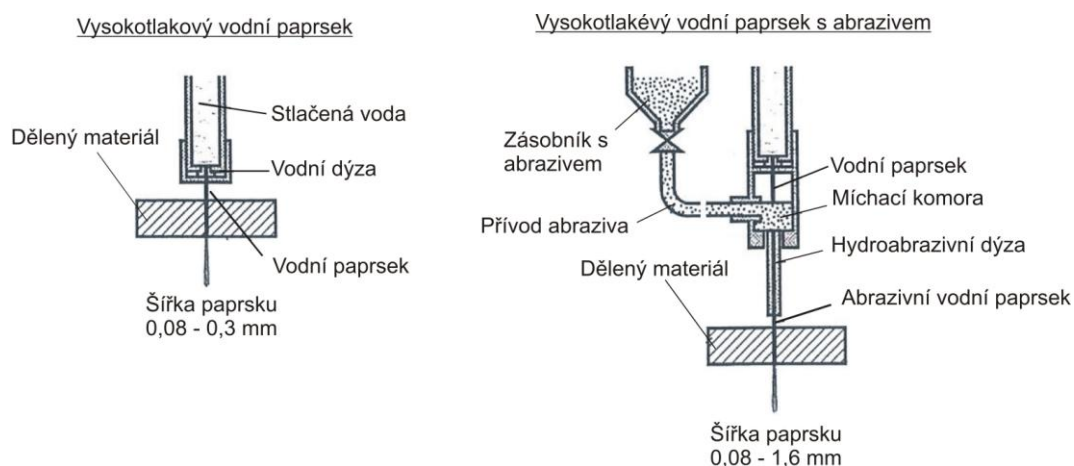
Dnes je technologie řezání vodním paprskem rozšířena po celém světě v širokém okruhu průmyslového využití. Od řezání speciálních materiálů při výrobě družic a raketoplánů ve společnosti NASA, přes řezání výplní dveří u automobilů nebo skel, kompozitů pro sportovní potřeby, skelné vaty až po řezání pečiva, masa nebo ryb⁴.

2 PRINCIP ŘEZÁNÍ VODNÍM PAPSKEM

Podstatou této metody dělení materiálů je obrušování děleného materiálu účinkem dopadajícího vodního proudu s vysokou rychlostí a kinetickou energií na jednotku plochy. Abrazivo jako přísada znásobuje mechanický účinek dopadu paprsku na materiál.

Z hlediska použitého pracovního média se rozlišují dvě základní metody (viz obr. 2.1)⁷:

- WJM – Water Jet Machining – obrábění čistým vodním paprskem (hydrodynamické obrábění), šířka paprsku 0,08-0,3 mm,
- AWJ – Abrasive Water Jet Machining – obrábění abrazivním vodním paprskem (vodní paprsek s přísadou jemného brusiva), šířka abrazivního paprsku 0,8-1,6 mm.



Obr. 2.1 Rozdíl mezi čistým a abrazivním vodním paprskem⁸.

Paprsek nebo proud vody je generován v tlakovém zdroji, kterými jsou speciální vysokotlaká čerpadla, která se liší příkonem (9-75 kW) a průtokem vody (1,2-7,6 l·min⁻¹). Pracovní tlak vody se pohybuje v rozmezí 800 až 5 000 bar. Paprsek vzniká v řezací hlavě zakončené tryskou.

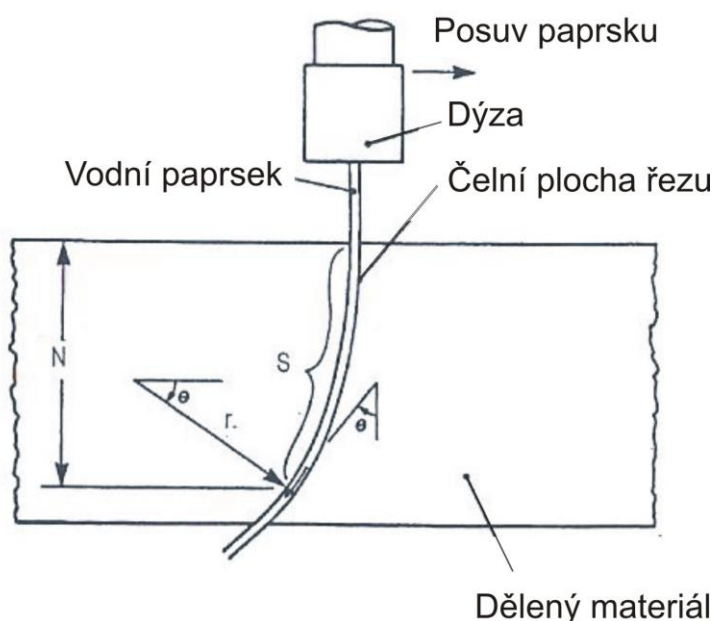
Tryska může mít průměr cca 0,15-0,30 mm čistý vodní paprsek schopný řezat měkčí materiály jako jsou plasty, dřevo, guma, korek, těsnění, potraviny apod.

Druhou alternativou využívanou častěji je cca 0,8-1,5 mm abrazivní vodní paprsek s příměsí brusného prášku (nejčastěji se používá granátového „písku“).

Abrazivní vodní paprsek je díky své vysoké energii schopný řezat tvrdé a těžkoobrobitelné materiály jakými jsou například kovy, kámen, sklo, keramika atd. v tloušťkách 100 i více mm⁹.

Standardní přesnost výřezu je $\pm 0,2 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-1}$. Dělený materiál není silově namáhán. Řezná hrana není nijak tepelně ovlivněna, vždy se jedná o studený řez. Tato skutečnost je velmi důležitá a také rozhodujícím způsobem odlišuje technologii vodního paprsku od jiných technologií dělení materiálu, zvláště laseru a plazmy⁹.

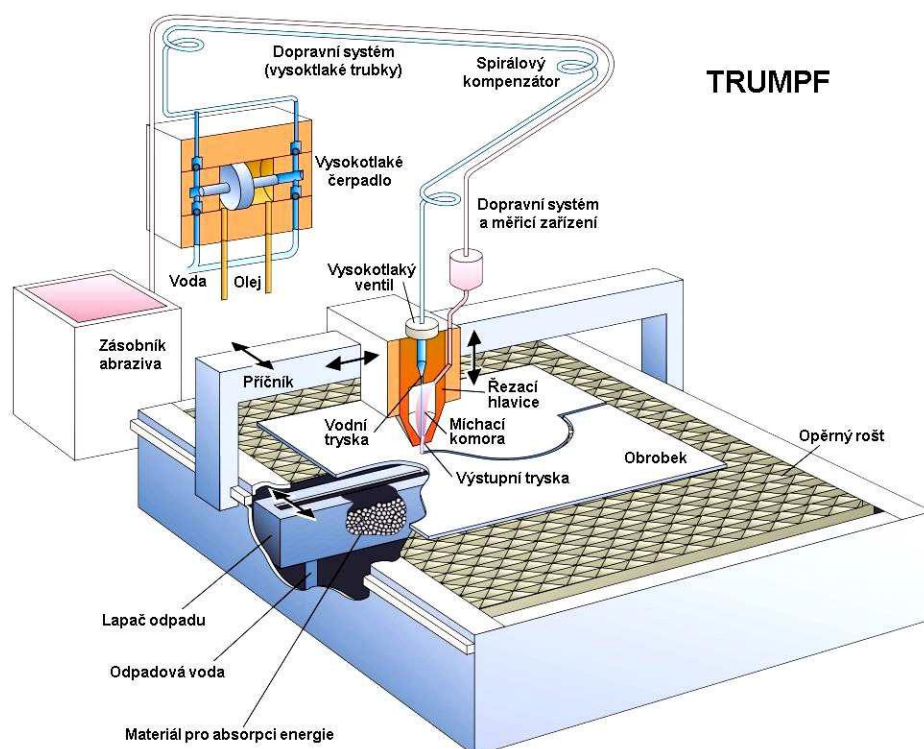
Paprsek vody proniká do materiálu, postupně ztrácí svoji kinetickou energii a vychyluje se (viz obr. 2.2). K vychýlení paprsku dochází v důsledku tření mezi povrchem materiálu a vodním paprskem⁷.



Obr. 2.2 Dráha a vychýlení paprsku⁷.

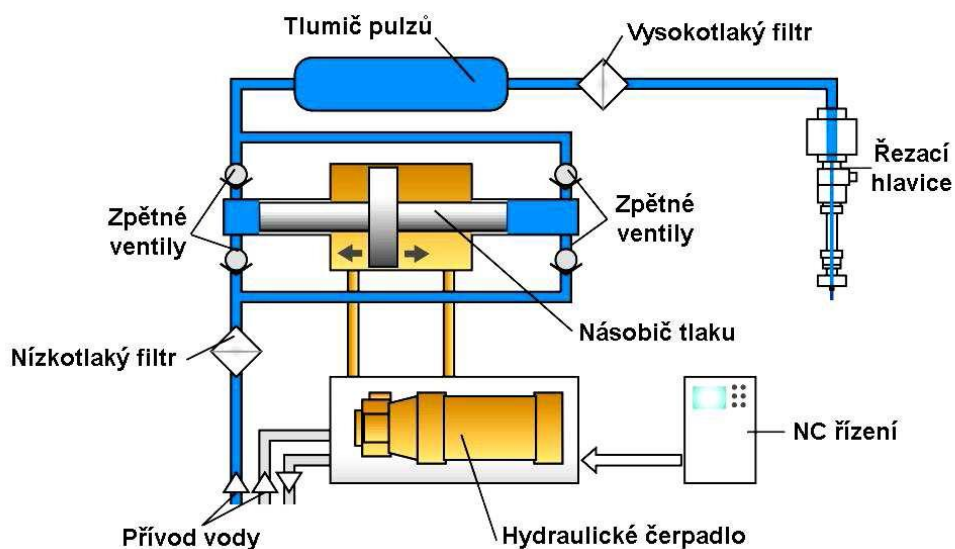
2.1 Zařízení pro vodní paprsek

Hlavními prvky zařízení pro řezání vodním paprskem jsou zobrazeny na obr. 2.3 a patří sem hydraulická jednotka s čerpadlem a multiplikátorem (násobičem tlaku), filtry, ventily, potrubí pro rozvod vody, systém dávkování abraziva, řezací hlavice, opěrný rošt pro podepření obrobku, lapač nečistot, systém úpravy a recyklace vody a řídicí NC nebo CNC systém¹.

Obr. 2.3 Zařízení pro řezání vodním paprskem¹.

2.1.1 Hydraulická jednotka

Vysokotlaké vodní čerpadlo (viz obr. 2.4, 2.5) je zařízení, které slouží pro vytvoření vysokotlaké vody. Povinností čerpadla je zajišťovat stálý a nepřetržitý proud vody o předepsaném tlaku. Toho je dosaženo za pomoci multiplikátoru nebo triplexového plunžrového čerpadla². Typ konstrukce zařízení závisí na výrobci. Zařízení s multiplikátorem dodává na trh americká firma Flow Systems a zařízení s triplexovým plunžrovým čerpadlem dodávají japonské firmy⁸.

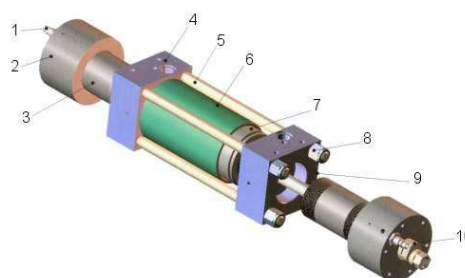
Obr. 2.4 Schéma zařízení vysokotlaké vodní pumpy s multiplikátorem¹.

2.1.2 Multiplikátory

Multiplikátor (viz obr. 2.6) je součástí hydraulické jednotky a je využíván ke zvyšování tlaku vody. Pracuje na principu dvou spojených pístů. Nízký tlak oleje je přivedený na vnější průměr pístu, který je pak transformován na vysoký tlak vody na malém pístu. Tento tlak lze plynule regulovat v rozmezí od 0 do 600 Mpa. Na těchto tlacích je závislá spotřeba vody při řezném procesu, která se pohybuje v rozmezí 0 až 11 l·m⁻¹, což je ovlivněno i použitou vodní a abrazivní tryskou².



Obr. 2.5 Vysokotlaké čerpadlo¹⁰.



Obr. 2.6 Schéma multiplikátoru¹¹.

Z rovnice Pascalova zákona platí, že působící tlak p_1 na píst vyvolá o tolik větší tlak p_2 , kolikrát je menší plocha pístu S_2 vůči ploše S_1 ¹².

Pascalův zákon:

$$p_1 \cdot S_1 = p_2 \cdot S_2 \quad (2.1)$$

Pro multiplikátor je z hlediska konstrukce nejdůležitější koeficient zvýšení tlaku¹².

Koeficient zvýšení tlaku:

$$i = \frac{p_2}{p_1} = \frac{S_1 - S_2}{S_2} \quad (2.2)$$

Při chodu dochází v multiplikátoru ke ztrátám, vlivem tření a netěsností systému. Tyto ztráty jsou zahrnuty v mechanické účinnosti. Hodnota mechanické účinnosti je $\eta_m = 0,95$.¹²

Výstupní tlak multiplikátoru:

$$p_2 : p_1 = \frac{S_1 - S_2}{S_2} \cdot p_1 \cdot \eta_m [Pa] \quad (2.3)$$

Objem vysokotlaké vody vytvořené multiplikátorem není konstantní, proto se musí v systému použít akumulátor, který vyrovná kolísání tlaku.

2.1.3 Plunžrová čerpadla

Plunžrová čerpadla mají podobnou konstrukci jako pístové čerpadlo. Místo plochého pístu má píst dlouhý plunžr, podle kterého je čerpadlo pojmenováno. Při zpětném pohybu plunžru se díky sacímu účinku otevírá sací ventil a médium proudí do čerpadla. Při dopředném pohybu plunžru se sací ventil uzavírá vlastní vahou nebo působením pružiny a otevírá se výtlačný ventil, médium je vytlačováno do výtlačného potrubí.

Díky uspořádání tří plunžrů je silně redukována pulzace. Zbytková pulzace může být eliminována použitím tlumiče pulsů. Plunžrová čerpadla CAT jsou standardně osazena vysokotlakým a nízkotlakým těsněním. To dovoluje mazání a chlazení vysokotlakého těsnicího břítu dopravovaným médiem. Průsaky vysokotlakého těsnění jsou odvedeny zpět do sacího okruhu¹³.

2.1.4 Akumulátor

Akumulátor je tlaková tlustostěnná nádoba, která má za úkol vyrovnání výkyvů tlaku v systému, způsobeném oscilačním pohybem pístu v multiplikátoru. Nádoba je upravována autofretáží, což je proces, při kterém je nádoba přetlakována tak, aby došlo k vytvoření plastických deformací v materiálu, zpravidla na hranici makro vad. V těchto místech dochází ke koncentraci napětí a zpevnění. Tímto nárazovým přetížením tlakové nádoby dojde k zamezení růstu mikrotrhlin i makrotrhlin, které by pulzace přiváděné tlakové vody mohlo způsobit².

2.1.5 Filtry

Filtr je neodlučitelná součást zařízení, čistí kapalinu a odplavuje nečistoty do velikosti 1,2 až 0,5 μm , zároveň chrání vodní trysku před možným poškozením cizími tělísky.

Filtry pro nízký tlak jsou vyrobeny z bavlny nebo syntetické látky. Filtry pro vysoký tlak jsou kovové ve tvaru sítěk umístěných před řeznou hlavou⁸.

2.1.6 Řezací hlavy

Řezací hlava je jeden z nejdůležitějších prvků zařízení. Společně s vysokotlakým čerpadlem a systémem vodní a abrazivní trysky dodávají této technologii její sílu. Vodní trysky jsou konstruovány ve tvaru zužující se dýzy, aby znásobily rychlost vodního paprsku, který vytvoří rovnoměrný proud od 0,075 do 1,5 mm pohybující se rychlostí 1 až 4 Mach. Vnitřní průměr, povrch a geometrie dýz jsou vlastnosti, které mají vliv na konečnou kvalitu paprsku².

Trysky pro vodní paprsek jsou vyráběny ze safíru nebo slinutého karbidu, ale v dnešní době se začínají upřednostňovat trysky z diamantu⁸.

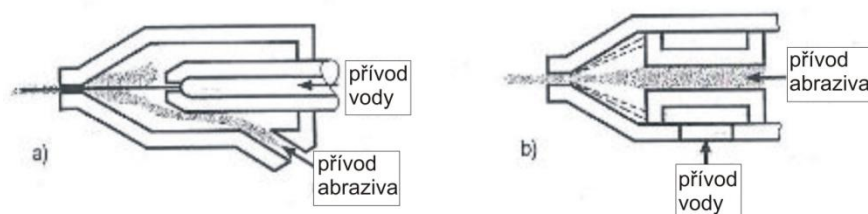
Největší výhodou diamantových trysek (viz obr. 2.7) je jejich dlouhá životnost (min. 500 provozních hodin, v průměru prakticky 1 000 hodin – v závislosti na kvalitě a tvrdosti vody). Další výhodou je větší a delší soudržnost paprsku a tím lepší řezací parametry, zvýšení produktivity a nižší provozní náklady¹⁴.



Obr. 2.7 Diamantové hlavy od firmy PTV¹⁵.

Základním rozdílem mezi čistým vodním paprskem a abrazivním paprskem je v přivádění jemného abraziva (brusiva) do proudu vody, k čemuž jsou přizpůsobena i konstrukce samotné dýzy.

Konstrukce podle obr. 2.8a je snadno vyrobitelný typ dýzy s jednoduchým vodním paprskem a radiálním přívodem brusiva s možností použití i pro čistý vodní paprsek. Výhodou dýzy podle schématu na obrázku Obr. 2.8b je axiální přívod brusiva, tento způsob přívodu brusiva zlepšuje jeho smíchávání s vodou a tím zmenšuje opotřebení obvodu dýzy. Brusivo je přiváděno přes smíchávací komoru do vysokotlakového proudu vody. Ve smíchávací komoře se brusivo libovolně smíchá s vysokotlakovou vodou a potom prochází přes sekundární dýzu, jejíž otvor (štěrbina) má průměr v rozmezí od 0,75 až 2,5 mm⁸.



Obr. 2.8 Dýzy pro AWJ⁸.

- a) Dýza pro AWJ s jednoduchým vodním paprskem a radiálním přívodem abraziva
- b) Dýza pro AWJ se smíchaným paprskem a axiálním přívodem brusiva

Výkon vodního paprsku se pohybuje od 7 do 45 kW. Používané brusivo je granát, minerální písek a ve speciálních případech křemíkový písek.

Podle konstrukce dýzy se rozlišují i způsoby řezání abrazivním vodním paprskem. Preferují se dvě hlavní technologie abrazivního vodního paprsku⁸:

- systém s přímým přívodem brusiva (AWJ abrasive water jet), při kterém je brusivo vedené ze zásobníku do smíchávací komory, ve které je vysokotlakým vodním paprskem strháváno a urychlováno. Tento systém používá vysokorychlostní vodní paprsek na smíchávání a následné tvoření abrazivního paprsku. Používané tlaky vody jsou 7 až 400 MPa, průtok abraziva je v rozmezí 1 až 20 kg·min⁻¹,
- systém s přímým vstřikováním brusiva (ASJ abrasive slurry jet), v tomto případě se do dýzy přivádí stlačená suspenze smíchaná s vodou v tlakové nádobě. Používané tlaky jsou do 100 MPa, průtok suspenze je okolo 20 kg·min⁻¹, pro přesné řezání se udává 1 až 3 kg·min⁻¹.

Z kvalitativního porovnání obou druhů technologií abrazivního paprsku vychází, že ASJ systém má vyšší účinnost a vyšší proudovou hustotou narážejících částic než AWJ, zároveň ASJ systém umožňuje použití užšího průměru paprsku a dýzu kompaktní konstrukce⁸.

2.1.7 Vysokotlaké potrubí

S přihlédnutím na konkrétní systémy a základní požadavky hydraulických rozvodů tlakové kapaliny si každá firma volí svoji ideální sestavu spojovacích elementů a armatur pro svoje pracovní zařízení. Armatura a spojovací elementy jsou vyrobeny z korozi-vzdorné oceli s průměrem 6 až 14 mm. Celý systém rozvodu vysokotlaké vody musí odolávat vysokým hydraulickým tlakům, dynamické zátěži v systému a druhu přepravovaného hydraulického média. Z důvodu a s ohledem na náročnost montáže, údržbu a pracovní spolehlivost prvků, se spojovací elementy a armatury normalizují a standardizují, aby byly snadno vyměnitelné¹².

2.1.8 Úprava vody

Úprava vody je další velmi důležitý faktor z hlediska zanášení otvoru dýzy. Podle poznatků je nejvhodnější používat demineralizovanou a deionizovanou vodu. Kvalita pracovního média resp. úprava vody závisí od výrobce zařízení, každá firma si uvádí svoje požadavky v závislosti od dodávaného zařízení. Dodržování kvality vody ovlivňuje životnost dýzy, těsnění a ventilů. Úprava vody ovlivňuje i rychlost řezání, kvalitu opracování a celkové provozní náklady⁸.

2.1.9 Aditiva

Aditiva neboli přísady do vody jsou na bázi různých polymerů s lineárními molekulami. Roztok vody s polymery typu PAA nebo PEO vytváří souvislý

paprsek a ani po styku s materiálem se paprsek neroztříští. Paprsek je potom při řezání účinnější, energie koncentrovanější a paprsek si zachovává kompaktní jádro⁸.

2.1.10 Lapač vody

Lapač vody je nádoba na zachytávání vodního paprsku, který přechází přes materiál, také slouží na tlumení hluku a zároveň zachytává třísku. Hladina hluku při použití AWJ paprsku je vysoká a může dosahovat hodnoty víc jak 105 dB. Lapač musí být dostatečně hluboký, aby bylo zabezpečeno lámání paprsku ještě před dosáhnutí dna, požadovaná hloubka nádoby je 300 až 600 mm. V případě nedostatku prostoru se může použít i nižší nádoby naplněné kovovými kuličkami⁸.

Firma Awac spol. s r. o. dodává k lapači vody sedimentační systém, který slouží k odsávání použitého abraziva a drobných zbytků řezaných materiálů z lapače stolu do záchytného vaku, který je zavěšen v nádobě stojící na stojanu z důvodu zvýšení hladiny vody ve vaku proti hladině v lapači. Voda spolu s kaly (použité abrazivo a zbytky materiálu) je odčerpávána pneumatickým membránovým čerpadlem (na obr. 2.9 je pod nádrží) do záchytného vaku, kde se těžší částice usazují a odfiltrovaná voda teče samospádem zpět do lapače stolu. Toto zařízení má výhodu, že není třeba vratného elektrického kalového čerpadla. Systém má menší spotřebu elektrické energie a je zároveň spolehlivější. Vak se po naplnění vyzdvihne buď vysokozdvíhacím vozíkem, nebo jiným zdvihacím zařízením a vymění se za prázdný. Používají se vaky, ve kterých se dodává nové abrazivo¹⁶.



Obr. 2.9 Sedimentační systém¹⁶.

2.1.11 Souřadnicový stůl

Souřadnicový stůl pro řezání vodním paprskem by měl být vybaven přesnou a dostatečně tuhou mechanickou konstrukcí. Pro efektivní využití ve výrobě je potřeba automatizovaný provoz, což umožňuje kvalitní řídicí systém. Pohyb řezací hlavy je uskutečňován pomocí předem zhotoveného programu, který je vytvořen v CAD/CAM systému, kde je možno provádět i simulace.

Požadované tvary vyrobených součástí se do systému nahrávají v CAD formátu (*.dwg, *.dxf).

Portálový souřadnicový systém je oddělený od vany (lapače). Vysoká dynamika zařízení je dosažena pomocí nízko osazeného portálu, digitálně řízených stejnosměrných servomotorů s bezvůlovou převodovkou a precizními nerezovými lineárními vedeními. Všechna energetická a řídicí vedení pro celé zařízení včetně příslušenství jsou vedena ve vlečených kabelových nosičích. Dokonalé zakrytování lineárních os zaručuje vysokou životnost stroje při zachování přesnosti¹⁴.

Stoly (viz obr. 2.10) jsou opatřeny roštem nebo kuličkovým povrchem, na který se pokládá materiál určený ke zpracování. Pracovní prostor stolů technické vlastnosti se vyrábí v různých velikostech a variantách¹⁷.



Obr. 2.10 CNC stůl AquaCut pro řezání vodním paprskem¹⁷.

Parametry CNC stolů AquaCut¹⁷

Pracovní zdvih	- do 150 mm
Pracovní délka	- 3 000 mm-18 000 mm
Pracovní šířka	- 1 500 mm-4 000 mm
Tloušťka materiálu max.	- dle druhu materiálu
Počet suportů s řezacími hlavami max.	- 4
Rychlost polohování	- do 50 m·min ⁻¹
Typ vedení v ose X	- lineární vedení
Typ vedení v ose Y	- lineární vedení
Přenos pohybu	- ozubený hřeben a dělený předepjatý pastorek v osách X a Y, kuličkový šroub v ose Z
Přesnost polohování	- podle DIN 28206
3D řezání/rotátor	- Ano/ano
Vrtání/řezání závitů	- do 24 mm

2.2 Možnosti technologie vodního paprsku

Technologie vodního paprsku je v dnešní době řazena mezi nejúčinnější metody řezání, obrábění těžkoobrobitelných materiálů, bez jakékoliv deformace a teplotního ovlivnění řezu. Díky stálému vývoji se objevují nové oblasti využití této technologie¹⁸. Následující tabulka porovnává nekonvenční technologie dělení materiálu.

Tab. 2.1 Obecné porovnání vybraných procesů dělení materiálu¹.

Metoda	Plazma	Laser	Vodní paprsek
Dělitelné materiály	Pouze železné a neželezné kovy	Všechny, mimo kompozitů a materiálů s vysokou světelnou odrazivostí	Všechny materiály
Teplota řezu	Horký řez	Teplý řez	Studený řez
Vliv teploty řezu na materiál	Velký	Malý	Není
Změna struktury materiálu v místě řezu	Velké	Malé	Žádné
Kolmost řezu	Silný odklon	Mírný odklon	Mírný odklon
Drsnost povrchu obrobene plochy	Výrazné rýhy	Nízká drsnost	Lze dosáhnout nízké drsnosti
Výronek v řezné spáře	Možno bez výronku	Většinou bez výronku	Vždy bez výronku
Tvrdost řezaného materiálu	Nemá vliv	Nemá vliv	Ovlivňuje rychlost řezání
Řezání plastů	Není možné	Problematické	Je možné
Řezání kompozitů	Je možné, pokud jsou na bázi kovů	Je možné, pokud mají složky stejnou teplotu tavení	Je velmi vhodné
Řezání keramiky, skla, kamene	Není možné	Velmi omezené	Je velmi vhodné, s výjimkou kalených skel
Reliéfní obrábění	Není možné	Je možné	Výjimečné
Velikost dílce	Velké dílce	Malé i velké dílce	Malé i velké dílce
Tloušťka materiálu	Střední a velká	Malá a střední	Velmi široký rozsah
Složitost tvarů	Jednoduché tvary	Komplikované tvary	Komplikované tvary
Průstřel	Je možný	Je možný	Je možný
Vznik plyných emisí	Velké množství	Malé množství	Nejsou

2.2.1 Oblasti použití technologie vodního paprsku

Technologie vodního paprsku bez abraziva nebo s abrazivem nabízí široké možnosti řezání různých materiálů v různých průmyslových odvětvích¹:

- chemický průmysl – dělení výbušných látek (dynamit, tuhá paliva raketových motorů),
- potravinářský průmysl – dělení potravin v syrovém i zmraženém stavu (zelenina, ovoce, čokolády, sýry, maso, atd.),
- elektrotechnický a elektronický průmysl – řezání feritů, keramiky, skla, amorfních látek, permanentních magnetů, desek tištěných spojů,
- strojírenský průmysl – řezání titanu, wolframu, tantalu, uranu, velmi tvrdých a těžkoobrobitelných materiálů (slinuté karbidy, superslitiny na bázi Ni nebo Co), kompozitů, skel, izolačních materiálů, výroba tvarově složitých součástí (lopatky a díly proudových a raketových motorů, turbin a kompresorů), řezání vláknitých materiálů,
- stavební průmysl – dělení plastů (polyuretany, polystyrény, atd.), čedičové vaty, azbestu, betonu, keramiky,
- gumárenský průmysl – řezání gumy, plastů, vláken,
- papírenský průmysl – řezání papíru, fólií, buničiny (bezprašná pracoviště bez nebezpečí elektrostatických výbojů),
- obuvnický průmysl – řezání kůže, plastických hmot,
- sklářský průmysl – řezání (až do tloušťky 200 mm), vrtání a matování všech druhů skel, tvarové řezy,
- jaderná energetika – dekontaminace a odstraňování ochranných železobetonových vrstev v zařízeních pro jaderné elektrárny, čištění a odstraňování usazenin.

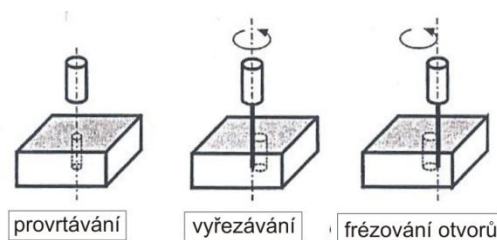
2.2.2 Řezání

Řezání materiálu je historicky první technologií využívání vodního paprsku. V dnešní době se technologie vodního paprsku bez abraziva nebo s abrazivem používá také nejčastěji pro proces dělení materiálu. Ale rapidní rozdíl je v zavedení softwarového řízení systému, který umožňuje řezat tvarově složitě součásti a to do jakéhokoliv materiálu.

2.2.3 Vrtání

Pro vrtání těžkoobrobitelných materiálů jako keramika, sklo, niklové slitiny používané pro plynové turbíny, se využití abrazivního vodního paprsku dostává do popředí zájmu jako perspektivní technologie. V současnosti je vyvinuto několik způsobů vrtání otvorů charakterizovaných vzájemným pohybem paprsku a obrobku (viz obr. 2.11). Nejčastěji se používá vrtání se stacionárním paprskem a obrobkem, vrtání rotujícím paprskem anebo

vibrujícím paprskem se stacionárním obrobkem tzv. vyřezáváním středu otvoru⁸.



Obr. 2.11 Způsoby vrtání AWJ⁸.

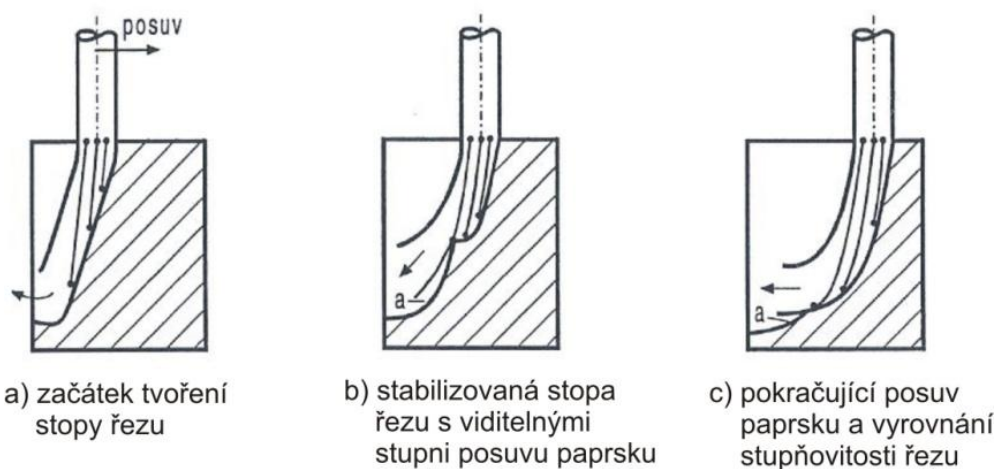
2.2.4 Frézování

Frézování pomocí abrazivního vodního paprsku se využívá pro obrábění skla a minerálů, ale také pro tvarově složité obrobky¹⁹, jako je to znázorněno na obr. 2.12.



Obr. 2.12 Příklady frézování různých geometrických tvarů AWJ paprskem⁸.

Při frézování se jedná o řezání, ale ne dělení materiálu. Řezný cyklus frézování znázorňuje obr. 2.13, se zřetelně viditelnými řeznými stupni. Frézování abrazivním vodním paprskem je proces, při kterém paprsek vícenásobně přechází po obráběné ploše a postupně tvoří tvar blízky konečnému tvaru. Vhodná aplikace abrazivního vodního paprsku pro frézování je při výrobě tvářecích nástrojů¹⁹.

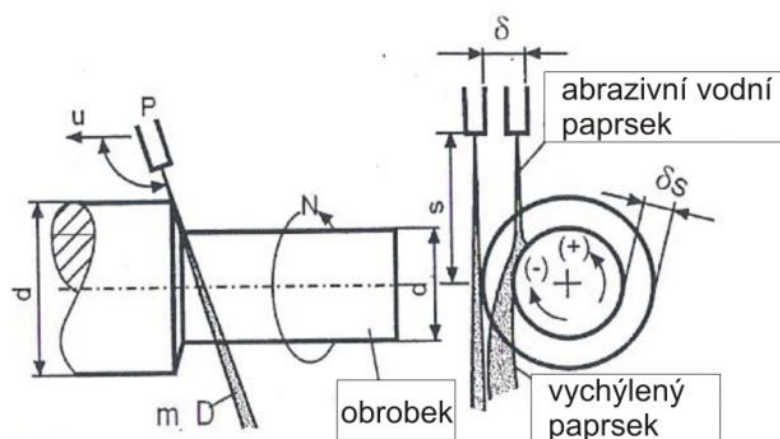


Obr. 2.13 Řezný cyklus při frézování AWJ paprskem⁸.

2.2.5 Soustružení

Soustružení abrazivním vodním paprskem se neuplatnilo tolik, jako ostatní druhy této technologie a nedochází zde ani k zásadnímu ekonomickému efektu. Soustružení AWJ se od konvenčního soustružení liší horší přesností na geometrii obrobku, proto se využívá jen pro těžkoobrobitelné materiály⁸.

Při soustružení obrobek rotuje a abrazivní vodní paprsek se posouvá ve směru osy obrobku. Úběr materiálu je zabezpečený radiálním posuvem paprsku do požadované hloubky řezu. Obrázek 2.14 ukazuje základní schéma soustružení abrazivním vodním paprskem⁸.



Obr. 2.14 Soustružení abrazivním vodním paprskem⁸.

2.2.6 Gravírování

Stejně jako u jiných technologií, tak i při gravírování abrazivním vodním paprskem nedochází k proříznutí celé tloušťky materiálu, ale pouze k odstranění povrchové vrstvy do určité požadované hloubky. Vodní paprsek do materiálu vytvaruje buď přímo výsledný reliéf, anebo je za potřebí ještě následně opracovaný materiál dotvořit ručně. Technologie abrazivního vodního paprsku začíná konkurovat doposud využívaným metodám gravírování, jako nekonvenční laser a konvenčním metodám rytí (frézování, rytí diamantovým hrotem atd.) především proto, že technologie AWJ (viz obr. 2.15) umožňuje gravírovat všechny typy materiálů (křehké, hůře obrobitelné, pružné či sendvičové), zatímco úspěšnost mechanického rytí byla podmíněna charakteristikami opracovávaného materiálu.

Snad jedinou nevýhodou AWJ je nevyhnutelný kontakt s vodou a abrazivním materiálem (bez okamžitého vhodného ošetření má za následek rychlý nástup povrchové koroze. U nasákavých materiálů je zapotřebí další operace a to vysoušení¹⁹).



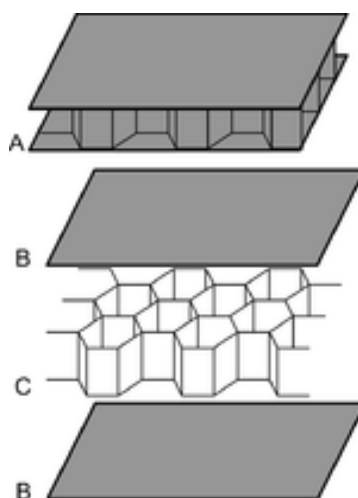
Obr. 2.15 Ukázka gravírování technologií AWJ¹⁹.

2.2.7 Řezání sendvičových materiálů

Sendvičový materiál je zvláštní druh materiálu skládající se z různých vrstev materiálů s různými vlastnostmi (viz obr. 2.16, 2.17). Z pravidla vnější části jsou tenké ale tuhé, zatímco vnitřní vrstva, tzv. distanční, je tlustší, z pravidla méně pevná hmota. Vodní paprsek je dokonalou technologií pro dělení tohoto materiálu. Dosahuje výborných výsledků díky bezsilovému účinku a díky studenému řezu vodního paprsku – nedochází k deformacím v měkčích vrstvách materiálu. Díky těmto vlastnostem je vodní paprsek také vhodný pro dělení materiálu jako je např. laminát, izolační materiály, kompozity, skelné vaty apod²⁰.



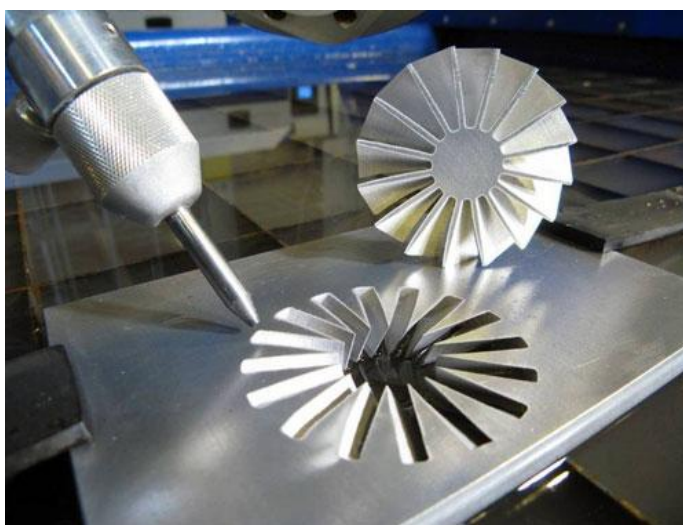
Obr. 2.16 Sendvič s jádrem z polystyrenové pěny²⁰.



Obr. 2.17 Schéma konstrukce sendviče s voštinovým jádrem²⁰.

2.2.8 3D obrábění

Rozhodně si technologie řezání vodním paprskem zaslouží svůj díl pozornosti i v oblasti prostorového 3D obrábění. Je tomu tak díky systému, který byl vyvinut již v 90. letech – tzv. 3D řezacím hlavám, což jsou přídatná zařízení montovaná na 2D CNC stoly. Používají se především ve strojírenství, kde je tak možno tvarově obrábět dílce ve třech osách včetně osy rotace C až 360° a osy rotace A až o $\pm 90^\circ$. Tento systém je vhodný nejen pro všechny 2D aplikace, ale zároveň i pro 3D výřezy z deskových i prostorových polotovarů. V poslední době se rozšiřuje pole působnosti AWJ technologie na 3D obrábění i v oblasti umění. Vše je již pouze otázkou fantazie a schopností uživatelů této technologie, do jaké míry budou schopni využít všech výhod a možností, které bezesporu nabízí¹⁸.



Obr. 2.18 Řezání pomocí 5osé řezací hlavy firmy WARDJet Psy²¹.

2.3 Výhody a nevýhody vodního paprsku

Výhody a nevýhody technologie čistého vodního paprsku a abrazivního vodního paprsku lze při porovnání s jinými nekonvenčními metodami, případně i standardními metodami obrábění shrnout následovně¹:

Výhody:

- vysoká energetická účinnost,
- relativně studený řez, který umožňuje řezat materiály citlivé na teplo (max. ohřev cca 40-50 °C),
- obrobené hrany nevykazují tepelnou ani mechanickou deformaci,
- v obrobené ploše nejsou zbytková napětí, ani mikrotrhliny,
- proces je bezprašný,
- malé ztráty materiálu v důsledku úzkého řezu,
- možnost řezání pod vodní hladinou,
- mimořádná spolehlivost a jednoduchost obsluhy,
- změnou tlaku lze v krátkých časových úsecích oplachovat, otryskávat, čistit nebo řezat,
- možnost řezání vlnitých materiálů např. střešní krytina,
- obrobky není potřeba upínat,
- šetrnost k životnímu prostředí, možnost recyklace odpadů,
- možnost CNC řízení,
- neporušení povrchové úpravy jako je např. leštěný povrch, komaxit atd.

Nevýhody:

- nevyhnutelný kontakt s vodou a abrazivním materiálem (bez okamžitého vhodného ošetření má za následek rychlý nástup povrchové koroze),
- u nasákavých materiálů je zapotřebí další operace, a to je vysoušení,
- omezena výroba malých dílců, je zapotřebí propojení pomocí můstků,
- při horším stupni kvality řezu u silnějších materiálů dochází k deformaci kontury řezu ve spodní hraně vlivem tzv. výběhu paprsku.

3 ÚBĚR MATERIÁLU

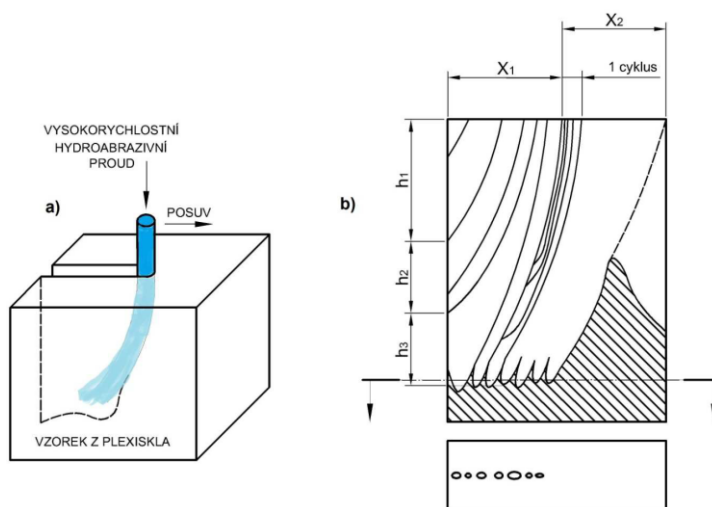
Ukazateli efektivity procesu při obrábění abrazivním vodním paprskem (ať už je to soustružení, vrtání nebo frézování) je úběr materiálu a topografie povrchu, které jsou ovlivňované⁷:

- posuvem paprsku,
- tlakem vody,
- vzdáleností mezi obrobkem a dýzou,
- prouděním a rozměrem otvoru dýzy,
- úhlem sklonu paprsku,
- druhem a velikostí abraziva.

3.1 Mechanismus makroskopického procesu

Mechanismus makroskopického procesu úběru je získaný z analýz povrchových struktur vzorků, které jsou vytvořené vysokorychlostním hydroabrazivním proudem.

Pro lepší vizualizaci makromechanismu byl v minulosti proveden řezný proces na vzorku plexiskla (viz obr. 3.1), na kterém lze dobře vidět průběh celého řezného procesu⁷.



Obr. 3.1 Vizualizace procesu dělení plexiskla⁷.

Ve vzdálenosti x_1 se dosáhne maximální hloubka řezu h . Se vzdáleností x_2 dělení postupuje cyklickým způsobem. V hloubce h_1 tzv. ustálený stav, kdy rychlost úběru materiálu je rovna rychlosti posuvu nástroje vysokorychlostního hydroabrazivního proudu. V této zóně dominuje řezné opotřebení materiálu⁷.

Pod hranicí h_1 vlivem nárazů nastává úběr materiálu postupnými kroky, dokud vysokorychlostní hydroabrazivní paprsek nedosáhne hloubky h_2 . Zároveň se pod hranicí h_1 postupnými kroky zaobluje a mění směr, což má za následek změnu úhlu dopadu částic. V první vstupní oblasti proud paprsku projde určitým úsekem, než dosáhne maximální hloubky, která se rovná součtu⁷:

$$h_{\max} = h_1 + h_2 + h_3 [\text{mm}] \quad (3.1)$$

Ploše odstraněné řezným opotřebením odpovídá hloubka h_1 , pokud je množství odstraněného materiálu rovno množství přemístěnému materiálu. Na hranici hloubky h_1 z důvodu vychylování hydroabrazivního proudu a částic zaniká mechanismus řezného opotřebením. Pod hranicí oblasti h_1 dochází už k deformačnímu úběru materiálu. Tento krok zaniká ihned po vytvoření nového kroku ve vzdálenosti x_1 . Proces pokračuje tak dlouho, dokud proud nepřestane odstraňovat materiál. Proud v oblasti h_3 se vychyluje ve zvyšujícím se směru nahoru, čímž způsobuje další pronikání jako následek zvýšené hodnoty hybnosti proudu. Při výstupu proudu z řezu vzniká zóna neodstraněného materiálu ve tvaru trojúhelníka, který dokazuje, že řezný proces je stabilní jen do určité hloubky h_1 , v případě neproříznutí materiálu se vytváří řez s nepravidelnou hloubkou následkem vychylování proudu a jeho nestability v dolní erozní zóně⁷.

3.2 Řezná rychlost

Rychlost proudění a tlak vodního paprsku mají vliv na úběr materiálu a řezný proces. Zvýšením tlaku vody se vyvolá vyšší rychlost proudění, což má za následek celkové zvýšení energie v dýze, čímž se vytvářejí předpoklady pro řezání hrubších materiálů. Zvýšení tlaku vody zároveň zlepšuje kvalitu řezných hran při řezání⁸.

Tlak kapaliny je určen Bernoulliho rovnicí pro proudění nestlačitelné kapaliny⁸:

$$v^2 = \frac{2p}{\rho} [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (3.2)$$

kde: v ... rychlost proudění kapaliny [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],
 p ... tlak kapaliny [MPa],
 ρ ... hustota kapaliny [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$].

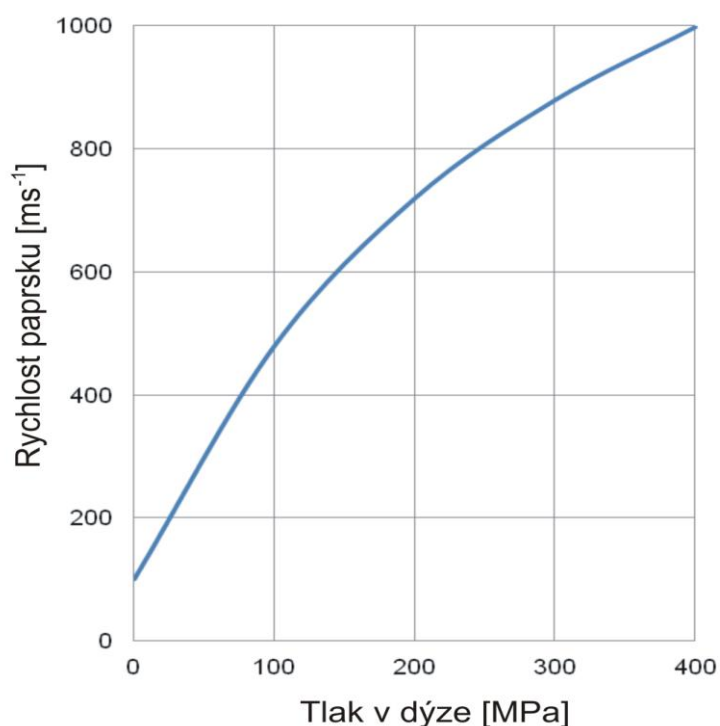
Níže uvedené tabulky (tab. 3.1, 3.2) udávají řeznou rychlost a pracovní tlak čistého vodního paprsku a abrazivního vodního paprsku při řezání různých druhů materiálů.

Tab. 3.1 Příklad řezných rychlostí vodního paprsku bez abraziva⁸.

Materiál	Síla [mm]	Řezná rychlost [mm·s ⁻¹]	Průměr dýzy [mm]	Pracovní tlak [MPa]
Azbestový obklad	18	1 520	0,20	190
Gumová dlaždice	3	150	0,13	380
Sklo	300	420	0,15	350
Polypropylen	2	60	0,10	380
Polyester	12	600	0,15	380
Polyvinylchlorid	0,75	300	0,10	380
Uhlíkový kompozit	1,6	10	0,15	380
Sklolaminát	1,7	40	0,20	385

Tab. 3.2 Příklad řezných rychlostí abrazivního vodního paprsku⁸.

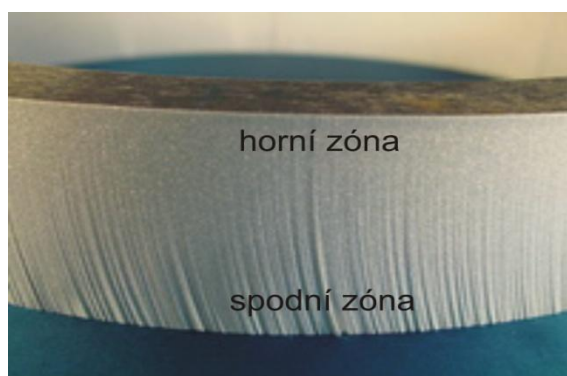
Materiál	Síla [mm]	Řezná rychlost [mm·s ⁻¹]
Měkká ocel	1,6	0,5
	13	0,1
	50	0,038
	180	0,01
Korozivzdorná ocel	5	0,4
	13	0,15
	25	0,076
Hliník	1,6	1,3
	6	0,5
	25	0,13
	100	0,025
Titan	3	0,5
	6	0,4
	12	0,1
Sklo	13	1,3
	19	0,6
	25	0,13
Mramor	50	0,4
Beton	250	0,025



Graf 3.1 Závislost rychlosti paprsku na tlaku vody v dýze pro čistý vodní paprsek⁸.

3.3 Fenomén rýh

Fenomén rýh je charakteristickým znakem obrobených ploch, které jsou vytvořené dělením proudovými technologiemi, jako je laser, plasma, vodní paprsek. Obecně se povrch řezu vyprodukovaný vysokorychlostním hydroabrazivním paprskem skládá z horní hladké zóny (horní erozní zóna), na které se rýhy nevyskytují a základem povrchové nerovnosti je drsnost povrchu. Ve spodní drsné zóně jsou dominantním znakem zvlněné rýhy. Mezi horní a dolní zónou je přechodová zóna, ve které se začínají objevovat náznaky rýh (viz obr. 3.3). Na základě vykonaných experimentů se předpokládá, že tvorba rýh je způsobena vlnitou distribucí kinetické energie abrazivních částic vztažených k obráběnému povrchu⁷.



Obr. 3.2 Příklad řezu a rýh²².

Vhodný povrch je možné dosáhnout, když je tloušťka obrobku menší než hloubka horní erozní zóny⁷. Dále záleží na materiálu obrobku, druhu abraziva, charakteru paprsku a posuvu.

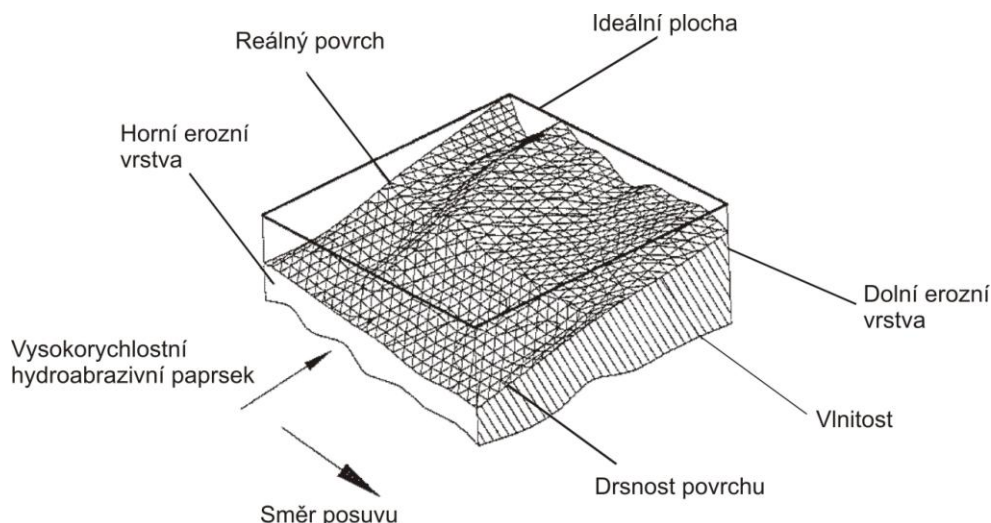
3.4 Struktura povrchu

Na povrchu součástí vznikají nerovnosti, které zde zanechává jakákoliv technologická metoda. Na obrobeném povrchu jsou tyto nerovnosti stopami, které zanechává řezný nástroj, brusivo apod (viz obr. 3.3).

Pro posuzování nerovností povrchu součástí jsou důležité dva pojmy²³:

Nedokonalost povrchu - jsou to např. rýhy, trhliny, póry, stažení, koroze, mikrotrhliny atd., které jsou náhodně způsobené během výroby, skladování a jiných činností.

Struktura povrchu - jsou opakované nebo náhodné úchyly od geometrického povrchu, které tvoří trojrozměrnou topografii povrchu. Složka s nejmenší roztečí nerovností je drsnost povrchu, další složka je vlnitost povrchu a složka s největší roztečí nerovností je určena základním profilem. Pro účely měření a vyhodnocování struktury povrchu byla zvolena profilová metoda hodnocení, kdy profil povrchu vzniká jako průsečnice nerovností skutečného povrchu s rovinou vedenou kolmo k tomuto povrchu. Profil povrchu je základním zdrojem informací pro posuzování struktury povrchu.



Obr. 3.3 Model povrchu vytvořeného vysokorychlostním hydroabrazivním paprskem⁷.

Pro současnou praxi je rozhodující technicky známý a výrobou ověřený parametr drsnosti R_a . Je to parametr profilu povrchu ve směru výšky.

Průměrná aritmetická úchylna posuzovaného profilu R_a je aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky l_r .²³

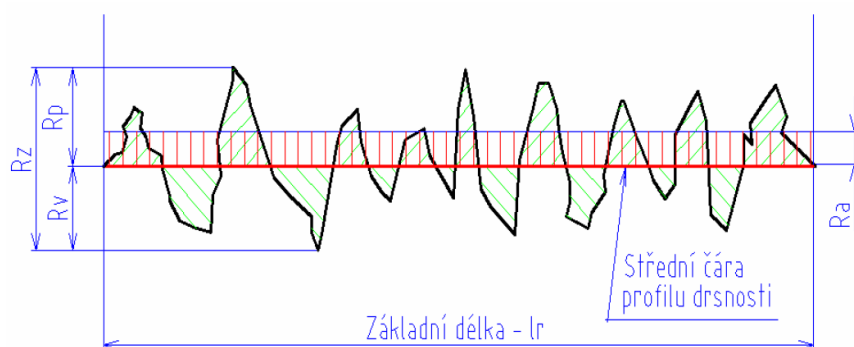
Definici lze vyjádřit rovnicí²³:

$$Ra = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad (3.3)$$

kde:

$Z(x)$... hodnota pořadnice – výška posuzovaného profilu v libovolné poloze x ,

l_r ... základní délka, ve směru osy x použitá pro rozlišení nerovnosti charakterizující vyhodnocovaný profil (drsnost, vlnitost nebo základní profil).



Obr. 3.4 Profil drsnosti povrchu²⁴.

Kde:

Ra ... průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu,

Rp ... výška výstupku,

Rz ... největší výška profilu Rz (součet výšky nejvyššího výstupku profilu a hloubky nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky) $Rz = R_{p_{\max}} + R_{v_{\max}}$,

Rv ... hloubka prohlubně.

3.5 Chyby při dělení vodním paprskem

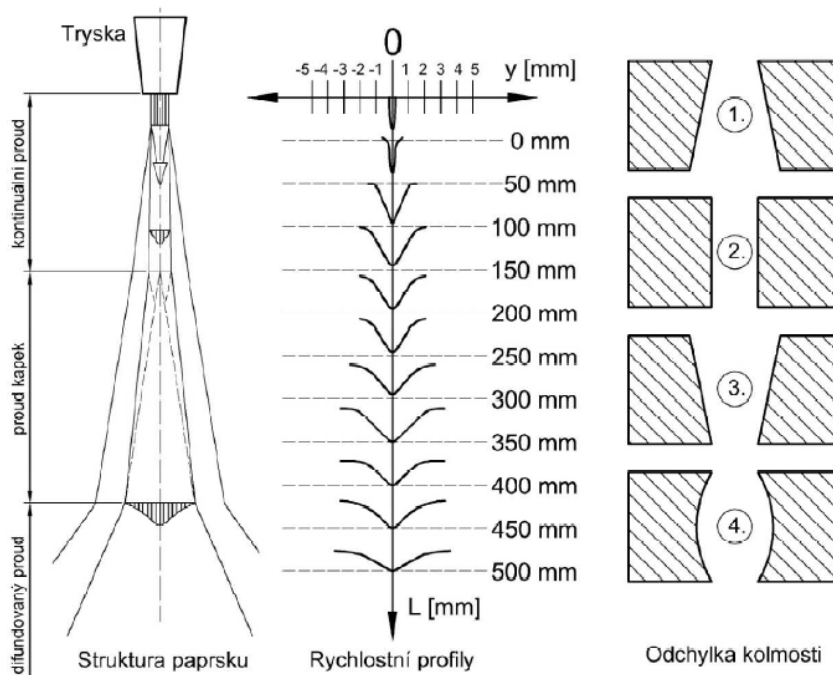
Odchylka proudu od kolmého směru negativně ovlivňuje geometrii řezaných částí, především při tvarovém dělení materiálu. Po výstupu z dýzy, dochází k prudkému uvolnění nahromaděné energie do okolního prostředí. Původně soudržný proud se s narůstající vzdáleností od ústí dýzy čím dál víc rozpadá. Úbytek soudržnosti se projevuje narůstající šířkou proudu a poklesem eroze (úběru materiálu) a výkonu v dolní části paprsku v důsledku postupné ztráty kinetické energie a odporu děleného materiálu. Obrysový tvar vyřezaného dílu je výsledkem práce nástroje – proudu. Nástroj přirozeně kopíruje svůj postupně se rozšiřující tvar do řezaného materiálu. Charakteristika řezné mezery určuje, při jejím hodnocení, dosaženou kvalitu řezu⁷.

3.5.1 Odchylka kolmosti

Odchylka kolmosti je zúžení stěn obrobených ploch při technologii dělení vodním paprskem. Tato metoda dělení materiálu eroduje materiál, což způsobuje vznik odchylky vzhledem k různým časům působení proudu na plochu obrobku.

Základní typy odchylek kolmosti⁷ (viz. obr. 3.5):

- obrácená (reverzní) odchylka kolmosti – velmi pomalý řez nebo řez v měkkém materiálu – paprsek stihne „probrousit“ svou přirozenou kuželovitou stopu,
- optimální rovnováha mezi rychlostí řezu, odolností a tloušťkou materiálů – paprsek je udržen po celou dobu průchodu materiálem ve válcovitém tvaru a úkos nevzniká,
- odchylka ve tvaru V – velmi rychlý řez nebo řez v odolnějším materiálu – paprsek nestihne „probrousit“ materiál ani ve svém vstupním průměru a řez se směrem dolů uzavírá. Vznik a rozsah úkosu ovlivňuje i tvar řezu, množství abraziva atd.,
- soudková odchylka kolmosti – střed řezu je širší než v horní a dolní erozní bázi. Vzniká při obrábění velmi hrubých obrobků.



Obr. 3.5 Struktura vodního paprsku a geometrie řezné mezery⁷.

Druh a velikost odchylky kolmosti je ovlivňován tloušťkou materiálu, jeho tvrdostí a obrobitelností. Je hodně způsobů jak minimalizovat odchylku kolmosti. Jsou to např. použití kvalitnějšího abraziva, menšího průměru vodní dýzy, nakloněné řezací hlavy, menšího zdvihu a snížení rychlosti posuvu atd.

Odchylka kolmosti patří mezi základní makrogeometrické znaky obrobeného povrchu technologií vysokorychlostního hydroabrazivního proudu. Velikost odchylky předurčuje nutnost dalšího opracování obrobeného povrchu a tím i celkové využití materiálu vzhledem k tomu, že určuje velikost přídavku na případné další obrábění. Přidávání dalších operací na dokončení součásti má za následek prodlužování výrobního času a prodražování celého výrobního procesu. Proto je důležité klást velký důraz na eliminaci odchylky kolmosti⁷.

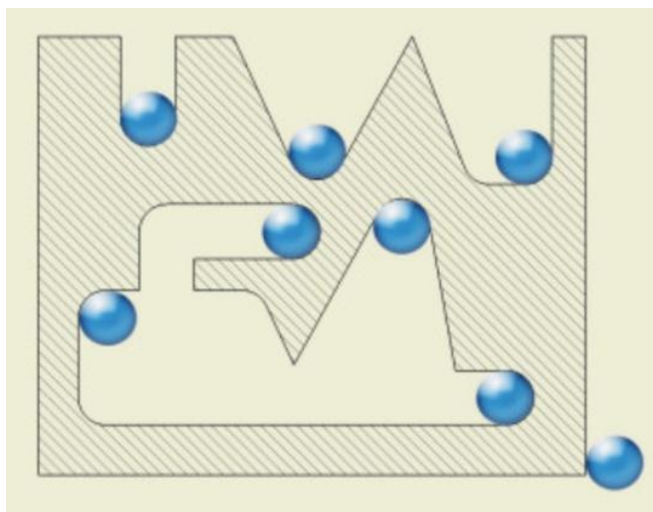
3.6 Geometrie a tvarové řezání

Přesnost a kvalita řezání vodní paprskem má značné možnosti využití a při zpracování speciálních slitin a jiných materiálů má zvláštní výhody proti CNC obráběcím strojům. Zvláště obtížně se dají tradičními metodami zpracovávat tenké, pružné nebo citlivé materiály, jakými jsou pryž, plasty či dokonce papír. Řezání vodním paprskem nabízí v těchto případech řadu výhod⁹.

Lze řezat veškeré složité tvary, které jsou navrhnuté v elektronické podobě např. v CAD formátu (*.dwg - formát), a které respektují kruhový průřez paprsku⁹:

- „čistý“ vodní paprsek má průměr 0,15 až 0,30 mm,
- hydroabrazivní paprsek má průměr 0,8 až 1,5 mm.

Velikost průměru kruhového paprsku omezuje řezání ostrých vnitřních tvarů (viz. obr. 3.6).



Obr. 3.6 Tvarová omezení řezu v ostrých vnitřních úhlech vlivem kruhového průřezu paprsku²².

3.7 Stupně kvality řezu

Kvalita a efektivnost řezu je ovlivněna tlakem vody, posuvovou rychlostí, výtokovou rychlostí paprsku, druhem brusiva, úhlem dopadu paprsku, vzdáleností trysky od povrchu obrobku atd. Zvýšením tlaku vody v čerpadle se zvýší rychlost proudění vody, což má za následek zvýšení celkové kinetické energie. Díky ní se potom dají dělit hrubší materiály a zároveň se zlepšuje kvalita řezné hrany⁸. Tabulka 3.3 a obr. 3.7 znázorňují stupně kvality řezných ploch.

Tab. 3.3 Stupně kvality řezných ploch²².

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

Pozn.: Hodnoty v tabulce jsou jen orientační, mohou se lišit dle typu děleného materiálu.



Obr. 3.7 Stupně kvality řezu²⁵.

4 ABRAZIVO

Abrazivní materiál se používá při řezání abrazivním vodním paprskem. Abrazivo je přiváděno do řezné hlavy, kde je ve směšovací komoře strháváno proudem vody.

Proud vody předává abrazivu potřebnou energii k narušení a řezání materiálu. Proud vody zde slouží jako nosič abraziva.

Zvolení správného abrazivního materiálu pro technologii AWJ je velice důležité, protože se podílí velkou mírou na kvalitě a efektivnosti řezu. Cena a spotřeba abrazivního materiálu značně ovlivňuje provozní náklady a výslednou cenu řezného procesu, která je důležitá pro konečného zákazníka.

Abrazivní materiál je vhodný pro všechny aplikace řezání, jako jsou²⁶:

- uhlíkové oceli,
- mědi,
- žuly,
- hliníku,
- gumy,
- skla,
- korozivzdorné oceli,
- mramoru,
- dřeva a dalších materiálů.

4.1 Vlastnosti abraziva⁷

- Tvrdost abraziva – tvrdší abrazivní částice mají větší účinnost při dělení materiálu, ale při jejich použití dochází k většímu opotřebení dílů,
- velikost abrazivních zrn – jsou na trh dodávány v různých velikostech. Při volbě jemnějšího zrna se dosahuje kvalitnějšího povrchu, ale prodlouží se čas operace (úběr materiálu není tak efektivní). Jednotka udávající velikost zrna se nazývá MESH, což označuje počet ok síta na délce jednoho palce,
- tvar abrazivních zrn – každý druh abrazivního materiálu se vyznačuje určitou kruhovitostí nebo kulatostí. Použitím kulatějšího abraziva docílíme menší drsnosti povrchu, ale také menší hloubky řezu,
- hmotnostní tok abrazivních částic – při zvyšujícím se hmotnostním toku se hloubka řezu zvětšuje, ale při překročení kritického hmotnostního toku abrazivních částic hloubka řezu klesá.

4.2 Druhy abraziva

Jako abrazivní materiál lze použít²⁶:

- granátový písek,
- olivinický písek,
- křemičitý písek,
- oxid hlinitý, korund,
- minerální písek.

Granátový písek je zdaleka nejvíce používané abrazivo u technologie AWJ. Uživatelé považují granátový písek za nejlepší abrazivo pokud jde o cenu, řeznou rychlost, životnost směšovací trubice a zdravotní riziko.

Chemické složení – Granát GMA:

- | | |
|---|-------|
| - oxid křemičitý (SiO_2) | 36 %, |
| - oxid železnatý (FeO) | 30 %, |
| - oxid hlinitý (Al_2O_3) | 20 %, |
| - oxid hořečnatý (MgO) | 6 %, |
| - oxid železitý (Fe_2O_3) | 2 %, |
| - oxid manganatý (MnO) | 1 %, |
| - oxid vápenatý (CaO) | 1 %. |

Minerální složení – granát GMA:

- | | |
|---------------------------------|----------|
| - granát | 97-98 %, |
| - ilmenit | 1-2 %, |
| - zirkon | <0,2 %, |
| - křemen (volný oxid křemičitý) | <0,5 %, |
| - ostatní | <0,25 %. |

Abrazivní materiál je dodáván na trh v 25kg papírových pytlích, nebo v 1 až 2 tunovém big bagu.

5 VÝROBNÍ MOŽNOSTI FIRMY ARENIA S.R.O.

Praktická část této studie vychází z problematiky firmy Arenia s.r.o., která ke své hlavní výrobní činnosti využívá technologii vodního paprsku. Firma tuto technologii nemá ve svém inventáři, proto se musí spoléhat na kooperaci u jiných firem.

5.1 Historie firmy

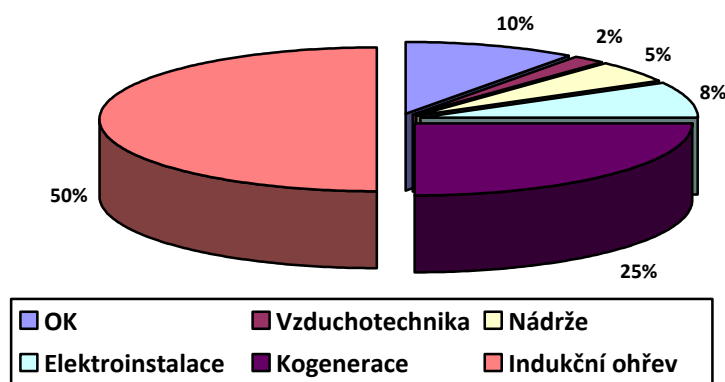
Firma Arenia funguje na českém trhu od roku 2006. Během své existence prošla významným vývojem. Na začátku se Arenia zabývala jen potrubářskou, zámečnickou a svařovací činností na stavbách, odstávkách nebo jako nájemná pracovní síla. Díky širokému záběru pracovní činnosti prošla spoluprací s několika předními zpracovateli kovů, jak v České republice, tak i v zahraničí. Po vytvoření široké zákaznické klientely se výroba rozšířila o vlastní výrobní prostory, kde pokračuje v nastolených činnostech.

Díky tomuto prostoru byly výrobní možnosti firmy rozšířeny o nové činnosti, obrábění a povrchovou úpravu kovů.

5.2 Současný stav ve firmě

Současnou náplní firmy je vyrábění různých konstrukcí a svařenců, jak v kusové, tak i v sériové výrobě (svařování OK konstrukcí, nádrže, vzduchotechnika, závěsy pro elektroinstalaci, základní rámy pro kogenerační jednotky, atd. – viz graf 5.1).

Hlavní činností, kterou se firma ubírá, je výroba konstrukcí a dílů pro indukční ohřev materiálu.



Graf 5.1 Poměrové rozdělení výroby.

5.3 Strojní vybavení firmy

Pásová pila na kov – BOMAR ERGONOMIC 320.250 (obr. 5.1)

- Hmotnost stroje	398 kg
- Délka stroje	1 669 mm
- Šířka stroje	1 137 mm
- Výška stroje	1 242 mm
- Napájecí napětí	~ 3×400 V, 50 Hz
- Celkový příkon	2,0 kW
- Předřadné jištění	6 A
- Výkon	1,1/1,5 kW
- Jmenovité otáčky	2 800/1 420 min ⁻¹
- Řezná rychlost	40/80 m·min ⁻¹



Obr. 5.1 Pásová pila Bomar²⁸.

Stojanová fréza FGS 32/40 (obr. 5.2)

- Výrobce	Tos
- Rok výroby	1991
- Délka pracovní plochy stolu	1 400 mm
- Šířka pracovní plochy stolu	400 mm
- Upínací plocha stolu	400×1 400 mm
- Upínací kužel vřetena	ISO 50
- Výkon hl. elektromotoru	11 kW
- Rozměry d x š x v	3 715×3 310×2 685 mm
- Celková hmotnost	400 kg

Obr. 5.2 Stojanová fréza²⁹.Radiální vrtačka VR4 (obr. 5.3)

- Největší Ø vrtání
 - ✓ v oceli pevnosti 588 MPa 40 mm
 - ✓ v šedé litině pevnosti 245 MPa 50 mm
- Největší závit
 - ✓ v oceli pevnosti 588 MPa M24
 - ✓ šedé litině pevnosti 245 MPa M36
- Vzdálenost konce vřetena od základny 270-1 290 mm
- Vzdálenost konce vřetena od stolu 0-750 mm
- Svislé přestavení ramena 710 mm
- Vodorovné přestavení vřeteníku po ramenu 945 mm
- Otočení ramena okolo sloupu 0-360°
- Průměr vřetena 35 mm
- Kužel ve vřetenu Morse 4
- Elektromotor vřeteníku 3 kW
- Rozměry stroje d x š x v 2 290×910×2 860 mm
- Celková hmotnost 2 800 kg

Obr. 5.3 Radiální vrtačka VR4³⁰.Hrotový soustruh SV18 (obr. 5.4)

- | | |
|------------------------------|----------------------------|
| - Oběžný průměr nad ložem | 380 mm |
| - Oběžný průměr nad suportem | 215 mm |
| - Vzdálenost hrotů | 750 – 1 000 – 1 250 mm |
| - Vrtání vřetena | 41 mm |
| - Kužel ve vřetenu metrický | 50 |
| - Kužel hrotu Morse | 4 |
| - Průměr upínací desky | 320 mm |
| - Průměr sklíčidla | 160, 200, 250 mm |
| - Max. hmotnost obrobku | 300 kg |
| - Otáčky vřetena | |
| ✓ počet stupňů | 21 |
| ✓ rozsah | 14-2 800 min ⁻¹ |
| - Rozměry stroje: š x d | 950×2 520 mm |
| - Hmotnost stroje | 1 730 kg |

Obr. 5.4 Hrotový soustruh SV18³¹.

Tabulové nůžky hydraulické – CNTA 3150/10A (obr. 5.5)

- | | |
|-----------------------------|----------------------|
| - Max. tloušťka plechu | 10 mm |
| - Min. tloušťka plechu | 1,0 mm |
| - Max. délka plechu | 3 150 mm |
| - Vyložení ve stojanech | 350 mm |
| - Úhel stříhu | 0,5 - 2,5 |
| - Přestavení zadního dorazu | 10 – 1 000 mm |
| - Instalovaný příkon | 33 kVA |
| - Rozměry d x š x v | 4 220×2 550×2 225 mm |
| - Hmotnost | 11 500 kg |

Obr. 5.5 Tabulové nůžky CNTA 3150/10A³².

6 ROZBOR TECHNOLOGIČNOSTI KONSTRUKCE RÁMU

V této části je proveden rozbor konstrukce rámu, který je hlavní náplní výroby firmy. Výroba rámu skříně se dá považovat za malosériovou výrobu, která se pohybuje v počtech cca 100 ks ročně. Výroba svojí pracností a náročností zabírá značnou část výrobních kapacit firmy, jak materiálově tak i v samotné výrobě.

Rám se skládá z několika částí (viz obr. 6.1):

- základní dolní rám,
- horní levá a pravá část rámu,
- ochranná trubka cívky,
- a další drobné díly.



Obr. 6.1 Rám skříně a ochranná trubka cívky.

Každou součást konstrukce rámu je nutno před zahájením výroby posoudit ze všech hledisek ovlivňujících jeho užitnou hodnotu. Je to především hospodárnost výroby, nejefektivnější vyrobiteľnosť součásti, produktivita výroby, dodržení rozměrové přesnosti včetně dodržení předepsaných úchylek tvarů, jakost materiálu, atd.

6.1 Technologičnost konstrukce

Technologičnost součástí konstrukce rámu ovlivňuje zejména:

- tvar a rozměr součásti,
- rozměrová přesnost,
- přesnost úchylek tvarů a polohy,
- drsnost obroběných ploch,
- druh a jakost použitého materiálu,
- působení tepelného ovlivnění při výrobě,
- použití výrobních strojů a nástrojů,
- samotná práce pracovníka.

6.1.1 Dodržení výrobních úchylek rozměrů a jakosti povrchu

Všechny rozměry uvedené na výkresu součásti jsou tolerovány. Ať už přímo u daného rozměru příslušnou značkou nebo přímo dovolenou úchytkou. Nebo jsou rozměry tzv. volné, které spadají do všeobecných tolerancí. Čím jsou tolerance přesnější, tím je výroba náročnější a dražší. V našem případě se přesnost řídí dle ISO 2768-mK .

6.2 Druh použitého materiálu

Druh použitého materiálu byl vybrán dle výkresové dokumentace a požadavků zákazníka. Pro výrobu rámu skříně byl zvolen následující materiál:

Ocel 11 375

Tato ocel je použita pro výrobu základní kostry rámu z U-profilu, na kterou se po zavaření a pískování navažují čelní desky z nerezového plechu (mat. 1.4301).

Tab. 6.1 Chemické složení oceli 11 375.

Množství (v %)		
C	P	S
≤ 0,2	≤ 0,050	≤ 0,50

Neušlechtilá konstrukční ocel obvyklé jakosti vhodná ke svařování. Součásti konstrukcí a strojů středních tloušťek tavně svařené, namáhané staticky a dynamicky.

Ocel 17 240 (W.-Nr. 1.4301)

Z nerezového plechu jsou vodním paprskem vyřezány čelní desky rámu a čelní desky ochranné trubky, rozvin trubky je stříhán na tabulových nůžkách.

Tab. 6.2 Chemické složení oceli 1.4301.

Množství v %							
C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Ni
≤ 0,07	≤ 1,00	≤ 2,00	≤ 0,045	≤ 0,03	≤ 0,11	17,00- 9,50	8,00-10,5

Austenitická, chromniklová korozivzdorná ocel. Tato ocel je schválena pro teplotní namáhání do 300 °C. Je vhodná ke svařování všemi obvyklými způsoby, leštitelná a obzvlášť dobře tvárná hlubokým tažením, ohraňováním, zakružováním, atd. Díky své odolnosti vůči vodě, vodní páře a jedlým kyselinám má široké využití např. v potravinářském průmyslu, farmaceutickém průmyslu, chemickém průmyslu a ve stavitelství.

6.3 Návrh polotovaru pro vodní paprsek

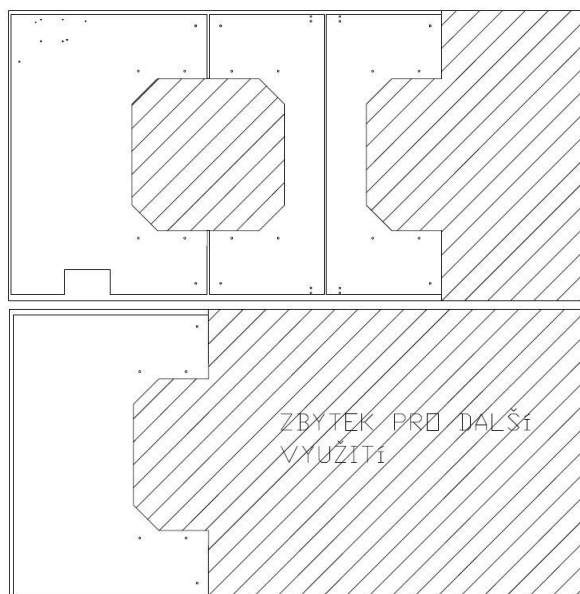
Při návrhu polotovaru je počítáno s výrobou jednoho kusu rámu skříně. Dle výkresové dokumentace je požadován na výrobu čelních desek rámu skříně nerezový materiál 1.4301 o tloušťce plechu 10 mm, a na výrobu čelních desek ochranné trubky plech o tloušťce 8 mm.

6.3.1 Polotovar čelních desek rámu skříně

Rozměry:

Horní deska pravá a levá: 1 210×845 mm = 2 ks

Dolní deska pravá a levá: 1 210×499 mm = 2 ks

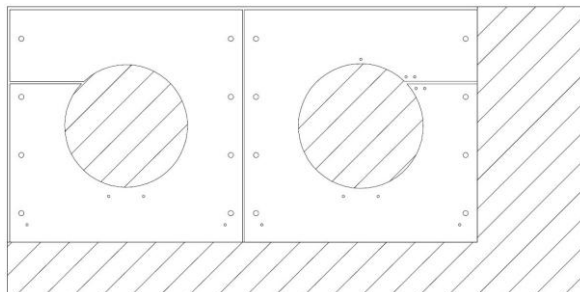


Obr. 6.2 Rozmístění čelních desek rámu na plech 1 a 2.

Dle výkresové dokumentace a možností rozmístění dílů byl pro výrobu zvolen střední formát plechu o velikosti 1 250×2 500 mm a tloušťce 10 mm. Vyšrafovaná část plechu na obr. 6.2 je zbytek, který je možno použít pro další obdobnou výrobu.

6.3.2 Polotovar čelních desek ochranné trubky

Rozměry: 800×800 mm = 2 ks



Obr. 6.3 Rozmístění čelních desek trubky.

Dle výkresové dokumentace a možností rozmístění dílů byl pro výrobu zvolen malý formát plechu o velikosti 1 000×2 000 mm a tloušťce 8 mm. Vyšrafovaná část plechu na obr. 6.3 je zbytek, který je opět možno použít pro další obdobnou výrobu.

6.3.3 Využitelnost materiálu

Pro výpočet využitelnosti daného materiálu pro výrobu čelních desek rámu skříně a čelních desek ochranné trubky je vycházeno ze vztahu:

$$K_m = \frac{m_k}{m} \cdot 100 \quad (6.1)$$

kde:

K_m ... využitelnost materiálu [%],

m_h ... hmotnost vyrobených součástí [kg],

m ... hmotnost polotovarů [kg].

Využitelnost materiálu čelních desek rámu skříně

Hmotnost 1 tabule plechu: 10×1 250×2 500 mm je 250 kg

Hmotnost horní čelní desky rámu: 10×1 210×845 mm je 68,8 kg

Hmotnost dolní čelní desky rámu: 10×1 210× 499 mm je 35,5 kg

Výpočet využitelnosti materiálu pro výrobu jednoho rámu skříně

$$K_{m_{tab1}} = \frac{m_h}{m} \cdot 100$$

$$K_{m_{tab1}} = \frac{68,8 + (2 \cdot 35,5)}{250} \cdot 100 = \underline{\underline{56\%}}, \text{ (zbytek } 647 \times 1\,250 \text{ mm)}$$

$$K_{m_{tab2}} = \frac{m_h}{m} \cdot 100$$

$$K_{m_{tab2}} = \frac{68,8}{250} \cdot 100 = \underline{\underline{27,5\%}}, \text{ (zbytek 1 655} \times \text{1 250 mm)}$$

Využitelnost materiálu dle výpočtů na tabuli č. 1 je 56 % a na tabuli č. 2 je 27,5 %. Vzhledem k velké četnosti podobné výroby bude zbytkový materiál využit pro obdobné výrobky a bude z větší části zpracován.

Využitelnost materiálu čelních desek ochranné trubky

Hmotnost 1 tabule plechu: 8×1 000×2 000 mm je 128 kg

Hmotnost čelní desky trubky: 8×800×800 mm je 32,1 kg

Výpočet využitelnosti materiálu pro výrobu čelních desek trubky

$$K_m = \frac{m_h}{m} \cdot 100$$

$$K_m = \frac{(2 \cdot 32,1)}{128} \cdot 100 = \underline{\underline{50,1\%}}, \text{ (zbytek je 49,9 \%)}$$

Využitelnost materiálu pro výrobu čelních desek trubky je 50,1 %. Zbytky vzniklé při výrobě tvoří 49,9 %, ale pro další výrobu mají špatný výchozí tvar, který ovlivňuje jejich uplatnění v dalším výrobním procesu. Proto se musí zbytkový materiál částečně započíst do nabízené ceny výrobku.

7 KOOPERACE VÝROBY

Pro výrobu plošných nerezových dílů z plechu o různých tloušťkách, používá firma Arenia technologii vodního paprsku, kterou jak již bylo zmíněno, nemá firma ve svém strojovém parku. Proto je zapotřebí tuto činnost kooperovat u jiných firem. Upřednostňují se firmy, se kterými má Arenia dlouhodobý pracovní vztah, a o kterých je přesvědčena, že s nimi bude bezproblémový průběh při provádění požadované zakázky. Výběrové řízení probíhá rozesláním poptávek daným firmám. Poptávka obsahuje potřebnou výkresovou dokumentaci, seznam o počtu kusů, termín dodání, atd.

Podle cenových nabídek a možných termínů dodání, které jsou obdrženy od poptávaných firem, dojde k vybrání správné firmy pro danou výrobu.

Poptávka s informacemi potřebnými pro vypracování požadované nabídky byla rozeslána mezi následující firmy:

Gelso s.r.o.

Parametry pracoviště pro dělení materiálu vodním paprskem:

- pracovní plocha - 3 000×2 000 mm,
- tloušťka děleného materiálu - 0,5-220,0 mm.

Cena za výrobu čelních desek rámu skříně:

- nerezový materiál - 1.4301,
- tloušťka materiálu - 10 mm,
- délka řezu - 17 352 mm,
- cena řezu - 4 850 Kč + DPH,
- čas řezu - 120,8 min.

Cena za výrobu čelních desek ochranné trubky:

- nerezový materiál - 1.4301,
- tloušťka materiálu - 8 mm,
- délka řezu - 10 060 mm,
- cena řezu - 2 780 Kč + DPH,
- čas řezu - 82,4 min.

AWAC spol. s r.o.

Parametry pracoviště pro dělení materiálu vodním paprskem:

- šířka řezu 0,1-0,3 mm pro vodní paprsek a 1,0-2,0 mm pro abrazivní paprsek,
- přesnost řezu $\pm 0,1$ mm,
- velikosti stolů 2,5 m×6 m, 1 m×2 m,
- tloušťka děleného materiálu 0,5-220,0 mm.

Cena za výrobu čelních desek rámu skříně:

- nerezový materiál 1.4301,
- tloušťka materiálu 10 mm,
- délka řezu - 17 352 mm,
- cena řezu - 5 320 Kč + DPH,
- čas řezu - 120,8 min.

Cena za výrobu čelních desek ochranné trubky:

- nerezový materiál - 1.4301,
- tloušťka materiálu - 8 mm,
- délka řezu - 10 060 mm,
- cena řezu - 1 980 Kč + DPH,
- čas řezu - 82,4 min.

Růžička Trade s.r.o.

Parametry pracoviště pro dělení materiálu vodním paprskem:

- 3D zařízení - naklápěcí hlava,
- pracovní plocha - 3 000×2 000 mm,
- tloušťka děleného materiálu pro 2D do 300 mm, 3D do 200 mm.

Cena za výrobu čelních desek rámu skříně:

- nerezový materiál - 1.4301,
- tloušťka materiálu - 10 mm,
- délka řezu - 17 352 mm,
- cena řezu - 4 527 Kč + DPH,
- čas řezu - 120,8 min.

Cena za výrobu čelních desek ochranné trubky:

- nerezový materiál - 1.4301,
- tloušťka materiálu - 8 mm,
- délka řezu - 10 060 mm,
- cena řezu - 2 437 Kč + DPH,
- čas řezu - 82,4 min.

Vzhledem k velmi dobré a dlouhodobé spolupráci, brzkému termínu dodání a k relativně dobré ceně byla vybrána firma Růžička Trade s. r. o.

8 ÚVAHA O POŘÍZENÍ VLASTNÍ TECHNOLOGIE

Z důvodů vysoké četnosti kooperace vodním paprskem, zvažuje firma Arenia pořízení vlastního zařízení pro dělení materiálu vodním paprskem a abrazivním vodním paprskem. Proto byli osloveni přední prodejci a výrobci této technologie jakými jsou firmy Flow, AWAC a PTV, aby vypracovali nabídky na své zařízení vodního paprsku.

8.1 Flow Eastern Europe, s.r.o.

Model řady MACH3-B

Je všestranným systémem pro řezání vodním paprskem, který používá řízení všech ovládacích prvků pomocí výkonného a inteligentního řídicího programu FlowMaster, který pracuje na bázi OS Windows™. Kromě významné úspory místa nabízí jednoduchou obsluhu, údržbu, možnost diagnostiky a další přednosti. Systémy řady Mach 3 jsou navrženy na základě prověřených konstrukčních nástrojů pro snadnou obsluhu a odolnost.

Osy X, Y a Z jsou poháněny servopohony. Do rámu stroje řady MACH3B (viz obr. 8.1) je umístěno ultra-vysokotlaké čerpadlo Flow, které je snadno přístupné a může být jednoduše vysunuto z rámu pro snadnou údržbu. Tento pokročilý systém je speciálně navržen pro technologie řezání vodním a abrazivním vodním paprskem³³.



Obr. 8.1 Zařízení MACH3B od firmy Flow³³.

Parametry zařízení³³:

- rozměr pracovní plochy zařízení je 4 000×2 000 mm,
- technologie Dynamic Waterjet – vyrábí 2D díly s precizními tolerancemi při vysokých rychlostech,
- FlowMaster – 1× licence Pc – řízení FlowMaster pracuje pod OS Windows,
- Flow abrazivní řezací systém PASER – obsahuje řezací hlavu Flow cutting head PASER s ovládacím ventilem (On/Off Valves), směšovací trubicí, rubínovou vodní dýzou, diamantovou vodní dýzou a systémem pro dodávku abraziva,
- vysokotlaké čerpadlo Flow-HyPlex Hybrid30d – 4 100 bar (3,1 l.min⁻¹),
- záchytná vana Standart – konstrukce z korozi-vzdorné oceli, snadno vyměnitelné lamely z korozi-vzdorné oceli nesoucí obrobky,
- dokumentace – návod k obsluze pro stroj a příslušenství,
- instalace a uvedení zařízení do provozu – ukázka prostřednictvím servisního technika,
- analýza kvality přívodní vody v certifikované laboratoři,
- školení – pro dvě osoby – 3 dny software a 2 dny čerpadlo,
- záruka 24 měsíců.

Konečná cena kompletní dodávky zařízení bez DPH: **4 992 500 Kč.**

8.2 AWAC spol. s r.o.

Cenová nabídka CNC stroje (portál) s technologií vysokotlakého vodního paprsku zahrnuje následující komponenty a služby.

Řezací stůl AW-CT 4020 TKL¹⁶

- pracovní plocha 4 050×2 050 mm (viz obr. 8.2), včetně řídicího systému, s lapačem zbytkové energie vodního paprsku s přípravou na instalaci systému odsávání kalů do big-bagu,
- vysokotlaké čerpadlo AccuStream AS 6050 s příkonem 37 kW a maximálním pracovním tlakem do 4 140 Bar včetně příslušenství (chladiče hydraulického oleje, vysokotlakých rozvodů),
- software WRYKRYs pro technologickou přípravu řezných programů,
- dálková diagnostika stroje pomocí TeamViewer,
- jedna řezací hlava AccuStream DiaLine pro řezání čistou vodou i pro abrazivní řezání s diamantovou vodní tryskou,
- dávkovač abraziva s elektronickou regulací abraziva 0-500 g.min⁻¹,

- systém dálkové dopravy abraziva s násypkou o objemu 200 kg,
- elektrorozvaděč pro stroj s centrálním STOP tlačítkem,
- výchozí elektorevize,
- doprava stroje a techniků do Třebíče, montáž stroje; zaškolení obsluhy a předání stroje zákazníkovi.

Konečná cena kompletní dodávky zařízení bez DPH: **2 943 000,- Kč.**



Obr. 8.2 Řezací stůl AW-CT 4020 TKL¹⁶.

Cenová nabídka CNC stroje (konstrukce výsuvného ramene) s technologií vysokotlakého vodního paprsku zahrnuje následující komponenty a služby.

Řezací stůl AW-CT 2040 TKX¹⁶

- pracovní plocha 2 050×4 050 mm (viz obr. 8.3), včetně řídicího systému, s lapačem zbytkové energie vodního paprsku s přípravou na instalaci systému odsávání kalů do big-bagu,
- vysokotlaké čerpadlo AccuStream AS 6050 s příkonem 37 kW a maximálním pracovním tlakem do 4 140 Bar včetně příslušenství (chladiče hydraulického oleje, vysokotlakých rozvodů),
- software WRYKRYŠ pro technologickou přípravu řezných programů,
- dálková diagnostika stroje pomocí TeamViewer,
- jedna řezací hlava AccuStream DiaLine pro řezání čistou vodou i pro abrazivní řezání s diamantovou vodní tryskou,
- dávkovač abraziva s elektronickou regulací abraziva 0-500 g·min⁻¹,
- systém dálkové dopravy abraziva s násypkou o objemu 200 kg,
- elektrorozvaděč pro stroj s centrálním STOP tlačítkem.

Konečná cena kompletní dodávky zařízení bez DPH: **2 806 000,- Kč.**



Obr. 8.3 Řezací stůl AW-CT 2040 TKX¹⁶.

8.3 PTV spol. s r.o.

Model Smart Jet II – S³⁴

- kompaktní stůl (viz obr. 8.4) s možností mnoha doplňků,
- abrazivní nebo vodní speciál,
- široká škála formátů pracovního prostoru od 1×1 m až do 2×10 m,
- jeden nebo dva Z-ové suporty se zdvihem 200 mm,
- ocelová nosná konstrukce s integrovaným lapačem,
- kompletně zapěchovaný pevnostní portál z AL profilu,
- lineární vedení s kuličkovými vozíky,
- ozubené hřebeny a nerezové pastorky,
- přesné planetové převodovky se servomotory,
- kryty z plechů lakovaných práškovou barvou,
- komponenty od renomovaných dodavatelů,
- řídicí systém s integrovanou technologickou databází.

Maximální volitelná výbava³⁴:

- proporcionální dávkovač abraziva,
- výškový senzor,
- systém Progress Jet,
- mechanicky naklápěná řezací hlava B,
- podtlakový systém přisávání abraziva,
- laserový zaměřovací kříž,
- lapač s pneumatickou regulací výšky hladiny, volitelně i z nerezové oceli,
- proti rozstřikový ochranný box,
- světelná bezpečnostní závora,
- dálkové ovládání,
- funkce jemného průstřelu,
- program simulace řídicího systému.

Technické parametry zařízení³⁴:

- velikost pracovního prostoru od 2×1 m do 2×10 m,
- zdvih osy Z 200 mm,
- maximální pracovní rychlost 12 000 mm·min⁻¹,
- maximální přejezdová rychlost 12 000 mm·min⁻¹,
- lineární přesnost polohování +/- 0,8 mm/300 mm,
- opakovatelná přesnost +/- 0,05 mm,
- počet Z-suportů 1-2,
- počet řezacích hlav 1-2.

Obr.8.4 Model Smart Jet II – S.³⁴

Cena zařízení se pohybuje od **2 600 000 Kč** do **4 000 000 Kč** bez DPH, dle požadované výbavy zákazníka.

9 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Ekonomické zhodnocení má za úkol vyřešit otázku, zda pořídit vlastní technologii nebo, zdali bude pro firmu výhodnější zůstat u dosavadního způsobu výroby formou kooperace u jiných firem.

9.1 Využití vodního paprsku ve firmě

Hlavní náplní časového fondu vodního paprsku má být dělení a výroba dílů z korozivzdorné oceli pro výrobu rámu skříně a dalších dílů, které slouží k výrobě a kompletnosti této sestavy. Výroba dílů zabírá asi 50 % výroby firmy.

Výrobu dílů pro rám skříně lze považovat za malosériovou výrobu, proto je zvolen tento program výroby rámu jako stěžejní pro požadované výpočty.

9.2 Efektivní časový fond zařízení

Efektivní neboli využitelný časový fond je čas zařízení nebo pracoviště, využitelný pro výrobu³⁵.

Efektivní časový fond vychází ze vztahu:

$$F_{ef} = d \cdot h \cdot \sigma \cdot g \cdot \left(1 - \frac{z}{100}\right) \quad (9.1)$$

kde:

- F_{ef} ... efektivní časový fond [hod],
- D ... počet pracovních dnů v roce,
- H ... počet pracovních hodin za jednu směnu,
- σ ... směnnost,
- g ... počet vzájemně zaměnitelných pracovišť,
- z ... procento nevyhnutelných časových ztrát.

Pro ideální chod firmy je dobré využívat zařízení ve dvousměnném pracovním provozu, přičemž jedna směna trvá 8 hodin.

Efektivní časový fond ve dvousměnném provozu

$$F_{ef1} = d \cdot h \cdot \sigma \cdot g \cdot \left(1 - \frac{z}{100}\right)$$
$$F_{ef1} = 252 \cdot 8 \cdot 2 \cdot 1 \cdot \left(1 - \frac{5}{100}\right) = \underline{\underline{3830,4 \text{ hod}}}$$

Efektivní využitelnost zařízení za jeden rok ve dvousměnném provozu je 3 830,4 hodin. V našem případě lze, vzhledem k sériovosti zakázky, zařízení využít pouze na 440,5 hodiny ročně.

Využití zařízení ve dvousměnném provozu

$$x = \frac{t_r}{F_{ef}} \cdot 100\% \quad (9.2)$$

kde:

x využití zařízení za jeden rok [%],
 F_{ef1} ... efektivní časový fond ve dvousměnném provozu [hod],
 F_{ef2} ... efektivní časový fond v jednosměnném provozu [hod],
 t_r reálný pracovní fond zařízení [hod].

$$x_1 = \frac{t_r}{F_{ef1}} \cdot 100\%$$

$$x_1 = \frac{440,5}{3830,4} \cdot 100\% = \underline{\underline{11,5\%}}$$

Využití zařízení ve dvousměnném provozu a při dané sériovosti je 11,5 % za rok. Jelikož je využitelnost stroje velmi nízká, bude zaveden jednosměnný provoz.

Efektivní časový fond v jednosměnném provozu

$$F_{ef2} = d \cdot h \cdot \sigma \cdot g \cdot \left(1 - \frac{z}{100}\right)$$

$$F_{ef2} = 252 \cdot 8 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \left(1 - \frac{5}{100}\right) = \underline{\underline{1915,2hod}}$$

Efektivní využitelnost zařízení za jeden rok v jednosměnném provozu je 1 915,2 hodin.

Využití zařízení v jednosměnném provozu

$$x_2 = \frac{t_r}{F_{ef2}} \cdot 100\%$$

$$x_2 = \frac{440,5}{1915,2} \cdot 100\% = \underline{\underline{23\%}}$$

Výsledné skutečné využití zařízení při jednosměnném provozu a při dané sériovosti výroby rámu skříně je 23 % za rok.

9.3 Provozní náročnost vodního paprsku

Provozní náklady zařízení vodního paprsku jsou závislé na kvalitě obsluhy a na četnosti výměny opotřebovaných dílů, kterými jsou vysokotlaká a nízkotlaká těsnění, vodní filtry, olejové filtry, rošty atd. Mezi nejnákladnější díly patří vodní trysky a abrazivní trysky. Životnost trysky závisí na kvalitě vody, která je upravována různými aditivy.

Ceny náhradních dílů, které ovlivňují provozní náklady vodního paprsku, se mohou měnit v závislosti na vývoji kurzu koruny vůči ostatním měnám. Veškerá životnost dílů a zařízení je závislá na mnoha faktorech:

- kvalita vody,
- pravidelná údržba,
- odborný servis,
- druh výroby,
- pracovní prostředí,
- lidský faktor.

Tab. 9.1 znázorňuje životnost a cenu jednotlivých vyměnitelných dílů pro zařízení vodního paprsku od firmy AWAC spol. s r.o.

Pro zjištění výše nákladů se vycházelo ze vztahu:

$$C = \frac{P}{L} \quad (9.3)$$

kde:

C ... náklady [Kč·mth⁻¹],
P ... cena [Kč],
L ... životnost [mth].

Tab. 9.1 Přehled provozních nákladů vodního paprsku od firmy AWAC

Přehled nákladů pro vysokotlaké čerpadlo ACS od firmy AWAC			
Název dílu	Cena [Kč]	Životnost [mth]	Náklady [Kč·mth ⁻¹]
Vysokotlaké těsnění - sada	2 150	500	4,3
Nízkotlaké těsnění - sada	1 200	3 000	0,4
Vysokotlaký válec	14 298	2 500	5,8
Nízkotlaký válec	4 902	3 000	1,7
Opravná sada Check Valve	1 871	500	3,8
Tělo Check Valve	9 675	2 500	3,9
Opravná sada Bleed Down	1 419	1 200	1,2
Vodní filtry - sada	331	300	1,1
Olejový filtr	1 849	2 000	0,9
Hydraulický olej	13 760	3 000	4,6
Ostatní drobnější díly	1 000	2 000	0,5
Přehled nákladů řezacích dílů a abraziva od firmy AWAC			
On-Off ventil - sada	1 419	1 000	1,4
Ruční ventil - sada	1 500	2 500	0,6
Abrazivní tryska	2 000	130	15,4
Řezací hlava	8 515	5 000	1,7
Diamantová tryska	9 555	500	19,2
Abrazivní materiál MESH 80 (300g·min ⁻¹)	7,20 [Kč·kg ⁻¹]	18 [kg·mth ⁻¹]	129,6
Likvidace abraziva	1,50 [Kč·kg ⁻¹]	18 [kg·mth ⁻¹]	27
Rošty	6 800	200	34
Voda	69,21 [Kč·m ⁻³]	240 [l·hod ⁻¹]	16,6
Elektrická energie	3,7 [Kč·kW·hod ⁻¹]	37 [kW·hod ⁻¹]	136,9
Další režijní náklady	-	-	150

Náklady zařízení na jednu hodinu provozu činí 560,60 Kč·mth⁻¹. V ceně je zahrnuto vše potřebné k provozu zařízení (náhradní díly, voda, energie, atd.). K nákladům na hodinový provoz zařízení však není započítána mzda obsluhy a odpisy zařízení.

9.4 Výpočet účetních odpisů

Účetní odpisy jsou uplatněny podle skutečné doby používání dlouhodobého majetku. Mají za úkol přesně vystihnout míru opotřebení dlouhodobého majetku.

Odpisová sazba:

$$s = \frac{1}{L} \cdot 100\% \quad (9.4)$$

kde:

s ... odpisová sazba [%],

L ... doporučená životnost zařízení [rok].

$$s = \frac{1}{L} \cdot 100\% = \frac{100}{10} = \underline{\underline{10\%}}$$

Roční odpis:

$$O_r = PC \cdot s \quad (9.5)$$

kde:

 O_r ... roční odpis [Kč],

s ... odpisová sazba [%],

PC ... pořizovací cena zařízení [Kč].

$$O_r = PC \cdot s = 3.000.000 \cdot 0,1 = \underline{\underline{300.000Kč}}$$

Odpis připadající na jednu hodinu práce:

$$O_h = \frac{O_r}{t_r} \quad (9.6)$$

kde:

 t_r ... reálný pracovní fond zařízení [hod], O_h ... hodinový odpis [Kč], O_r ... roční odpis [Kč].

$$O_h = \frac{O_r}{t_r} = \frac{300.000}{440,5} = \underline{\underline{681,1Kč \cdot hod^{-1}}}$$

Celkové provozní náklady zařízeníNáklady na hodinový provoz zařízení: 560,60 Kč·mth⁻¹Náklad na obsluhu zařízení: 189 Kč·hod⁻¹Odpis na hodinu práce: 681,10 Kč·hod⁻¹Celkové náklady na provoz zařízení: **1 430,70 Kč·hod⁻¹ = 23,80 Kč·min⁻¹**

9.5 Úspory

Zvýšení počtu úspor znamená zabezpečení prostředků pro rychlejší návratnost investice. Toho lze docílit, jednak využitím volných kapacit z hlediska možnosti kooperační činnosti pro jiné firmy. To znamená být konkurenceschopný jak z hlediska ceny, tak z hlediska kvality a rychlosti. V dnešní době jedna z možných úspor je recyklace abraziva.

9.5.1 Porovnání cen kooperace a vlastní výroby

Kooperace:

Pro výpočet jsou v tab. 9.2 zvoleny hodnoty a ceny nabídnuté firmou Růžička Trade s.r.o.

Tab. 9.2 Hodnoty kooperační firmy Růžička Trade s.r.o.

Čelní desky	Délka řezu	Čas řezu	Cena za 1 ks
Rám	17 352 mm	120,8 min	4 527 Kč
Trubka	10 060 mm	82,4 min	2 437 Kč
Celkem	27 412 mm	203,2 min	6 964 Kč

Sestava rámu skříně ještě obsahuje další menší díly než jsou zmiňované čelní desky, proto bude celková cena výroby čelních desek navýšena o 30 %.

Celková cena sestavy rámu je: **9 053,20 Kč.**

Vlastní výroba:

Dle výše uvedeného výsledku činí celkové náklady na provoz zařízení $1\,430,70 \text{ Kč} \cdot \text{hod}^{-1}$, tj. $23,80 \text{ Kč} \cdot \text{min}^{-1}$.

Tab. 9.3 Hodnoty vlastní výroby firmy ARENIA s.r.o.

Čelní desky	Délka řezu	Čas řezu	Cena reálná za 1 ks
Rám	17 352 mm	120,8 min	2 875,00 Kč
Trubka	10 060 mm	82,4 min	1 961,10 Kč
Celkem	27 412 mm	203,2 min	4 836,10 Kč

Sestava rámu skříně ještě obsahuje další menší díly než jsou zmiňované čelní desky, proto bude celková cena výroby čelních desek navýšena o 30 %.

Reálná celková cena sestavy rámu je: **6 286,90 Kč.**

Při výrobě jedné sestavy rámu skříně je rozdíl ceny v kooperaci a ceny vlastní výroby **2 766,30 Kč.**

Při sériové výrobě 100 ks rámu ročně s využitím vlastní výrobní technologie vysokotlakého vodního paprsku činí úspora **276 630 Kč.**

9.5.2 Recyklace abraziva

Recyklační jednotka WARD od firmy PTV spol. s r.o. neslouží jen pro recyklaci abraziva, ale je schopna i odvádět abrazivo z lapače vody. Za pomocí trysky (sací hlavy), kterou má firma PTV patentovanou, je kal odčerpáván ze dna lapače a dopravován do recyklačního systému. Přecherpaný kal prochází přes sadu vibračních sítí tzv. separátor. Zde dochází k oddělení drobných a větších částic. Dobré abrazivo je přepraveno k sušičce a po vysušení následně prochází přes koncové síto, na kterém jsou veškeré nadměrné částice vyřazeny.

Recyklované abrazivo vychází ze systému suché a čisté připravené pro přesun vzduchovým systémem do potřebného zásobníku abraziva, kde může být okamžitě použito k dalšímu procesu výroby.

Jemné abrazivní částice jako je odpadní materiál, jsou dopravovány a shromažďovány do vaků, ve kterých se dodává nové abrazivo.

Recyklační systém (viz obr. 9.1) je řízen pomocí PLC. Všechny funkce systému jsou monitorované a při sebemenším problému je celý systém automaticky vypnut. Výhodou tohoto systému je, že může pracovat automaticky a zcela nezávisle³⁶.

*Technické parametry:*³⁶

- | | |
|--------------------|--|
| - recyklační výkon | 60-90 kg recyklovaného granátu za hod, |
| - výtěžnost | 50-70 %, |
| - el. energie | 3×400 V, 50 Hz, 63 A, |
| - el. příkon | 25 kW·hod ⁻¹ , |
| - spotřeba vody | 3,5 l·min ⁻¹ při 1,5-2 bar, |
| - hmotnost | cca 850 kg. |



Obr. 9.1 Zařízení pro odkalování a recyklaci abrazivního materiálu³⁶.

9.6 Návratnost investice

Při výpočtu doby návratnosti investice dochází k poměru celkové výše investic a dosažených úspor, které z této investice plynou. Výsledek tedy udává časové období, za které se vložená investice vyrovná úsporám. Velikost úspor roste přímo úměrně s dobou používání zařízení.

Pro výpočet doby návratnosti investice se využívá vztahu:

$$NI = \frac{PC}{U} \quad (9.7)$$

kde:

NI ... návratnost investice [rok],

PC ... pořizovací cena zařízení [Kč],

U ... výše úspor [Kč].

$$NI = \frac{PC}{U} = \frac{3.000.000}{276.630} = \underline{\underline{10,8let}}$$

Doba návratnosti, za kterou se firmě Arenia vrátí investice za pořízení nové technologie vysokotlakého vodního paprsku je 11 let.

DISKUZE

Hlavním úkolem této studie bylo předložit vedení firmy Arenia ucelená fakta o možnosti pořízení vlastní technologie vodního paprsku. Na myšlenku o nákupu vlastního zařízení vedla firmu velmi častá kooperace u jiných firem, jejichž marže za dělení materiálu prostřednictvím vodního paprsku negativně ovlivňovala výnosnost prováděné zakázky.

Na první pohled se zdály být náklady vynaložené na tuto kooperační činnost značně vysoké, proto se firma začala podrobněji zabývat, zda je schopna vytižit vlastní zařízení do takové míry, aby se pokryly náklady na investici do zařízení a navíc, aby přinesla firmě další zisk.

Ideální využití zařízení, které by nenarušilo dosavadní chod firmy, by byl dvousměnný provoz. Na základě této studie, v níž byl proveden výpočet efektivního časového fondu pro dvousměnný provoz, firma zjistila, že tato varianta je zcela nevyhovující. Firma není schopna zařízení v tomto provozu plně vytižit pouze svým objemem výroby. I přes současné dobré výsledky v hospodaření se firma nechce spoléhat na příslibení většího přísunu objemu zakázek od hlavního odběratele, s ohledem na špatné zkušenosti z období nedávno prodělané ekonomické krize, která tvrdě zasáhla do dobře zajištěného provozu.

Na vidinu vzniku nových zakázek od potenciálních odběratelů se firma nemůže v dnešní době spoléhat, vzhledem k velké konkurenci a nestabilní situaci na trhu.

Z toho důvodu byla ve studii navrhnutá varianta jednosměnného provozu. Dle této varianty je efektivní časový fond zařízení 1 915,2 hod za rok, což v poměru k reálnému časovému využití zařízení - 440,5 hod ročně vychází využitelnost zařízení pouze na 23 %.

Při tomto využití zařízení byly firmě vyčísleny provozní náklady na 1 430,70 Kč·hod⁻¹. Výroba jedné sestavy rámu skříně vlastní technologií vyjde firmu na 6 286,90 Kč. Naproti tomu za výrobu sestavy rámu skříně s pomocí kooperace firma zaplatí 9 053,20 Kč.

Rozdíl mezi kooperací a vlastní výrobou je 2 766,30 Kč připadající na jednu sestavu rámu.

Při sériovosti 100 ks rámu ročně činí úspora 276 630 Kč. Investiční náklady na pořízení vlastní technologie vodního paprsku činí 3 000 000 Kč. Při výše uvedených úsporách je návratnost zařízení 11 let, což je jednoznačně nevyhovující, protože doba návratnosti investice je delší než životnost zařízení.

Pokud se firma i přesto rozhodne pořídit vlastní technologii vodního paprsku, musí počítat s vynaložením velkého úsilí pro získání takového množství zakázek, které by zajistilo efektivní využití zařízení a tím zkrátilo dobu návratnosti investice.

Jako vhodnější varianta se nabízí zachovat stávající postup výroby za pomoci kooperujících firem. Na základě této studie má firma přibližný přehled o nákladech na provoz této technologie a může se smluvně spojit

s firmou na výrobu daných dílů a navrhnout oboustranně výhodnou spolupráci, při které se kooperující firma stane jediným dodavatelem za podmínek příznivějších cen.

ZÁVĚR

Technologie vodního paprsku je v současné době už velmi rozšířenou technologií, která se používá především pro dělení materiálu. Její předností je schopnost dělit jakýkoliv materiál bez jeho mechanického a tepelného ovlivnění. Technologie vodního paprsku rozrušuje dělený materiál za pomoci dopadajícího vysokotlakého vodního paprsku s vysokou rychlostí a kinetickou energií na dělený materiál.

Rozlišujeme dvě základní metody a to: čistý vodní paprsek, používaný pro měkčí materiály a abrazivní vodní paprsek obsahující abrazivní materiál, který znásobuje sílu paprsku, proto se používá pro tvrdé a těžkoobrobitelné materiály.

Tato studie shrnuje informace o možnosti nákupu a efektivním využití vlastní technologie vodního paprsku pro dělení materiálu.

Základním bodem práce je výroba rámu skříně. Tyto rámy firma Arenia vyrábí malosériově. Výroba čelních desek těchto rámu byla zadána kooperující firmě a cena za tuto výrobu byla porovnána s vlastními možnostmi výroby.

Vzhledem k sériovosti výroby a množství kooperovaných dílů, vedení firmy zvažuje nákup vlastního zařízení, jehož prostřednictvím chce zredukovat vynaložené náklady na tu část výroby, která probíhá v kooperaci.

Byly shromážděny nabídky od tří předních prodejců technologie vodního paprsku v ČR - Flow Eastern Europe, AWAC, PTV, u nichž byly porovnány vstupní náklady na pořízení vlastního zařízení vodního paprsku.

Náklady na provoz byly podrobně shrnuty do tab. 9.1. Na základě těchto informací byl proveden výpočet ceny, za kterou je firma schopna díly vyrobit vlastní technologií. Firma dokáže díly vyrobit sice levněji, ale tento rozdíl není natolik zásadní, aby měl přímý vliv u rozhodování o koupi zařízení.

Hlavní faktor, který bude mít vliv na rozhodnutí o pořízení vlastní technologie je bezesporu nedostatečné vytížení zařízení. Je tedy na rozhodnutí vedení firmy, zda bude schopna zajistit dostatečný přísun práce v takovém množství, se kterým by dosáhla rychlejší návratnosti investice a navíc mohla profitovat z poskytování služeb v oblasti dělení materiálu vodním paprskem.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. HUMÁR, Anton. *Technologie I - Technologie obrábění - 3. část*. [online]. Interaktivní multimediální text pro bakalářský a magisterský studijní program. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. 2005 [cit. 2012-03-01]. Dostupné na World Wide Web: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf>
2. PÍŠKA, Miroslav., *Speciální technologie obrábění*. Brno: CERM, 2009. 247 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
3. KOČMAN, Karel, PROKOP, Jaroslav. *Technologie obrábění*. Brno: CERM, 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
4. JÁCHYM, Jan. *Řezání materiálu vodním paprskem*. Brno, 2009. Bakalářská práce. Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Energetický ústav. Vedoucí bakalářské práce Vladimír Habán.
5. HASHISH, Mohamed. In Memoriam - Dr. Norman Charles Franz. *WJTA Jet News*. [online]. Poslední aktualizace 12. 12. 2007. [cit. 2012-03-08]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.wjta.org/images/wjta/JetNews/JetNews/Dec07.pdf>>
6. WIKIPEDIA. *Water jet cutter*. [online]. Poslední aktualizace 9. 4. 2008 [cit. 2012-03-10]. Dostupné na World Wide Web: <http://en.wikipedia.org/wiki/Water_jet_cutter>.
7. HÍREŠ, Ondrej, Michal HATALA a Sergej HLOCH. *Delenie kovových materiálov okružnou pílou, vodným prúdom a plazmovým oblúkom*, 1. vyd. Jiří Pustina: Ostrava - Poruba, 2007. 147 s. ISBN 978-80-8073-769-6
8. MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technologie*. 1 vyd. Košice: Vienala, 2000. 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
9. VODNÍ PAPERSEK. *Řezání materiálu vysokotlakým vodním paprskem*. [online]. [cit. 2012-03-05]. Dostupné na World Wide Web: <<http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/2-17.pdf>>.
10. PTV. *Vysokotlaká čerpadla*. [online]. [cit. 2012-03-20]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.ptv.cz/ptv/jnp/cz/produkty/vysokotlaka_cerpadla/PTV_22_60_bez_krytaze/index.html>
11. PTV. *Náhradní díly*. [online]. [cit. 2012-03-21]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.ptv.cz/ptv/jnp/cz/produkty/nahradni_dily/Sestava_multiplikatoru/index.html>.
12. KRAJNÝ, Zdenko. *Vodný lúč v praxi - WJM*. Bratislava, 1998. 195 s. ISBN 80-8057-091-4.

13. HENNLICH. *Čerpací technika – vysokotlaká čerpadla*. [online]. [cit. 2012-04-01]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.hennlich.cz/produkty/cerpaci-technika-vysokotlaka-cerpadla-cat-plunzrova-cerpadla-187/cat-plunzrova-cerpadla.html>>.
14. MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. *Řezání vodním paprskem*. [online]. [cit. 2012-04-01]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/rezani-vodnim-paprskem.html>>.
15. PTV. *Náhradní díly – řezací hlava*. [online]. [cit. 2012-04-05]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.ptv.cz/ptv/jnp/cz/produkty/nahradni_dily/PTV_rezaci_hlava/index.html>.
16. AWAC. *CNC stroj pro dělení materiálu vysokotlakým vodním paprskem*. Cenová nabídka firmy AWAC spol. s r.o.
17. AWAC. *Systémy dělení materiálu*. [online]. [cit. 2012-04-01]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.awac.cz/?lang=cz&m1=3&m2=7&m3=10&m4=13>>.
18. GLASSREVUE. *Technologie WJM/AWJ pro řezání pevných materiálů vodním paprskem II*. [online]. [cit. 2012-04-03]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.glassrevue.com/news.asp@nid=6709&cid=6.html>>.
19. MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. *Frézování a gravírování nekonvenční technologií AWJ*. [online]. [cit. 2012-04-03]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/frezovani-a-gravirovani-nekonvenčni-technologie-awj.html>>.
20. WIKIPEDIE. *Sendvič – laminát*. [online]. [cit. 2012-04-04]. Dostupné na World Wide Web: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Sendvi%C4%8D_\(lamin%C3%A1t\)](http://cs.wikipedia.org/wiki/Sendvi%C4%8D_(lamin%C3%A1t))>.
21. PRLOG PRESS RELEASE DISTRIBUTION. *WARDJet Releases 5-Axis Waterjet Cutting Head with Height/Crash Sensor Option*. [online]. [cit. 2012-04-10]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.prlog.org/10322436-wardjet-releases-5axis-waterjet-cutting-head-with-heightcrash-sensor-option.html>>.
22. CHPS. *Vodní paprsek*. [online]. [cit. 2012-04-21]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.chps.cz/vodni-paprsek/kvalita-a-cena.html>>.
23. SVOBODA, Pavel, Jan BRANDEJS a František PROKEŠ. *Základy konstruování*. Brno: CERM, 2007. ISBN 978-80-7204-535-8.
24. DVOŘÁČEK, J., Jan BRANDEJS. *Základy konstruování - struktura povrchu*. Učební text.
25. MILCO WATERJET. *Advantages to Waterjet Cutting*. [online]. [cit. 2012-04-22]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.milcowaterjet.com/advantages.php>>.

26. PTV. *Vysokotlaký vodní paprsek*. [online]. [cit. 2012-04-22]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.ptv.cz/ptv/jnp/cz/produkty/abrazivo/index.htm>.
27. KOVO. *Images*. [online]. [cit. 2012-04-25]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.kovo-pilcik.cz/images/big/sv18.jpg>.
28. KARAS. *Pásové pily na kov*. [online]. [cit. 2012-04-25]. Dostupné na World Wide Web: www.pasove-pily.eu/bomar-pasova-pila-na-kov-ergonomic-320-250-g-27885.html.
29. FERMAT. *Použité stroje*. [online]. [cit. 2012-04-25]. Dostupné na World Wide Web: www.fermatmachinery.com/sk/used-machines/20100-konzolova/101100-FGS-3240-.html.
30. INZERTPLUS. *Radiální vrtačka VR 4*. [online]. [cit. 2012-04-25]. Dostupné na World Wide Web: <http://stroje.inzertplus.cz/inz/radialni-vrtacka-vr-4-19089.html>.
31. STROJE SVOBODA. *Hrotový soustruh*. [online]. [cit. 2012-04-25]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.strojesvoboda.cz/katalog.php?page=KATALOG&katalog=Sstroje/Soustruh/Hrotový&mask=&o=1>.
32. STROJE SVOBODA. *Tabulové nůžky*. [online]. [cit. 2012-04-25]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.strojesvoboda.cz/katalog.php?page=KATALOG&katalog=Sstroje/Nůžky/Tabulové&mask=&o=1>.
33. FLOW. *Flow Waterjet Cutting System – systém pro řezání vodním paprskem*. Cenová nabídka firmy AWAC spol. s r.o.
34. PTV. *Vysokotlaký vodní paprsek – Smart Jet II – S*. [online]. [cit. 2012-04-25]. Dostupné na World Wide Web: http://www.ptv.cz/ptv/jnp/cz/produkty/stroje_vodni_paprsek/WJxxyy_1Z_EKO/-content-ptv-cz-produkty-CNC_stroje_vodni_paprsek-Smart_Jet_Strong-sectionContent.html.
35. JUROVÁ, Marie. *Řízení výroby I*. Brno: CERM, 2005. 138 s. ISBN 80-214-3134-2.
36. PTV. *Recyklace abraziva*. [online]. [cit. 2012-04-30]. Dostupné na World Wide Web: http://www.ptv.cz/ptv/jnp/cz/produkty/recyklace_abraziva/index.html.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka	Jednotka	Popis
AWJM	[-]	Obrábění paprskem vody
AWJ	[-]	Obrábění abrazivním vodním paprskem (Abrasive Water jet Machining)
CM	[-]	Chemické obrábění
EBM	[-]	Obrábění paprskem elektronů
ECM	[-]	Elektrochemické obrábění
EDM	[-]	Elektroerozivní obrábění
F	[-]	Obrábění frézováním
LBM	[-]	Obrábění paprskem laseru
PAA	[-]	Polyakrylamid
PBM	[-]	Obrábění paprskem plazmy
PEO	[-]	Polyetyloxid
S	[-]	Obrábění soustružením
USM	[-]	Ultra zvukové obrábění
WJM	[-]	Obrábění čistým vodním paprskem (Water Jet Machining)

Symbol	Jednotka	Popis
C	[Kč·mth ⁻¹]	Náklady
D	[-]	Počet pracovních dnů v roce
F _{ef}	[hod]	Efektivní časový fond
H	[-]	Počet pracovních hodin za jednu směnu
K _m	[%]	Využitelnost materiálu
L	[rok]	Doporučená životnost zařízení
L	[mth]	Životnost
NI	[rok]	Návratnost investice
O _h	[Kč]	Hodinový odpis
O _r	[Kč]	Roční odpis
P	[Kč]	Cena
PC	[Kč]	Pořizovací cena zařízení
R _a	[μm]	Průměrná aritmetická úchylka profilu
R _p	[μm]	Výška výstupku
R _v	[μm]	Hloubka prohlubně
R _z	[μm]	Největší výška profilu
S	[m ²]	Plocha
S	[%]	Odpisová sazba
U	[Kč]	Výše úspor

Symbol	Jednotka	Popis
g	[-]	Počet vzájemně zaměnitelných pracovišť
h	[mm]	Hloubka
i	[-]	Koeficient zvýšení tlaku
l_r	[mm]	Základní délka profilu
m	[kg]	Hmotnost polotovarů
m_h	[kg]	Hmotnost vyrobených součástí
p	[Pa]	Tlak
t_r	[hod]	Reálná pracovní fond zařízení
v	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost proudění kapaliny
x	[%]	Využití zařízení za jeden rok
z	[%]	Procento nevyhnutelných časových ztrát
ρ	$[kg \cdot mg^{-3}]$	Hustota kapaliny
σ	[-]	Směnnost

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Výkres – Sestava konstrukce rámu skříně – č. v. 11_005901
- Příloha 2 Výkres – Horní čelní deska pravá – č. v. 11_005917
- Příloha 3 Výkres – Horní čelní deska levá – č. v. 11_005916
- Příloha 4 Výkres – Spodní díl rámu skříně – č. v. 11_005933
- Příloha 5 Výkres – Ochranná trubka – č. v. 11_005934

