

EDÍCIA VEDECKEJ A ODBORNEJ LITERATÚRY - STROJNÍCKA FAKULTA TU V KOŠICIACH

EDÍCIA VEDECKEJ A ODBORNEJ LITERATÚRY - STROJNÍCKA FAKULTA TU V KOŠICIACH

EDÍCIA VEDECKEJ A ODBORNEJ LITERATÚRY - STROJNÍCKA FAKULTA TU V KOŠICIACH

EDÍCIA VEDECKEJ A ODBORNEJ LITERATÚRY - STROJNÍCKA FAKULTA TU V KOŠICIACH

EDÍCIA VEDECKEJ A ODBORNEJ LITERATÚRY - STROJNÍCKA FAKULTA TU V KOŠICIACH

EDÍCIA VEDECKEJ A ODBORNEJ LITERATÚRY - STROJNÍCKA FAKULTA TU V KOŠICIACH

EDÍCIA VEDECKEJ A ODBORNEJ LITERATÚRY - STROJNÍCKA FAKULTA TU V KOŠICIACH

EDÍCIA VEDECKEJ A ODBORNEJ LITERATÚRY - STROJNÍCKA FAKULTA TU V KOŠICIACH

EDÍCIA VEDECKEJ A ODBORNEJ LITERATÚRY - STROJNÍCKA FAKULTA TU V KOŠICIACH

EDÍCIA VEDECKEJ A ODBORNEJ LITERATÚRY - STROJNÍCKA FAKULTA TU V KOŠICIACH

EDÍCIA VEDECKEJ A ODBORNEJ LITERATÚRY - STROJNÍCKA FAKULTA TU V KOŠICIACH

EDÍCIA VEDECKEJ A ODBORNEJ LITERATÚRY - STROJNÍCKA FAKULTA TU V KOŠICIACH

EDÍCIA VEDECKEJ A ODBORNEJ LITERATÚRY - STROJNÍCKA FAKULTA TU V KOŠICIACH

EDÍCIA VEDECKEJ A ODBORNEJ LITERATÚRY - STROJNÍCKA FAKULTA TU V KOŠICIACH

EDÍCIA VEDECKEJ A ODBORNEJ LITERATÚRY - STROJNÍCKA FAKULTA TU V KOŠICIACH

EDÍCIA VEDECKEJ A ODBORNEJ LITERATÚRY - STROJNÍCKA FAKULTA TU V KOŠICIACH

EDÍCIA VEDECKEJ A ODBORNEJ LITERATÚRY - STROJNÍCKA FAKULTA TU V KOŠICIACH

EDÍCIA VEDECKEJ A ODBORNEJ LITERATÚRY - STROJNÍCKA FAKULTA TU V KOŠICIACH

EDÍCIA VEDECKEJ A ODBORNEJ LITERATÚRY - STROJNÍCKA FAKULTA TU V KOŠICIACH

EDÍCIA VEDECKEJ A ODBORNEJ LITERATÚRY - STROJNÍCKA FAKULTA TU V KOŠICIACH

EDÍCIA VEDECKEJ A ODBORNEJ LITERATÚRY - STROJNÍCKA FAKULTA TU V KOŠICIACH

EDÍCIA VEDECKEJ A ODBORNEJ LITERATÚRY - STROJNÍCKA FAKULTA TU V KOŠICIACH

EDÍCIA VEDECKEJ A ODBORNEJ LITERATÚRY - STROJNÍCKA FAKULTA TU V KOŠICIACH

EDÍCIA VEDECKEJ A ODBORNEJ LITERATÚRY - STROJNÍCKA FAKULTA TU V KOŠICIACH

EDÍCIA VEDECKEJ A ODBORNEJ LITERATÚRY - STROJNÍCKA FAKULTA TU V KOŠICIACH

EDÍCIA VEDECKEJ A ODBORNEJ LITERATÚRY - STROJNÍCKA FAKULTA TU V KOŠICIACH

EDÍCIA VEDECKEJ A ODBORNEJ LITERATÚRY - STROJNÍCKA FAKULTA TU V KOŠICIACH

EDÍCIA VEDECKEJ A ODBORNEJ LITERATÚRY - STROJNÍCKA FAKULTA TU V KOŠICIACH

EDÍCIA VEDECKEJ A ODBORNEJ LITERATÚRY - STROJNÍCKA FAKULTA TU V KOŠICIACH

EDÍCIA VEDECKEJ A ODBORNEJ LITERATÚRY - STROJNÍCKA FAKULTA TU V KOŠICIACH



PROGRESÍVNE TECHNOLÓGIE

Vienala Košice

© 2000

Obsah

Predhovor	V
Použité symboly a označenia	VI
1 ÚVOD	1
1.1. Význam a pojem technológie	3
1.1.1 Technológia strojárskkej výroby	5
1.2. Klasifikácia spôsobov obrábania	9
Literatúra ku kapitole 1	13
2 PROGRESÍVNE TECHNOLOGIE ÚBERU MATERIÁLU	15
2.1. Klasifikácia progresívnych metód úberu materiálov	18
2.2. Základné charakteristiky progresívnych technológií	20
Literatúra ku kapitole 2	28
3 MECHANICKÉ PROCESY ÚBERU MATERIÁLU	29
3.1. Obrábanie ultrazvukom	31
3.1.1 Princíp ultrazvukového opracovania	31
3.1.1.1 Zariadenie	32
3.1.1.2 Charakteristiky ultrazvukového obrábania	34
3.1.2 Úber materiálu	35
3.1.2.1 Vlastnosti materiálu obrobku	36
3.1.2.2 Akustický systém	37
3.1.2.3 Suspénzia	38
3.1.3 Materiál nástroja a opotrebenie nástroja	40
3.1.4 Vlastnosti opracovaného povrchu	41
3.1.4.1 Drsnosť povrchu	41
3.1.4.2 Presnosť rozmerov pri ultrazvukovom obrábaní	43
3.1.5 Hlavné oblasti použitia USM	44
3.1.5.1 Rotačné ultrazvukové obrábanie	45
Literatúra ku kapitole 3.1	48
3.2. Technológie abrazívneho lúča pre úber materiálu	49
3.2.1 AJM – princíp úberu a zariadenie	49
3.2.1.1 Charakteristika abrazívneho lúča	51
3.2.1.2 Vplyv parametrov AJM na proces úberu materiálu	51
3.2.1.3 Charakteristika povrchu po AJM procese	54
3.2.1.4 Oblasti použitia procesu AJM	55
3.2.2 AFM – charakteristika, princíp úberu a zariadenie	55
3.2.2.1 Mechanizmus úberu materiálu	58
3.2.2.2 Kvalita opracovaného povrchu pri AFM	60
3.2.2.3 Oblasti použitia AFM technológie	61
Literatúra ku kapitole 3.2	62
3.3. Vodný lúč a abrazívny vodný lúč pre obrábanie	63
3.3.1 Princíp rezania vodným lúčom	63
3.3.1.1 Zariadenie pre vodný lúč	64
3.3.1.2 Charakteristika vodného a abrazívneho lúča	68

3.3.2	Úber materiálu	68
3.3.2.1	Model zóny rezania AWJ lúčom	71
3.3.3	Vlastnosti opracovaného povrchu	78
3.3.4	Oblasti využívania vodného a abrazívneho vodného lúča	81
3.3.4.1	Abrazívny vodný lúč pre operácie obrábania	82
3.3.5	Prednosti technológie vodného lúča a perspektívy využitia	87
	Literatúra ku kapitole 3.3	89
4	CHEMICKÉ A ELEKTROCHEMICKÉ PROCESY ÚBERU MATERIÁLU	91
4.1.	Chemické obrábanie	93
4.1.1	Princíp elektrochemického úberu materiálu	94
4.1.1.1	Kvalita opracovaného povrchu	96
4.1.2	Chemické frézovanie	98
4.1.3	Fotochemické obrábanie	101
4.1.4	Termické odstraňovanie ostrapov	104
4.1.5	Špeciálne postupy chemického opracovania	105
	Literatúra ku kapitole 4.1	106
4.2.	Elektrochemické obrábanie	107
4.2.1	Princíp technológie elektrochemického obrábania	108
4.2.1.1	Elektrolyt a jeho funkcia	111
4.2.1.2	Vplyv materiálu obrobku na úber	114
4.2.2	Zariadenie a elektródy pre ECM obrábanie	115
4.2.3	Vlastnosti opracovaného povrchu	118
4.2.4	Oblasti použitia elektrochemického obrábania	121
4.2.4.1	Elektrochemické hĺbenie	122
4.2.4.2	Elektrochemické dokončovanie povrchov	125
4.2.4.3	Špeciálne postupy ECM opracovania	128
4.2.5	Vplyv ECM procesov na životné prostredie a riziká bezpečnosti práce	133
	Literatúra ku kapitole 4.2	134
5	ELEKTROTEPELNÉ PROCESY ÚBERU MATERIÁLU	135
5.1.	Elektroerozívne obrábanie	137
5.1.1	Princíp technológie elektroerozívneho obrábania	137
5.1.1.1	Zariadenie pre elektroiskrové opracovanie	140
5.1.1.2	Dielektrická kvapalina	142
5.1.1.3	Nástrojové elektródy a ich opotrebenie	144
5.1.2	Mechanizmus úberu materiálu	147
5.1.2.1	Prevádzkové charakteristiky procesu	151
5.1.3	Kvalita opracovaného povrchu	153
5.1.5	Použitie EDM technológií	156
5.1.5.1	Elektroiskrové hĺbenie	158
5.1.5.2	WIRE-EDM elektroiskrové drôtové rezanie	160
5.1.5.3	Elektroiskrové brúsenie	161
5.1.6	Vplyv technológie na životné prostredie	163
	Literatúra ku kapitole 5.1	165

5.2. Opracovanie laserom	167
5.2.1 Definícia lasera a základné vlastnosti laserového lúča	167
5.2.1.1 Druhy laserov a ich delenie	172
5.2.1.2 Účinok laserového lúča na materiál a úber materiálu	176
5.2.2 Zariadenie pre laserové opracovanie	181
5.2.2.1 CO ₂ laser	181
5.2.2.2 Nd-YAG laser	184
5.2.2.3 Excimerové lasery	186
5.2.2.4 Prevádzkové charakteristiky priemyselne používaných laserov	187
5.2.3 Kritéria hodnotenie kvality povrchu po obrábaní laserovým lúčom	190
5.2.4 Použitie laserového lúča pre opracovanie materiálov	194
5.2.4.1 Rezanie a delenie materiálov laserom	195
5.2.4.2 Vŕtanie laserom	204
5.2.4.3 Mikroobrábanie	207
5.2.4.4 Sústruženie laserovým lúčom	209
5.2.4.5 Laser pri dokončovaní povrchov	211
5.2.4.6 Obrábanie podporované laserom(LAM)	214
5.2.5 Porovnávacie hodnotenie laserovej technológie	217
5.2.6 Bezpečnosť práce a vplyv lasera na životné prostredie	219
Literatúra ku kapitole 5.2	222
5.3. Obrábanie lúčom plazmy	225
5.3.1 Vznik plazmy a plazmové zariadenia	225
5.3.2 Mechanizmus plazmového rezania materiálov	231
5.3.3 Použitie plazmového lúča pre opracovanie materiálov	235
5.3.3.1 Sústruženie plazmovým lúčom	237
Literatúra ku kapitole 5.3	240
5.4. Opracovanie zväzkom elektrónov	241
5.4.1 Princíp opracovania elektrónovým lúčom a zariadenie	242
5.4.2 Použitie technológie EBM	246
5.4.2.1 Vŕtanie elektrónovým lúčom	247
Literatúra ku kapitole 5.4	252
5.5. Technológie iónového lúča	253
5.5.1 Princíp iónového lúča a zariadenia	254
5.5.1.1 Zariadenie pre technológiu iónového lúča	256
5.5.2 Iónový lúč na úber materiálu	259
5.5.2.1 Reaktívne leptanie iónovým lúčom	263
5.5.2.2 Leptanie pomocou iónového lúča IBAE	263
5.5.3 Použitie technológie IBM	264
5.5.4 Tvorenie tenkých vrstiev iónovým lúčom	266
5.5.4.1 Iónové plátovanie	266
5.5.4.2 Iónová implantácia	270
5.5.4.3 Kombinované procesy IBAD	273
Literatúra ku kapitole 5.5	275

PROGRESÍVNE TECHNOLOGIE

Ildikó MAŇKOVÁ

VIENALA , vydavateľstvo a tlačiareň
KOŠICE
2000

Doc. Ing. Ildikó Maňková, CSc.
Katedra technológií a materiálov
Strojnícka fakulta TU Košice

Strojnícka fakulta TU Košice – edícia vedeckej a odbornej literatúry
PROGRESÍVNE TECHNOLOGIE
ADVANCED METHODS OF MATERIAL REMOVAL

ISBN 80-7099-430-4

Recenzia

prof. Ing. Alexander Janáč, CSc.	Tnava
prof. Ing. Imrich Kažimír, CSc.	Košice
prof. Dr. Ing. Lucio Enrico Zavanella	Brescia

© Technická univerzita Košice, Strojnícka fakulta, Ildikó Maňková, 2000

Návrh obálky/Cover design: © doc. Ing. Jaroslav Jarema, CSc.
Jazyková úprava: Ing. Svetoslav Maňko
Tlač: Vienaľa, vydavateľstvo a tlačiareň Košice
Printed in Slovakia

PodĎakovanie

Autorka ďakuje touto cestou Komisii Európskeho spoločenstva – generálne riaditeľstvo Brusel (Belgicko) a Európskej nadácii pre vzdelávanie Turín (Taliansko) za udelenie grantu na Spoločný európsky projekt TEMPUS PHARE S_JEP 12310/97: “Európske normy vo výuke strojného inžinierstva”, s podporou ktorého bolo umožnené vydanie tejto knihy.

Koordinátor projektu: doc. Ing. Jozef Beňo, CSc. Strojnícka fakulta TU Košice,

Kontraktor projektu: doc. Ing. Ildikó Maňková, CSc. Strojnícka fakulta TU Košice.

Hlavní partneri a spoluriešitelia projektu:

Dr. David Lloyd a prof. Dr. Stuart Spraggett Coventry University (UK),

prof. Dr. Lucio Zavanella Università degli Studi di Brescia (I),

Ing. Peter Kelman University Vienna (A),

prof. Ing. Alexander Janáč, CSc. a doc. Ing. Michal Štefánek, CSc. Materiálovo-technologická fakulta STU Trnava (SK), ktorí svojimi pripomienkami, pomocou a podnetnými návrhmi prispeli k vydaniu tejto publikácie.

Acknowledgement

Author would like to express the thanks for support given by the Commission of European Communities, Directorate-General XXII, Bruxelles (Belgium) and European Training Foundation Torino (Italy). The donation to the Joint European Project Grant TEMPUS- PHARE S_JEP 12310/97 entitled „European Standards in Mechanical Engineering Education, enabled edition of this book.

Project Coordinator: Jozef Beňo, Faculty of Mechanical Engineering Technical University of Košice (SK),

Project Contractor: Ildikó Maňková, Faculty of Mechanical Engineering Technical University of Košice (SK),

Local coordinators and partner institutions:

David Lloyd and Stuart Spraggett - Coventry University (UK),

Lucio Zavanella - Università degli Studi di Brescia (I),

Peter Kelman – Technical University of Vienna (A),

Alexander Janáč and Michal Štefánek - Slovak Technical University Faculty of Materials and Technology ,Trnava (SK).

Predhovor

Stalo sa už tradíciou, že ak chceme vyjadriť svoj názor, napíšeme to. Možno preto, že si myslíme o písanom slove, že je viac účinné. Možno niekedy.

Je veľa kníh, ktoré bez toho, aby si ich niekto všimol upadli do zabudnutia. Je oveľa viac, ktoré mali, majú a budú mať čo povedať. Ako napísal jeden môj kolega „odborné knihy nie sú bestsellermi a oveľa rýchlejšie upadnú do zabudnutia“. Bolo by veľmi odvážne, ak by sa to nestalo aj s touto knihou.

Táto kniha je určitý pohľad na súčasný stav poznatkov v jednej vednej oblasti. Jej účelom je podať prehľad o tzv. netradičných výrobných technológiách úberu materiálu (*material removal*) a ich perspektívach. Je pokusom o systematický pohľad na tieto technológie opracovania z aspektu obrábania a ich miesto vo výrobnom procese súčasnosti, ale aj budúcnosti. Zároveň je snahou o ucelený prehľad informácií a poznatkov z oblasti technológií, ktoré využívajú aj iné formy energie než je energia mechanická. Pričom v žiadnom prípade nechce zdôrazňovať ani „preceňovať“ význam týchto moderných výrobných technológií, ktoré sa zrodili v poslednej štvrtine XX. storočia a ich miesto vo výrobnom procese. Na druhej strane sa ale mnohé z týchto technológií stávajú dominantnými v oblastiach, ktoré nachádzajú stále širšie uplatnenie v priemyselnej výrobe. Sú to najmä postupy presného a vysokopresného rozmerového opracovania, mikroobrábania a nanotechnológií. Je takisto potrebné zdôrazniť, že tieto technológie splňujú náročné požiadavky modernej výroby nielen v oblasti automatizácie, ale aj z pohľadu energetického, ekologického a ekonomického.

Názov knihy vychádza z anglického názvu *Advanced Method of Material Removal*. Význam slova *advanced* je v anglickom jazyku ponímaný ako „zdokonalený, pokročilý, pokrokový, vyšší, moderný, progresívny“. Je veľmi ťažké nájsť vhodné spojenie, prípadne názov pre pôvodne nekonvenčné metódy, neskôr nazvané ako netradičné spôsoby úberu materiálu. Autorka zvolila názov progresívny s ohľadom na názory a odporúčania odborných konzultantov diela, pričom táto voľba odráža aj ich postavenie v súčasnom vývoji technológií opracovania materiálov.

Kniha si nekladie za cieľ byť prísne vedeckým dielom. Skôr chce svojim prístupom ukázať aspoň časť poznatkov, ktoré ľudstvo nadobudlo za posledných 50 rokov XX. storočia v oblasti jednej skupiny technológií spracovania materiálov. Samozrejme, netrúfa si povedať, že kniha túto tému naplnila alebo dokonca vyčerpala. Množstvo poznatkov, či už priamo dostupných alebo známych len vo väzbe na rôzne prehľady literatúry vo vedecko-odborných dielach, geometrickým radom rastie a nie je v silách jedného človeka, aby to v akomkoľvek časovom období zvládol.

Ildikó Maňková

Košice, november 2000

Strojnícka fakulta TU Košice – edícia vedeckej a odbornej literatúry

doc. Ing. Ildikó Maňková, CSc.

PROGRESÍVNE TECHNOLOGIE
ADVANCED METHODS OF MATERIAL REMOVAL

Vydala Vienaľa, vydavateľstvo a tlačiareň Košice,
Tlač: Vienaľa,
Návrh obálky: © Jaroslav Jarema

275 strán, 276 obrázkov, 45 tabuliek, 14 AH
1. vydanie, náklad 250 výtlačkov

ISBN 80-7099-430-4

Použité symboly a označenia

A		konštanta	K		konštanta
A		atómová hmotnosť	K _b		koncentrácia abrazívnej zmesi
A	[%]	absorbcia			
A _b		objemový pomer obsahu brúsnych častíc	L	[J/kg ¹]	celková energia potrebná na natavenie
A _L	[mm/min]	lineárny úber			jednotkového množstva materiálu
A _s	[cm ²]	opracovaná plocha			dĺžka kontaktu zrna s obrobkom
B		konštanta	L _t	[m]	
B	[mm]	šírka povrchu			
C		konštanta	M		meraná oblasť
C	[g]	množstvo nosného média	M		molekulová hmotnosť
C		experimentálne stanovená konštanta reprezentujúca časť lúča v reze	N		počet zŕn v zábere
C _f		koeficient trenia	N		Avogadrovo číslo
C _D		výtokový koeficient dýzy	Q _s	[mm ² /min]	intenzita plošného úberu
			Q _v	[mm ³ /min]	intenzita objemového úberu
D	[mm]	priemer štrbiny v dýze			
E	[MPa]	Youngov modul pružnosti	R		odrazivosť (reflektivita)
E		intenzita prenosu energie	Ra	[μm]	stredná aritmetická drsnosť povrchu
E ₁		energetická hladina	R _p	[m]	hĺbka prieniku elektrónov
E ₂		energetická hladina	R _v	[m]	polomer valca pre médium
E _d	[J/mm ²]	špecifická energia pre deformačné opotrebenie	R _w	[m]	polomer obrobku
			Rz	[μm]	výška nerovností
F _c	[N]	sila pôsobiaca na časticu			
F _n	[N]	normálová sila	S	[mm]	hrúbka materiálu
F _o	[J/s ¹ .cm ²]	konštantný tepelný tok	S	[atóm/ión]	medza rozprašovania
F		Faradayova konštanta			
			T	[°K]	absolútna teplota
H ₂	[J/m ³]	obsah tepla	T ₁	[°C]	teplota
HB		tvrdosť podľa Brinella	T ₂	[°C]	teplota
HV		tvrdosť podľa Vickersa			
HRC		tvrdosť podľa Rockwella	V	[V]	urýchľovacie napätie
H _w		tvrdosť obrábaného materiálu	V	[m ³ /s]	rýchlosť prúdenia plazmy
			V _a	[m ³]	objem odobratého materiálu pre jedno zrno
I	[W.cm ⁻²]	výstupná intenzita výkonu	V _E	[m ³]	úbytok objemu elektródy
I _O	[W.cm ⁻²]	intenzita žiarenia v strede lúča	V _m	[m ³]	úbytok objemu obrábaného materiálu
			VRR	[m ³ /s]	objemový úber materiálu

Z_f	[m]	hĺbka ostrosti	k	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	koeficient tepelnej
Z		mocnosť iónov			vodivosti
Z_t		atómové číslo			
			ℓ	[mm]	dĺžka magnetostrikčného
a	[mm]	hĺbka rezu			jadra
a_s	[cm ²]	prierez iónového lúča	ℓ_g	[m]	dĺžka záberu zrna
			$\Delta\ell$		prírastok dĺžky
c	[mm]	šírka reznej medzery			
c	[m/s]	rýchlosť zvuku	m_a	[g]	hmotnosť častice
		v magnetostrikčnom	m_s	[mm]	rozmerné opotrebenia
		materiálu			nástroja
c	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	špecifické teplo	p	[MPa]	tlak kvapaliny
			r	[mm]	zaoblenie vplyvom
d	[mm]	priemer vtláčenej oblasti			rezania
d	[cm]	hĺbka úberu materiálu			
$d_{f/2}$	[mm]	hĺbka rezu (priech	r_f	[mm]	polomer sfokusovaného
		lasarového lúča do			lúča
		materiálu)	r_o	[mm]	polomer rovinného
d_j	[mm]	priemer lúča			okienka lasera
d_m	[mm]	vzdialenosť	r_0	[mm]	polomer lúča
d_m	[mm]	priemer zmiešavacej			
		trubice dýzy pre vodný	t	[mm]	hrúbka materiálu
		lúč	t	[s]	čas
d_n	[mm]	priemer štrbiny v dýze	t	[mm]	hĺbka vrypu zrna
d_o	[mm]	priemer lúča v ohnisku	t_i	[s]	čas trvania impulzu
d_g	[mm]	priemer brúsneho zrna	t_m	[s]	čas pôsobenia častice na
					povrch
f	[mm]	posuv lúča			
f	[1/s]	frekvencia zmeny	u		nepravidelnosť škáry
		magnetického poľa	u	[mm/s]	rýchlosť posuvu lúča
f	[mm]	ohnisková vzdialenosť			vody
		šošovky			
f_p	[1/s]	frekvencia impulzu	v_f	[mm/s]	rýchlosť posuvu
f_r	[1/s]	rezonančná frekvencia	v	[m/s]	rýchlosť prúdenia
					kvapaliny
h_e	[mm]	šírka medzery medzi	v_a	[m/s]	rýchlosť pohybu
		elektrodami (nástrojom a			abrazívnych častíc
		obrobkom)	v_c	[m/s]	rýchlosť rezania
h	[J.s]	Planckova konštanta	v_e	[m/s]	maximálna rýchlosť
h_e	[mm]	hĺbka zóny rezného			pohybu abrazívnych
		opotrebenia			častíc
h_d	[mm]	hĺbka zóny deformačného			
		opotrebenia	w	[mm]	šírka rezu
j	[A/mm ²]	prúdová hustota	$\ominus$		divergencia
					(rozbiehavosť) lúča

Z	uhol dopadu iónov	λ		vlnová dĺžka
Δ	dovolená odchýlka rozmerov opracovaného povrchu	λ_w		vlnová dĺžka laserového svetla
Δs	nábehová a výbehová oblasť	δ_w	[mm]	hĺbka vtlačenia zrna
α	tepelná difuzivita	ρ	[kg.m ⁻³]	merná hmotnosť
α	uhol vychýlenia lúča	ρ_a	[kg.m ⁻³]	hustota abrazívneho materiálu
α	uhol dopadu lúča na povrch	σ_o	[$\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$]	elektrická vodivosť kovu
ε_m	koeficient magnetostriekčného predĺženia	σ_r	[N/m ²]	normálové napätie pôsobiacie na zrno guľového tvaru
ε	dolná alebo horná odchýlka od nominálneho rozmeru	τ_x		kritérium krehkosti materiálu je to pomer pevnosti v strihu k pevnosti v lome daného materiálu
ε_s	elementárny náboj			
κ	[$\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$] merná vodivosť elektrolytu	θ		uhol sklonu vodného lúča pri rezaní (uhol rezania)

1 ÚVOD

Cieľom a úlohou predkladanej publikácie by mal byť súbor poznatkov o oblasti výrobných technológií, ktoré používajú na úber materiálu aj iné formy energie ako je čisto mechanická energia. Autorka zdôrazňuje výraz „mal byť“ z dôvodu, že iba čitateľ, ktorý hľadá relevantné informácie bude vedieť posúdiť, či tento cieľ kniha naplnila. Napriek tomu, poznatky zhromaždené v tejto publikácii budú iste zaujímavé pre široký okruh technicky ale aj netechnicky zameraných záujemcov.

Výrobné technológie, ktoré využívajú známe fyzikálne a chemické javy na úber materiálu (akustické vlnenie, vysokotlakový vodný lúč, plazmu, tok fotónov – laser, elektrický výboj, elektrolýzu, tok elektrónov a iónov) zaznamenávajú prudký rozvoj v druhej polovici XX. storočia ako výsledok intenzifikácie výskumu a vývoja:

- špeciálnych oblastí fyziky (kvantová elektronika),
- nových druhov konštrukčných materiálov (kompozitné materiály, keramika),
- sofistikovaných technológií spracovania materiálov,
- a nástupu počítačovej techniky.

Využitie týchto metód predstavuje niekedy **alternatívu** a/alebo **variant** k tradičným technológiám (dnes niekedy nazývaným klasickým technológiám). Je potrebné zdôrazniť slová „alternatíva“ a „variant“, aby nedošlo k mylnej predstave a k preceňovaniu možností týchto technológií spracovania materiálov a výroby dielcov.

Predkladaná publikácia podáva čitateľovi pohľad na súčasný stav poznatkov a na perspektívy ďalšieho vývoja „netradičných“ technológií, v súčasnosti označovaných tiež ako progresívne technológie. Názvom predkladanej publikácie ako aj pozadím vývoja týchto technológií chce autorka podporiť toto označovanie.

Publikácia vysvetľuje a objasňuje pojmy, ktoré vzhľadom na silný vplyv anglosaskej odbornej literatúry (prevažne amerických, čiastočne nemeckých a japonských zdrojov v anglickom preklade) vnášajú mnohokrát nejednotnosť do používania a interpretácie názvov. Na druhej strane je potrebné zdôrazniť, že využitie niektorých procesov netrvá tak dlho a nie je ani tak široké, aby bol vytvorený vhodný slovenský ekvivalent jednotlivým pojmom, názvom a javom, ktoré charakterizujú technológiu alebo jej sprievodné javy. Z uvedeného dôvodu sú v jednotlivých kapitolách publikácie uvádzané (*v zátvorke zošikmeným písmom*) zaužívané anglické označenia pojmov a javov.

„Netradičné, nekonvenčné, progresívne, špeciálne“

Tieto, technickej verejnosti známe prívlastky, sa používajú na odlíšenie technológií spracovania materiálov, ktoré na vytvorenie požadovaného tvaru dielca využívajú iné formy energie než mechanickú. Čitateľa možno napadne otázka, prečo toľko odlíšení. Na otázku, čo je správne, čo je dohodnuté určitou konvenciou, nie je jednoznačná odpoveď a to má potom za následok mnohé nepresnosti interpretácie. Zavedenie určitej pojmovej disciplíny si vyžaduje vidieť aj pozadie vývoja týchto technológií, ako aj rôzne prístupy jednotlivých vedeckých škôl.

V technológii obrábania sa pod prívlastky „nekonvenčný, netradičný“ zaraďujú technológie opracovania materiálov, ktoré nepoužívajú „klasický“ rezný nástroj s určitou alebo neurčitou reznou hranou (podľa toho, či ide o rezanie alebo brúsenie), ale využívajú k úberu materiálu pôsobenie rôznych fyzikálnych alebo chemických javov.

Pomenovaním „nekonvenčné“ v zmysle opačne ku konvenčnému, používané u nás dnes už klasikmi technológie obrábania *Hirschfeld (1953)*, *Přikryl, Vigner (1984)*, *Buda, Békés (1967)* sa od začiatku ich vývoja a priemyselného uplatnenia až po súčasnosť charakterizovali predovšetkým elektrofyzikálne a elektrochemické metódy obrábania.

Používanie názvu „nekonvenčné technológie“ podporila aj vedecká spoločnosť CIRP (Medzinárodná spoločnosť pre bádanie v strojárkej výrobe so sídlom v Paríži) vo svojich periodicky vydávaných dokumentoch *Annals of the CIRP*, kde v roku 1986 publikovali *Snoyers, Staelens a Dekeyser (1986)* základnú klasifikáciu fyzikálno-chemických metód úberu materiálu pod názvom *Non-conventional Material Removal Processes* (v preklade *Nekonvenčné procesy úberu materiálu*). V tomto vedeckom príspevku boli klasifikované nekonvenčné technológie obrábania podľa použitého zdroja energie na úber materiálu. Zároveň sa tento príspevok stal východiskom pre systematické triedenie poznatkov o rozdielnych spôsoboch výroby dielcov.

Možno konštatovať, že názov „nekonvenčné technológie“ je medzi technickou verejnosťou často používaný a jeho význam je viac-menej spojený s elektrofyzikálnymi a elektrochemickými technológiami.

Pomenovanie „netradičné technológie obrábania“ (anglicky: *Nontraditional Method of Machining*) je zaužívané v americkej odbornej literatúre, reprezentovanej odbornou spoločnosťou ASME (Americká spoločnosť strojných inžinierov), ktorá okrem iného vydáva v periodických cykloch rozsiahlu encyklopedickú publikáciu *Handbook of Machining* (v preklade *Príručka obrábania*), kde klasifikuje a popisuje jednotlivé netradičné postupy obrábania. Toto pomenovanie sa u nás začalo používať v 90-tych rokoch XX. storočia.

Výstižné triedenie procesov obrábania podľa prevládajúceho mechanizmu úberu materiálu podáva *Kaczmarek (1976)* vo svojej knihe *Principles of Machining by Cutting, Abrasion and Erosion*, (v preklade *Princípy obrábania rezaním, abrazívnym pôsobením a eróziou*), kde procesy úberu materiálu, ktoré využívajú iné zdroje energie ako energiu mechanickú zaraďuje do kategórie erozívne obrábanie, čo vyplýva z podstaty úberu materiálu v týchto procesoch. Uvedené triedenie je v našich podmienkach menej zaužívané.

Vzhľadom na to, že okrem technológie obrábania sa fyzikálny princíp ultrazvuku, lasera, plazmy, iónov a elektrónov používa, aj v iných výrobných technológiách, vyššie uvedené prívlastky sú doplnené ďalším spojením a to „špeciálne technológie“. Tento názov sa používa napr. pre technológie zvarovania (*Turňa, M.: Špeciálne metódy zvarovania, 1989*) alebo technológie tvárnenia (*Mielnik, E. Metalworking Science and Engineering, 1991*). V technológii obrábania sa pomenovanie špeciálne technológie spája skôr s dokončovacími spôsobmi obrábania ako lapovanie, superfinišovanie, leštenie pásmi a technológiami výroby ozubených kolies.

V ostatných rokoch sa čoraz častejšie v súvislosti s týmito technológiami objavuje spojenie *Advanced* Method of Machining* (McGeough, 1988), (Taniguchi, 1989) (v preklade moderné alebo progresívne/pokrokové metódy obrábania).

Najnovšie sa začína zaužívať aj pomenovanie *Innovative Manufacturing Processes* (van Luttervelt 1989, Eversheim 1993, Köhnig 1997, Tonshoff 1993) (inovačné výrobné procesy).

Otázkou zostáva, či je potrebné tieto výrobné technológie používaním rôznych prívlastkov odlišovať od bežne zaužívaných tzv. „klasických“ procesov. Odborná verejnosť zatiaľ nie je jednotná v tejto oblasti. Mnohokrát neprirodzene vyznieva označenie „nekonvenčná technológia“ pre elektroiskrové procesy, ale aj laser a ďalšie, ktoré sa stávajú dnes už bežne používanými výrobnými prostriedkami modernej priemyselnej výroby. Ako príklady možno uviesť elektroiskrové hĺbenie tvárniacich nástrojov, rezanie/delenie materiálov laserom, vodným lúčom, laserové technológie v automobilovej výrobe, vo výrobe integrovaných obvodov a iné.

Napriek vyššie uvedenému, ukazuje sa, že pomenovanie „progresívne technológie“ v spojení s týmito výrobnými postupmi, má svoje opodstatnenie v tom, že tieto postupy vždy predstavovali technologický pokrok vo výrobe, rovnako ako procesy riadenia a automatizácie.

Ich progresivita spočíva v tom, že sú založené na elektrických, chemických a tepelných princípoch úberu materiálu (v prípade obrábania), kde v priebehu procesu nástroj a obrobok nie sú v priamom kontakte, ale v určitej regulovateľnej vzdialenosti od seba. To je celkom odlišné od väčšiny klasických (tradičných) spôsobov úberu materiálu obrábaním, kde je materiál odoberaný vplyvom mechanického namáhania strihom/šmykom (sústruženie, frézovanie, vŕtanie...) alebo abrazívnym pôsobením nástroja na povrch (brúsenie). Zároveň je pre nich charakteristické, že procesy riadenia, optimalizácie a automatizácie sú ich prirodzenou súčasťou a predstavujú sofistikované inteligentné prostredie riadiaceho systému stroja a procesu. Samozrejme bude na čitateľovi a odbornej verejnosti aké stanovisko zaujme k predkladanému názvu, veď progresívne môže byť všetko, čo sa len trochu líši od bežne zaužívaného alebo klasického procesu.

1.1 Význam a pojem technológia

Limitujúcim faktorom úrovne strojárkej výroby je použitá technológia. Použitá technológia preto, že ona stanovuje nároky na spotrebu energie, teda určuje energetickú náročnosť výroby, spotrebu surovín a stupeň ich využitia. Stanovuje funkčné, úžitkové, dekoratívne a komerčné vlastnosti výrobkov a tým vlastne podmieňuje rozvoj celého počtu výrobných odvetví.

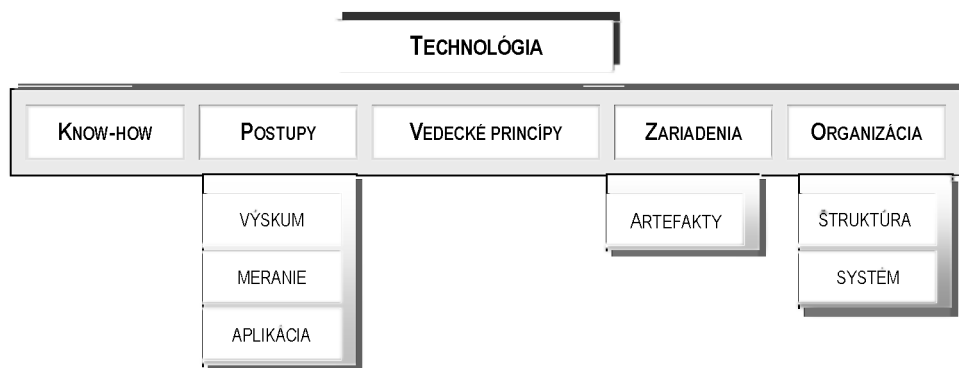
Technológia je súbor procesov, pravidiel a návykov používaných pri výrobe rôznych druhov produkcie v ľubovoľnej sfére výrobnjej činnosti. Lowe [2] uvádza, že technológia je vedný odbor, odvetvie ľudských znalostí, kde sa aplikujú vedecké princípy a praktické znalosti do fyzikálnej podstaty a systémov. Technológia má celkovú štruktúru a klasifikáciu, obr.1.1.

* Z angličtiny: *advanced* - znamená (moderný, pokrokový, vzostupný, posun, zlepšenie, stúpať, zvýšiť napr. *advanced management* – pokrokové, moderné riadenie). Pre doplnenie je potrebné uviesť, že v slovenskom jazyku používaný pojem progresívny v zmysle pokrokový v anglickom preklade nesmie byť *progressive*, pretože sa mení jeho význam. Anglický výraz *progressive* znamená totiž postupné napr. *progressive hardening* – postupné kalenie (pozn. autora).

Konkrétna technológia obsahuje hlavnú časť formalizovaných, prenosných vedeckých poznatkov a má jednoznačné atribúty ako sú jedinečné postupy pre výskum, meranie a priemyselnú aplikáciu.

Technológia je úzko spojená s vývojom poznania, vedy a techniky a je založená na všetkých vedeckých a praktických poznatkoch ľudstva. Technológia podnecuje vznik nových oblastí vedy a techniky, vytvára materiálnu a informačnú základňu ich rozvoja.

Technológia je podľa výkladových slovníkov komplex vedeckých poznatkov, ktorých cieľ a podstata spočíva vo výskume výrobných prostriedkov a procesov, v odkrývaní a formulácii zákonov a princípov výrobných procesov a v príprave základne pre optimalizáciu výrobných procesov.



Obr.1.1 Štruktúra technológie (zdroj:Lowe [2])

Samotný pojem technológia* (angl. *technology*) sa v súčasnosti chápe a používa v širších súvislostiach, než ako to bolo zaužívané v našich podmienkach. Ešte v nedávnej minulosti sa spájala iba s pojmom strojárská technológia a mnohokrát iba s technologickým postupom výroby dielcov, čím sa technológia degradovala do polohy málo vedeckého a skôr empirického návodu na výrobu a strácala na význame. Vývoj v posledných desaťročiach XX. storočia posunul pojem technológie a tým aj strojárskej technológie do inej polohy, ktorá rozlišuje dva prístupy jej ponímania:

- i) Technológie ako súčasť rozvoja vedy a spoločnosti
- ii) Technológie uplatňované priamo vo výrobe.

ad i) Technológie súvisiace s rozvojom spoločnosti vychádzajú zo všeobecne poňatého pojmu technológie ako súboru vedeckých poznatkov a definujú nové a novokoncipované vedné odbory ako sú informačné technológie, biotechnológie, technologický vývoj krajín tretieho sveta, nukleárne technológie, ľudský faktor a technológie, technológie životného prostredia, náuka o mori a morské technológie, ale tiež priemyselné a materiállové technológie.

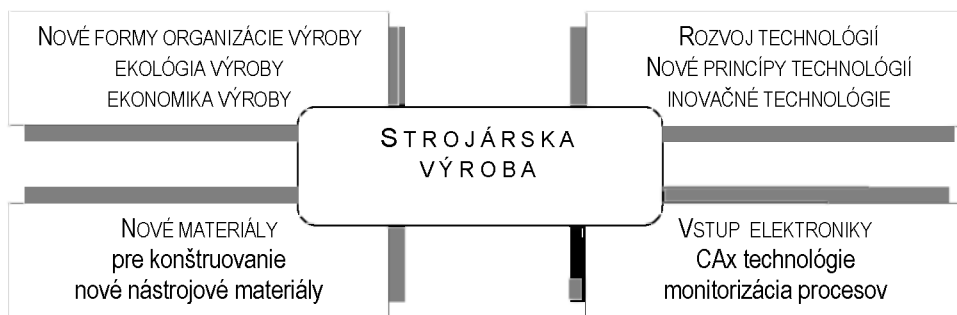
* slovné spojenie pochádzajúce zo starovekej gréčtiny, kde význam *techné* je poznatok, zručnosť a *logos* veda, náuka. Podľa slovníka cudzích slov technológia je náuka o prostriedkoch a procesoch, ktorými sa suroviny menia na výrobky (pozn. autora).

ad ii) Technológie uplatňované priamo v procese výroby predstavujú komplex vied, ktorých cieľom je odkryvanie a formulácia zákonov a princípov priemyselnej výroby. Technológia tvorí a rozvíja teoretickú základňu priemyselnej a teda aj strojárskkej výroby a jej úlohou je prinášať pokrok v technologickej a vedeckej základni a rozvíjať princípy výroby namiesto empirie a improvizácie.

1.1.1 Technológia strojárskkej výroby

Vývoj poznania silne ovplyvňuje rozvoj priemyselnej a teda aj strojárskkej výroby, pre ktorú predstavuje synergiu najnovších poznatkov vedy a techniky v štyroch základných skupinách ako to znázorňuje obr.1.2:

- vývoj nových materiálov (konštrukčné a nástrojové materiály)
- vývoj nových a inovovaných princípov technológie spracovania materiálov,
- automatizácia, elektronizácia a CAx technológie (*Computer Aided*),
- nové formy organizácie výroby.



Obr.1.2 Súčasné súvislosti rozvoja strojárskkej výroby

Z toho vyplývajú aj nové prístupy k technológii, konkrétne k technológii strojárskkej výroby a jej definícii, klasifikácii a chápaniu. Pre jasnejšiu orientáciu čitateľa sú ďalej vysvetlené jednotlivé pojmy spojené s technológiou strojárskkej výroby podľa najnovších poznatkov a prístupov jednotlivých vedeckých škôl.

Výroba (*Production*) je systém procesov, ktorých výsledkom je produkt (výrobok, predmet). Je to postupnosť funkcií, ktoré vedú k tvorbe produktov spracovaním alebo spájaním materiálov a potom ich montážou na finálny výrobok.

Strojárska výroba (*Production* (Manufacturing) Engineering*) je výber výrobných prostriedkov a výrobných metód za účelom optimalizácie použitia výrobkov podľa technologických kritérií. Strojárska výroba zahŕňa návrh a konštrukciu výrobku, technológiu

* označovanie *Manufacturing* je v americkej odbornej literatúre, anglická odborná literatúra používa slovo *Production* (pozn. autora).

výroby a výrobný proces, výrobu nástrojov a zariadení ich údržbu a informácie potrebné na zabezpečenie hospodárnosti a ekonomiky výroby. Technológia a strojárka výroba sú vzájomne spojené ako teória a prax.

Výrobný proces (*Production Process*) je súbor činností ľudí, strojov a procesov, ktorých výsledkom sú určité druhy výrobkov. Zahrňuje hlavné výrobné procesy (výroba polovýrobkov, dielcov a montáž), pomocné výrobné procesy (opravy, výroba náradia, modelov, náhradných dielcov) a vedľajšie procesy (skladové hospodárstvo, doprava, energetické hospodárstvo, skúšobne, laboratória...).

Technológia strojárkej výroby (*Production Engineering Technology*) je komplexná vedná oblasť, ktorej predmetom skúmania je podstata, vzájomné vzťahy a zákonitosti procesu výroby dielcov, zariadení a strojov. Posudzuje existujúci spôsob výroby a hľadá nové spôsoby premeny materiálu na polotovary, dielce a výrobky. Zabezpečuje požadovanú kvalitu predmetov na požadovanej ekonomickej, ale v súčasnosti už aj na požadovanej ekologickej úrovni.

Klasické chápanie technológie strojárkej výroby delí výrobu na fázy a stupne, kde sa uplatňuje špecializácia pri výrobe dielcov a kooperácia pri kompletizácii hotových výrobkov. Nevýhodou tejto del'by v modernej flexibilnej a počítačom riadenej výrobe sú časové, energetické a materiálové straty. Pre odstránenie týchto strát sa uplatňujú tendencie spájania a hovorí sa o integrovanej technológii a komplexnej technológii.

Integrovaná technológia zlučuje jednotlivé medzistupne a fázy výroby tak, že technologická schéma sa zjednodušuje na vstupné prvky (materiál, energia...) a na výstup finálnych výrobkov. Integrované technológie na základe výrobného postupu materiálu a využívania energie spájajú jednotlivé technologické operácie a procesy do jedného výrobného celku.

Komplexná technológia zahrňuje celý systém problematiky od suroviny, materiálu, energie, spracovania a zužitkovania odpadu, vplyvov na životné prostredie, cez používanie výrobku jeho životnosť až po likvidáciu použitého výrobku a s tým spojené všestranné ekologické vplyvy. Komplexná technológia a jej rozvoj si vyžaduje oproti klasickému postupu systémový prístup, kde je potrebné zapojiť do jedného celku okrem čisto technických a technologických faktorov aj ďalšie, ekologické, energetické a sociálne faktory. Jej výsledkom má byť dosiahnutie vytýčených cieľov v plánovanom časovom slede s primeranými ekonomickými a ekologickými parametrami.

Súčasťou technológie strojárkej výroby sú **technológie spracovania materiálov** (*Materials Processing Technology*), ktoré sa obyčajne delia na:

- zlievanie, liatie,
- prášková metalurgia
- tvárnenie a tvarovanie,
- obrábanie,
- zváranie a spájanie,
- povrchové úpravy

Novšia klasifikácia, ktorú prezentujú publikácie vedeckej spoločnosti CIRP (1986) a v doplnenej a upravenej forme *Vasilko* (1998), delí technológie spracovania materiálov na šesť základných druhov, ktoré sa líšia spôsobom realizácie vo výrobe, technologickými zvláštnosťami a výsledným efektom. Od vyššie uvedeného delenia sa odlišuje tým, že presnejšie špecifikuje dosah jednotlivých technológií:

- A) **Procesy delenia materiálov:** využívajú sa prednostne vo výrobe polovýrobkov, na delenie využívajú plastické alebo krehké porušovanie materiálu, (lámanie, strihanie, delenie rezaním a pod.)
- B) **Procesy spájania materiálu:** (zváranie, spájkovanie, spekanie, lisovanie, zlepovanie...)
- C) **Procesy tvarovania materiálu a polovýrobkov** (procesy zmeny tvaru): tieto sa delia na podskupiny a to:
- C1) tvarovanie materiálu v tekutom stave (liate, zlievanie)
 - C2) tvarovanie materiálu plastickou deformáciou (tvárnenie)
 - C3) tvarovanie práškovou metalurgiou (lisovanie práškov, spekanie, izostatické lisovanie - HIP)
 - C4) tvarovanie rezaním materiálu (obrábanie rezaním, brúsenie)
 - C5) tvarovanie odstraňovaním materiálu fyzikálne – chemickým úberom (elektroiskrové a elektrochemické obrábanie, laser...)
- D) **Procesy zmeny fyzikálne – mechanických vlastností materiálov:** (tepelné spracovanie, termomechanické spracovanie, chemicko – tepelné spracovanie, galvanizovanie...)
- E) **Rozmerové opracovanie dielcov** (zmena rozmerov): odstraňujú sa nepresnosti po predchádzajúcich operáciách (nepresnosti tvaru, rozmerov a polohy plôch odoberaním špeciálne ponechaného prídavku), zabezpečuje sa vysoká presnosť výroby (lapovanie, chemické frézovanie, iónový a elektrónový lúč, mikrorezanie a nanotechnológie.
- F) **Procesy zmeny stavu povrchu** (dokončovanie povrchov): čiastočne sa prelínajú s rozmerovým opracovaním dielcov, využívajú sa procesy, ktoré zlepšujú a vylepšujú kvalitu povrchu, či už zmenou rozmerov (vysokopresné brúsenie, honovanie...), či tvorením vrstiev resp. zámernou zmenou stavu povrchu (iónové technológie ako je iónová implantácia a nanotechnológie.

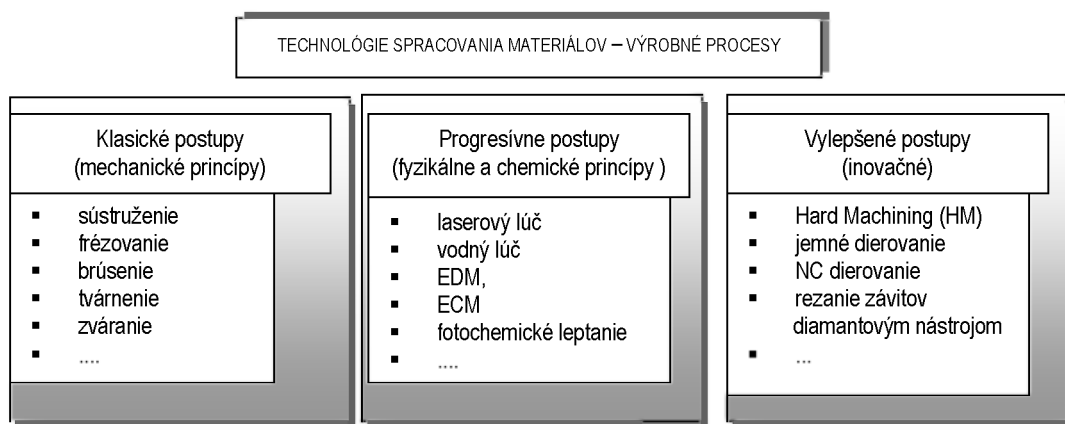
Samozrejme jednotlivé vyššie uvedené skupiny technológií spracovania materiálov je možné ešte ďalej deliť a špecifikovať podľa použitej operácie.

Z vyššie uvedeného delenia vyplýva, že dnes existuje široké spektrum technologických procesov a operácií, ktoré je možné roztriediť podľa stupňa ich postupného vývoja a priemyselného používania do troch kategórií, ako to prezentuje *van Luttervelt* 1989 [3], na procesy označené ako:

- klasické resp. konvenčné technológie založené na mechanickej povahe spracovania materiálov ako sú obrábanie sústružením, frézovaním, tvárnenie, zváranie a ďalšie,
- doplnkové, progresívne, založené na fyzikálnej a chemickej povahe dejov pri spracovaní materiálov ako laserový lúč, elektrochemické a elektroiskrové obrábanie, fotochemické leptanie, ale aj hydrodynamické obrábanie – vodný lúč a iné,
- vylepšené, inovačné metódy spracovania materiálov ako obrábanie tvrdých materiálov (*Hard Machining*), vysokorýchlostné obrábanie, jemné dierovanie a presné strihanie, NC dierovanie a iné.

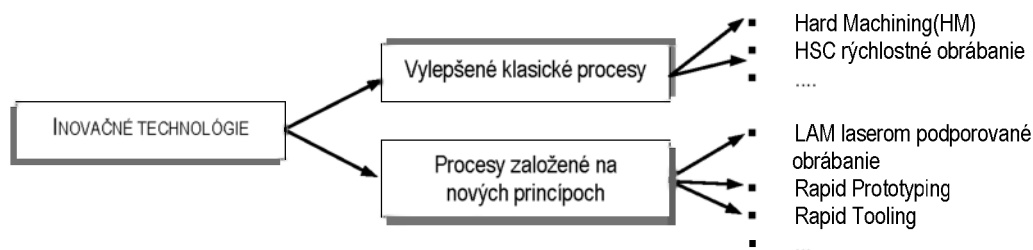
Vyššie uvedené rozdelenie znázorňuje obr.1.3.

Je len samozrejmé, že v popredí záujmu výskumnej, ale najmä priemyselnej sféry sú inovačné technológie. Tento záujem je úzko spojený so stratégiou vývoja nových materiálov a metódami ich spracovania, s cieľom zvyšovania konkurencieschopnosti produktov. Tento cieľ nadobúda takmer olympijské dimenzie charakterizované heslom „lepšie, lacnejšie a rýchlejšie“ (*better, cheaper, faster*). To znamená lepšia kvalita pri minimálnych nákladoch za kratší čas na výrobu produktu.



Obr.1.3 Hlavné typy výrobných procesov

Smery rozvoja inovačných technológií, ktoré vyplývajú zo súčasných poznatkov ukazuje obr.1.4. Inovačné technológie sú vo svojom vývoji orientované dvoma smermi a to:



Obr.1.4 Smery vývoja inovačných technológií

- na vylepšovanie klasických technológií napr. extremizáciou rezných podmienok, ako je používanie vysokých rezných rýchlostí (vysoké v porovnaní s klasickými technológiami) pri rýchlostnom obrábaní (*HSC High Speed Cutting*), alebo nízke posuvy pri jemnom obrábaní

resp. malé prierezy odrezávanej vrstvy, (opäť malé v porovnaní s bežne zaužívanými podmienkami) pri obrábaní tvrdých materiálov (*HM Hard Machining*),

- na vývoj a využitie nových princípov v technológiách, dobrým príkladom je využitie laserového lúča pri obrábaní (LAM t.j. laserom podporované rezanie a brúsenie), a pri technológiách *Rapid Prototyping* (rýchle zhotovovanie prototypov) a *Rapid Tooling* (rýchle zhotovovanie nástrojov).

Pozadie, priemyselné využitie a smery ďalšieho vývoja progresívnych a inovačných technológií spracovania materiálov je možné zjednodušene charakterizovať nasledovne:

i) Pozadie a trendy vývoja technológií spracovania materiálov vychádzajú zo zvyšujúcich sa požiadaviek:

- na sortiment a zložitosť výrobkov;
- na zdokonalenie konštrukcie strojov;
- na presnosť, spoľahlivosť a životnosť dielcov a výrobkov.

ii) Nasadenie a využívanie progresívnych a inovačných technológií v priemyselnej výrobe sleduje rozvoj poznatkov v oblastiach:

- zákonitostí procesov získavania a spracovania materiálov;
- zákonitostí funkcie strojov;
- zákonitosti toku informácií a ich spracovanie (tok informácií a ich prenos je najdôležitejším článkom progresívnych a inovačných technológií).

iii) Smery ďalšieho vývoja progresívnych a inovačných výrobných technológií sú úzko spojené s:

- vývojom nových materiálov,
- vývojom nových metód výroby súčiastok
- vývojom automatizovaných technologických procesov a technických prostriedkov na ich realizáciu.

Samozrejme je potrebné zdôrazniť skutočnosť, že ani klasické výrobné technológie nezaostávajú za rozvojom poznatkov, ale naopak využívajú ho v plnej miere. Dôkazom toho v obrábaní je okrem iného používanie nástrojov z reznej keramiky, ktoré patrí v súčasnosti už k bežným spôsobom jemného a presného sústruženia.

1.2 Klasifikácia spôsobov obrábania

Jednu časť technológie spracovania materiálov tvorí obrábanie, ktoré vo vyššie uvedenej klasifikácii nespadá iba do jednej skupiny, ale podieľa sa na delení materiálov, tvarovaní materiálov rezaním a fyzikálno-chemickým pôsobením, rozmerovým opracovaním dielcov a dokončovaním povrchov.

Obrábanie (*Machining*) je široký pojem, ktorý zahŕňa všetky metódy tvarovania produktov postupným odoberaním určitého množstva materiálu, ktorý sa nazýva **prídavok** (*allowance*).

Obrábanie je dynamická technológia, ktorá zahŕňa niekoľko vedných odborov a patrí na popredné miesto vo výrobných technológiách, jednak podielom celkovej prácnosti výroby dielcov, ktorá predstavuje okolo $25 \div 30\%$ a jednak svojou podstatou, ktorou zabezpečuje kvalitatívnu stránku výrobkov a v konečnom dôsledku ich vyššiu pridanú hodnotu.

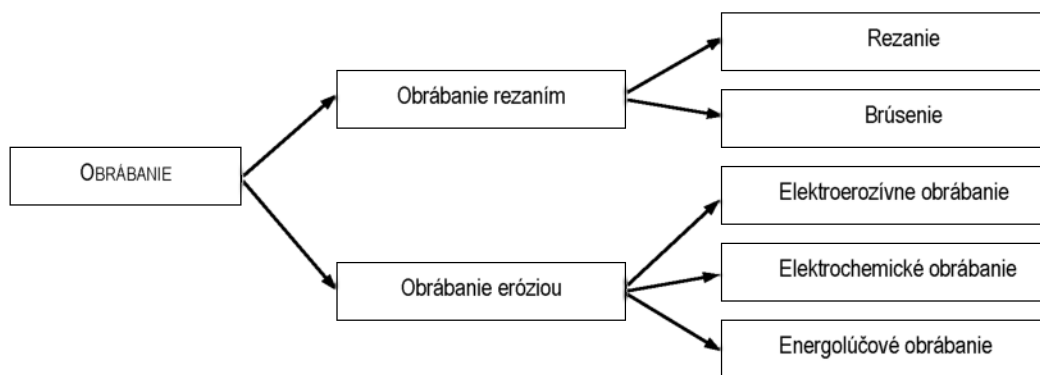
Z hľadiska klasifikácie spôsobov obrábania existuje viacero prístupov, ktoré vychádzajú z postupného vývoja metód obrábania. V počiatkoch vývoja náuky o obrábaní, keď boli položené prvé vedecké základy teórie rezania (v druhej polovici XIX. storočia **I. A. Time, 1870**) technológia spracovania materiálov sa delila na technológiu mechanickú a chemickú a obrábanie materiálov spadalo do skupiny mechanickej technológie spolu s tvárnením materiálov, **Hirschfeld, (1953)**.

Neskôr v 50-tych a 60-tych rokoch XX. storočia a potom v 70-tych rokoch pôvodné jednoduché rozdelenie bolo nahradené rozdelením podľa princípu úberu materiálu z východiskového polotovaru, ako dôsledok prudkého rozvoja náuky o obrábaní.

Buda, Békés (1967) Příkryl (1967), Příkryl, Vigner (1984), charakterizujú obrábanie ako technologický proces, pri ktorom požadovaný tvar a rozmer obrobku vzniká postupným odoberaním častíc materiálu mechanickými, elektrickými, chemickými postupmi, prípadne ich kombináciou. Materiál sa teda pri obrábaní odoberá:

- mechanickým postupom t.j. oddeľovaním častíc materiálu reznou hranou vo forme triesky (rezanie, brúsenie),
- tavením častíc materiálu z obrobku účinkom vysokoenergetických lúčov (laser, plazma elektrónový lúč),
- elektrochemickým rozpúšťaním častíc materiálu.

Kaczmarek (1976) delí technológiu obrábania na rezanie (*Cutting*) a obrábanie eróziou (*Machining by erosion*), pretože obe vykazujú podobné charakteristiky a aplikácie, aj keď používajú rôzne formy energie. Mechanickú energiu pre rezanie a elektrickú, chemickú a tepelnú energiu pri erózii. Spoločnou črtou oboch procesov je, že výsledný tvar produktu sa dosahuje úberom určitého množstva materiálu. Obr.1.5. ilustruje klasifikáciu metód obrábania, ktorú uvádza **Kaczmarek** a najnovšie **Grzesik (1998)**.



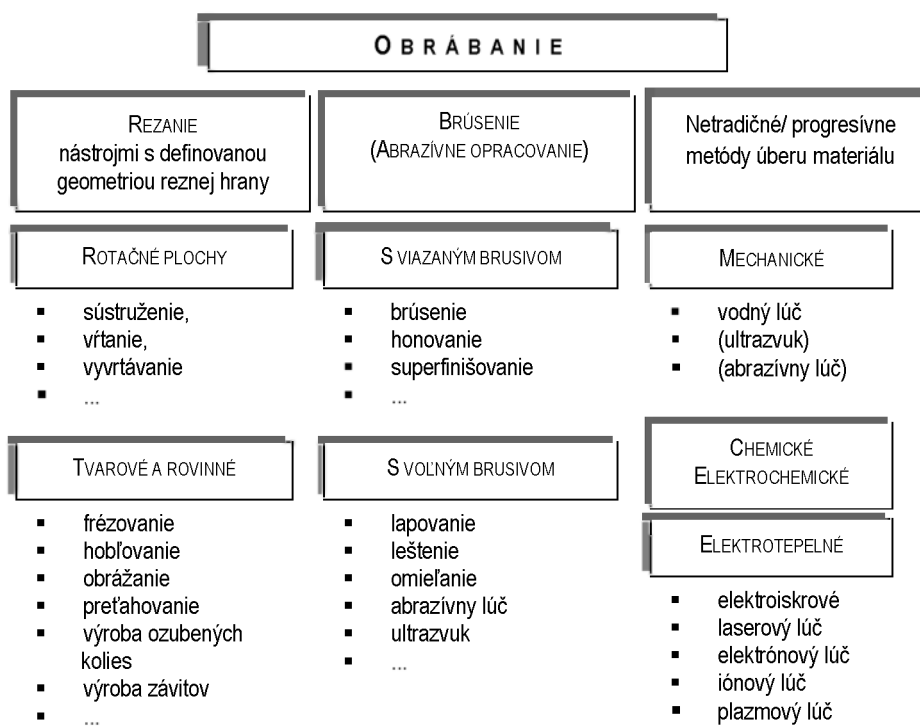
Obr.1.5 Klasifikácia spôsobov obrábania (**Kaczmarek, 1976**)

Obrábanie rezaním (*Machining by cutting*) má významnú úlohu z hľadiska možností použitia pre svoju všestrannosť a schopnosť dosiahnuť najvyššie pracovné presnosti.

Obrábanie eróziou rozširuje a dopĺňa pracovné možnosti obrábania rezaním, obzvlášť v prípade ťazkoobrobiteľných materiálov a materiálov, ktoré vôbec nie je možné obrábať rezaním.

V poslednom desaťročí najmä anglosaské **Kalpajian (1989)** a nemecké pramene **König, Klocke (1997)**, delia obrábanie do troch kategórií, obr. 1.6:

- Rezanie (*Cutting*), ktoré zahŕňa obrábanie nástrojmi s definovanou geometriou reznej hrany, nástroj má jednu alebo viacero rezných hrán, (z nem. *Zerspannung mit geometrisch bestimmter Schneide*)
- Abrazívne opracovanie – brúsenie, tiež definované nemeckou literatúrou ako opracovanie nástrojmi s neurčenou geometriou reznej hrany (z nem. *Zerspannung mit geometrisch unbestimmten Schneiden*)
- Progresívne, alebo netradičné procesy obrábania, ktoré využívajú na úber fyzikálne, elektrické, chemické a iné zdroje energie (pretože nejednotnosť v pomenovaní, kniha uvádza obe názvy ako ekvivalentné).



Obr. 1.6 Klasifikácia procesov obrábania*

* ultrazvuk a abrazívny lúč sa v tejto klasifikácii vyskytujú dvakrát, raz ako procesy brúsenia voľným brusivom a raz v zátvorke ako mechanické procesy netradičných/progresívnych technológií. Vysvetlenie tejto disproporcie vyplýva z podstaty úberu materiálu a podrobnejšie je podané v kapitole 2.

Každá kategória je charakterizovaná spoločnými určujúcimi znakmi úberu materiálu a zvláštnosťami procesu pri vzájomnom porovnávaní.

Pri rezaní je odrezávaná vrstva materiálu odoberaná nástrojom s jednou alebo viacerými reznými hranami s určitou geometriou vo forme voľným okom viditeľnej triesky. Nástroj je v priamom kontakte s obrobkom. Geometria nástoja je určená a používaná podľa normy STN ISO 3002/1 (22 0011) a STN 22 0012

Pri brúsení, tiež nazývanom abrazívne opracovanie, je prídavok na obrábanie odoberaný nespočítateľným množstvom rezných hrán brusiva s geometricky určenou reznou hranou, vo forme rozmerovo veľmi malej triesky (mikrotriesky, popisne uvádzanej ako voľným okom neviditeľnej častice). Jednotlivé brúsne zrná sú v priamom kontakte s povrchom obrobku.

Progresívne metódy úberu materiálu používajú okrem mechanickej energie aj iné formy energie na odobratie materiálu vo forme voľným okom neviditeľných častíc (mikro až nano častice). Na tvarovanie povrchu materiálu nevyužívajú priamy kontakt nástoja (v klasickom ponímaní geometrického telesa s určitou alebo neurčitou reznou hranou), ale elektrické, tepelné a/alebo chemické účinky fyzikálnych javov.

Ako vyplýva z dejín obrábania, ktoré síce patrí medzi najstaršie odbory techniky, ale svoj vrchol rozvoja dosahuje v druhej polovici XX. storočia, mechanické obrábanie (rezanie a brúsenie) potrebuje pre svoje uskutočnenie naplnenie troch základných podmienok:

1. Materiál rezného nástoja má byť tvrdší ako materiál obrobku. Táto podmienka si vynútila pojem obrobiteľnosti materiálov a na istý čas obmedzila využívanie vysokopevných konštrukčných materiálov v priemysle. Stratégia používania nových materiálov zároveň však podnietila vývoj nástrojových materiálov a nástrojov do takej miery, že dnes ich výrobcovia disponujú sortimentom umožňujúcim obrábať nielen ťažkoobrobiteľné materiály, ale aj riadiť tvar vznikajúcej triesky.
2. Podstata mechanického obrábania (rezania a brúsenia) je v poznaní, že pri rezaní musí byť vynaložené určité množstvo mechanickej energie na porušenie molekulárnej súdržnosti materiálu. Táto podmienka obmedzuje použitie rezania v oblastiach, kde na obrobok nemožno pôsobiť veľkou silou ako napr. vŕtanie veľmi malých otvorov do kalených ocelí, vŕtanie otvorov so zakrivenou osou a iné.
3. K uskutočneniu obrábania rezaním a brúsením je potrebné splniť podmienku, aby akýkoľvek existujúci zdroj energie vyššieho druhu bol najprv premenený na najjednoduchšiu energiu – mechanickú energiu, ktorú možno použiť na obrábanie.

Tieto podmienky sú typické a spoločné pre rezanie a brúsenie. **Brúsenie** (tiež abrazívne opracovanie) má ešte niektoré odlišnosti a zvláštnosti v porovnaní s procesom rezania. Tieto odlišnosti sú dané:

- Použitým „nástrojom“, ktorý má neurčité množstvo rezných hrán vo forme viazaného alebo voľného brusiva.
- Rôznorodosťou geometrie zrna brusiva a neurčitosťou ich vzájomnej polohy, čo má za následok nepravidelný úber triesky s premenlivým prierezom.

- Malé prierezy triesok, voľným okom neviditeľné tzv. mikrotriesky, niekedy aj vo forme iskier alebo prachu (s prierezom rádovo okolo 10^{-3} mm^2) a vysoké rezné rýchlosti ($30 \div 100 \text{ m/s}$) v porovnaní s procesom rezania.

Progresívne/netradičné technológie úberu, ako už bolo spomenuté vyššie, využívajú elektrickú, chemickú a tepelnú energiu na úber materiálu a okrem spoločnej črty obrábania (úber materiálu) majú významné odlišnosti od procesov rezania a brúsenia:

- V mieste oddeľovania častíc materiálu nevzniká rezný odpor, rezná sila, obrobky sa nedeformujú vplyvom mechanického zaťaženia.
- Úber materiálu nezávisí na mechanických vlastnostiach materiálu ako tvrdosť, pevnosť, húževnatosť a klasický pojem obrobitelnosť stráca svoj význam.
- Úber materiálu - oddeľovanie častíc je počas jedného cyklu (napr. jeden impulz výboja pri elektroiskrovom opracovaní) a dochádza k nemu na veľkom počte lokalít súčasne. V závislosti na rozmeroch odoberaných častíc, môže byť úber materiálu vyjadrený jedno- dvoj alebo trojrozmernými hodnotami t.j. dĺžkou, plochou, prierezom alebo objemom.

Zároveň prevažujúcim princípom úberu materiálu je erózívne a tepelné pôsobenie vysokoenergetických lúčov (laser, plazma, elektroiskrový výboj, elektróny, vodný lúč) na povrch. Samozrejme podľa klasifikácie a delenia týchto technológií viď obr. 1.6, k ďalším mechanizmom úberu patrí chemické a elektrochemické rozpúšťanie materiálu a tiež brúsny účinok voľného brusiva pri ultrazvukovom obrábaní a obrábaní prúdom abraziva.

Charakteristiky jednotlivých známych progresívnych metód úberu materiálu podľa vyššie uvedenej klasifikácie (obr.1.6) sú obsahovou náplňou predkladanej publikácie.

Literatúra ku kapitole 1:

1. Beňo, J.; Maňková, I.: Rozvoj technológie trieskového obrábania. II. Konferencia StrojexpoCassovia 24.-27.október 1995 Košice, Separátny výtlačok
2. Lowe, P.: The Management of Technology. Chapman&Hall, London 1995, 1.ed.
3. Maňková, I.: Sources of Technological Information in Production Process. In.: MicroCad 97 Miskolc feb 1997, p.25-30
4. Maňková, I.: Sources of Technological Information in Part Manufacturing. In: Rozvoj technológie obrábania RTO 98, ISBN 80-7099-259-X, 1998, (vyd.J. Beňo, I. Maňková,) SjF TU Košice, 1998, str. SK 60-62

Zoznam monografií a významných vedeckých publikácií z oblasti obrábania, ktoré boli analyzované a tvorili podklad pri príprave tejto knihy:

1. Buda, J.; Békés, J.: Teoretické základy obrábania kovov, SVTL, Bratislava, (1967) 1.vyd.
2. Hirschfeld, E.: Teória rezania kovov, SAV Bratislava (1953) 1.vyd.
3. Kaczmarek, J.: Principles of Machining by Cutting, Abrasion and Erosion. Wydawnictwo naukowo-techniczne, Warsaw (1976), 1.ed. pp.448–462
4. Kalpakjian, S.: Manufacturing Engineering and Technology. Addison-Wesley Pub.Comp.Inc. (1989) 2.vyd.
5. König, W; Klocke, F.: Fertigungsverfahren Drehen, Fräsen, Bohren, Springer-Verlag Berlin Heidelberg (1997) 5.vyd.
6. König, W; Klocke, F.: Fertigungsverfahren Abtragen und Generieren, Springer-Verlag Berlin Heidelberg (1997) 5.vyd.
7. Lazarenko, B.R.; Lazarenková, N.I.: Elektrojiskrové obrábění kovů. Praha (1952) 1.vyd
8. Příkryl, Z. a kol.: Technologie obrábění, SNTL/SVTL Praha (1967) 1. vyd.
9. Mielnik, E.: Metalworking Science and Engineering., Plenum Press NewYork, (1991) 2.ed.
10. McGeough, J. A.: Advanced Methods of Machining, Chapman and Hall, London, (1988), 1.ed.
11. Kocman, K.: Speciální technologie - obrábění. PC-DIR Real, s. r. o. Brno 1998 1 vyd.
12. Powell, J.: CO₂ Laser Cutting. Plenum Press, NewYork, (1993) 1.ed.
13. Taniguchi, N.:Energy Beam Processing of Materials. Clarendon Press Oxford, (1989) 1.vyd.
14. Turňa, M.: Špeciálne metódy zvrárania. Alfa Bratislava, (1989), 1.vyd.
15. Vasilko, K. a kol.: Nové materiály a technológie ich spracovania. Alfa Bratislava (1990) 1.vyd
16. Vigner, M.; Příkryl, Z.: Obrábění, SNTL Praha (1984) 1.vyd.
17. Grzesik, W.: Podstawy skrawania materialow metalowych, Wyd. Naukowo-techniczne Warszawa (1989) 1.vyd.
18. Komanduri, R.: Machining of Fibre – reinforced Composites, Machining Science and Technology, 1(1), (1997) pp.113 – 152.
19. Snoeys, R.; Staelens, F.; Dekkyser, W.: Current Trends in Non–Conventional Material Removal Processes, *Annals of the CIRP* Vol.35/2, (1986), p. 467-492
20. Tönshoff, H. K.; Egger, R.; Klocke, F: Environmental and Safety Aspects of Electrophysical and Electrochemical Processes *Annals of the CIRP / Keynote Papers* (1997), pp .553-568
21. van Luttervelt, C. A.: On the Selection of Manufacturing Methods Illustrated by an Overview of Separation Techniques for Sheet Materials, *Annals of the CIRP* Vol.39/2 (1989), pp.587 – 607

2 PROGRESÍVNE TECHNOLOGIE ÚBERU MATERIÁLU

Názov progresívne spôsoby úberu materiálu alebo progresívne spôsoby obrábania sa používa pre širokú škálu mechanických, elektrických tepelných a chemických procesov pri úbere (odstraňovaní) materiálu, ktoré boli vyvinuté prevažne po roku 1940.

Stručnú definíciu progresívnych, alebo ako bolo doteraz zaužívané netradičných technológií je ťažké zaviesť, kvôli široko rozdielnym procesom, ktoré do tejto kategórie patria. V odbornej literatúre panuje zhoda v tom, že do tejto skupiny patria procesy zavedené za posledných 60 rokov XX. storočia, ktoré používajú bežné formy energie novým spôsobom alebo používajú energiu, ktorá nebola nikdy predtým použitá.

Pôvodne boli tieto spôsoby úberu určené pre zvláštne použité, ktoré nebolo extenzívne šírené. V súčasnosti je však toto konštatovanie zavádzajúce. Hoci viaceré tieto metódy boli vyvinuté pre riešenie špeciálnych úloh v leteckom a kozmonautickom priemysle v rokoch 1950 a 1960, dnes väčšina z nich nachádza široké uplatnenie v rozličných priemyselných odvetviach.

Vysoko technicky náročné vynálezy posledného storočia ako lietadlá, autá, kozmické rakety a stanice a napokon počítače vytvorili širokú bázu nových ťažkoobrobiteľných materiálov, ktorých opracovanie predstavuje určitý ťažko riešiteľný problém. Ako príklady možno uviesť kompozitné materiály s kovovou maticou, monolitné a kompozitné keramické materiály, vysokotrvanlivé polyméry a iné. Obr.2.1. ukazuje základné rozdelenie konštrukčných materiálov, ktorých obrobiteľnosť klasickými technológiami obrábania je obtiažna, v niektorých prípadoch až nemožná. Ťažkosti vznikajúce pri obrábaní týchto materiálov vyplývajú z ich vysokej tvrdosti a krehkosti, žiarupevnosti, nevhodných tepelných vlastností, chemickej reaktivity s rezným nástrojom, nehomogénnej mikroštruktúry. A tu sa ukazujú výhody progresívnych technológií.

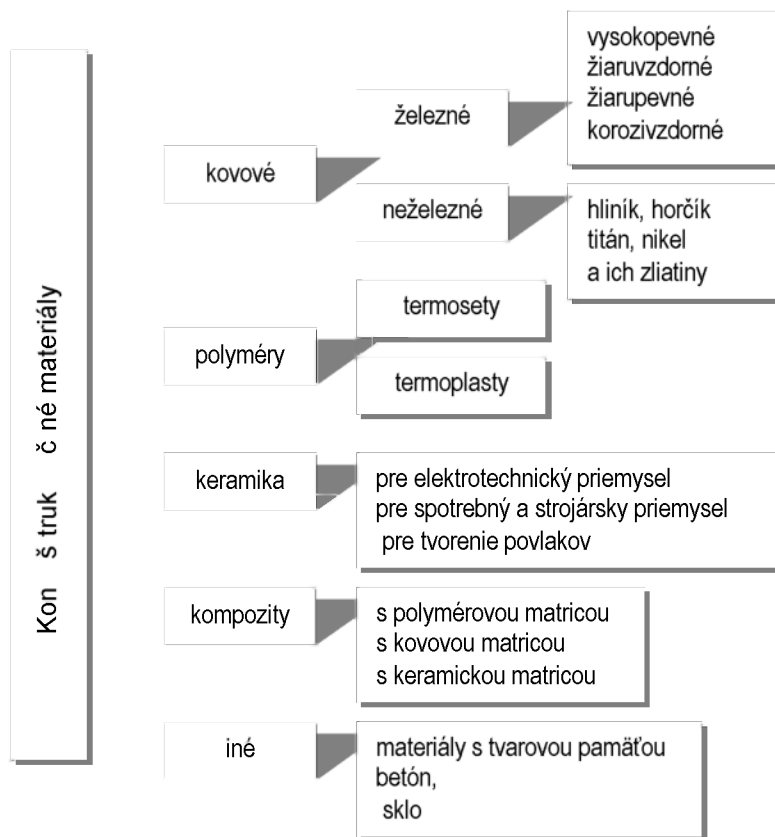
Je potrebné zdôrazniť, že ani vývoj klasických technológií obrábania neustal a boli vyvinuté a sú používané nové rezné materiály a brusivá (rezná keramika, kubický nitrid bóru, polykryštalický diamant), inovačné technológie obrábania (*Hard Machining*, vysokorýchlostné obrábanie a iné), ktoré do určitej miery riešia problémy ťažkoobrobiteľných materiálov, ale napriek týmto zlepšeniam neriešia základný problém obrábania a to opotrebenie nástroja.

Práve vývoj progresívnych technológií, ktoré používajú iné zdroje energie, ako je čisto mechanická energia, pomáha pri riešení problémov spojených s opotrebením nástroja pri obrábaní.

Vývoj progresívnych technológií sa z hľadiska riešenia problému opotrebenia nástroja ubera dvoma smermi:

- i) využívanie elektrickej, tepelnej, chemickej a elektrochemickej energie na podporu klasických procesov opracovania s nástrojmi ako geometrickým telesom, ktoré znižujú intenzitu jeho opotrebenia, niektoré príklady uvádza tab.2.1
- ii) využívanie mechanickej, elektrickej, tepelnej, chemickej a elektrochemickej energie v sústredenom energetickom zväzku na opracovanie materiálov bez použitia nástroja ako geometrického telesa (zaužívané pomenovanie energolúčové technológie), alebo s podporou nástroja ako geometrického telesa bez jeho aktívnej účasti (priamy kontakt s obrobkom) na procese úberu materiálu (v porovnaní s klasickým rezaním alebo brúsením). Klasifikácia procesov z tohto pohľadu je uvedená v kapitole 2.1 – obr. 2.3..

Predkladaná kniha sa venuje prednostne procesom uvedeným pod bodom ii) a iba čiastočne popisuje technológie uvedené bode i) resp. tab.2.1.



Obr.2.1 Prehľad a rozdelenie konštrukčných materiálov s dôrazom na ťažkoobrobiteľné materiály z pohľadu obrábania [6]

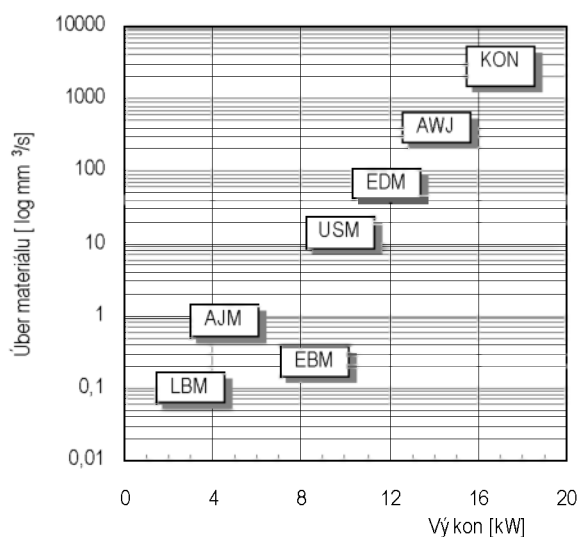
Okrem problematiky opotrebenia nástroja, progresívne spôsoby obrábania riešia v mnohých prípadoch zvyšujúce sa požiadavky priemyslu na kvalitu produktov, na komplexnosť tvarov, na dokončovanie povrchov, ako aj ďalšie požiadavky súvisiace so spracovaním zvyšujúceho sa podielu ťažkoobrobiteľných konštrukčných materiálov. Uvedené požiadavky sú ďalej konkrétne dané:

- nárokmi na vysokú pevnosť a tvrdosť materiálov, obvykle nad 400 HB,
- rastúcimi nárokmi na zložitosť tvaru dielca, čo spôsobuje problémy pri ich upínaní,
- nárokmi na opracovanie tenkostenných a poddajných materiálov, kde pôsobenie reznej sily pri mechanickom opracovaní (brúsenie, rezanie, tvárnene) môže mať za následok ich deformáciu,
- vysokými nárokmi na presnosť a tolerancie rozmerov, na drsnosť dokončovaných povrchov (požiadavka zrkadlovolesklých povrchov s optickou presnosťou),
- nárokmi na integritu povrchov s cieľom vylúčiť nežiadúce tepelné ovplyvnenie povrchových vrstiev a vznik zvyškových napätí pod povrchom.

Ako už bolo spomenuté vyššie, tieto spôsoby opracovania materiálov sú založené na úbere materiálu fyzikálno-mechanicko-chemickým pôsobením a často dopĺňujú klasické výrobné procesy. Dovoľujú opracovať komplexné tvary a v neposlednom rade sú vhodné pre automatizáciu procesov a CNC riadenie.

Tab.2.1 Klasické technologické procesy využívajúce podporu rôznych energetických zdrojov

Obrábanie rezaním	rezanie za tepla (odporový ohrev, ohrev plameňom, plazmou, sústruženie s podporou lasera), rezanie pri nízkych teplotách (kryogénne obrábanie)
Obrábanie brúsením s viazaným brusivom	ultrazvukové brúsenie a honovanie, elektrolytické brúsenie a honovanie, elektroiskrové brúsenie,
Obrábanie brúsením s voľným brusivom	elektromagnetické a elektrostatické lapovanie a leštenie, chemické lapovanie a leštenie,



Obr.2.2 Porovnanie výkonových charakteristík a úberu materiálu pre klasické technológie (KON), a pre nasledujúce progresívne technológie: LBM obrábanie laserom
EBM obrábanie lúčom elektrónov
AJM obrábanie prúdom abraziva
USM ultrazvukové obrábanie
EDM elektroiskrové obrábanie
AWJ obrábanie abrazívnym vodným lúčom
(spracované podľa [2])

Zvláštnosti týchto procesov v porovnaní s klasickými technológiami obrábania je možné zhrnúť nasledovne [1, 9, 11]:

- Úber nezávisí na mechanických vlastnostiach materiálu ako sú tvrdosť, pevnosť, húževnatosť, pojem obrobiteľnosť materiálov typická pre obrábanie rezaním a brúsením stráca svoj klasický význam. Objavuje sa síce snaha ponechať tento pojem, ale so zmeneným významom. Ako príklady možno uviesť chemické obrábanie a pojem leptateľnosť materiálov. Pri elektrochemickom obrábaní a elektroiskrovom obrábaní sa pojem obrobiteľnosti materiálov spája s ich elektrickou vodivosťou resp. rozpustnosťou.
- V mieste oddelovania častíc materiálu nepôsobí rezná sila, nevzniká rezný odpor, obrobky sa vplyvom mechanického zaťaženia vyplývajúce z technologického procesu nedeformujú.
- Z miesta úberu materiálu prechádza menej tepla do hmoty obrobku, pretože:

- oddelovanie častíc je mikrorozmerové a dochádza k nemu na veľkom počte lokalít,
- frekvencia elementárnych úberov je vysoká.
- Opracováva sa celý povrch obrobku naraz.
- Maximálna veľkosť obrobku je limitovaná energetickou základňou zariadenia (10^2 - 10^3 kW).
- Možnosť mikroobrábania a dosahovanie „nano“ 10^{-9} mm rozmerov.
- V porovnaní s klasickými procesmi vykazujú vyššiu spotrebu energie pri úbere materiálu a oveľa nižší pomerný úber.

Obr.2.2. znázorňuje porovnávacie hodnotenie vybraných progresívnych technológií z hľadiska požadovaného výkonu na realizáciu procesu a pomerného úberu materiálu. Zároveň je ukazovateľom energetickej náročnosti vybraných procesov.

2.1 Klasifikácia progresívnych metód úberu materiálov

Progresívne výrobné metódy zahŕňujú množstvo procesov, niektoré našli široké uplatnenie, kým iné zostali iba v podobe laboratórnych experimentov, niekedy iba ako kuriozita.

Systematickú klasifikáciu týchto technológií je možné spracovať z rôznych hľadísk. Obvykle sa delia:

- i) podľa hlavného energetického zdroja úberu
- ii) podľa prítomnosti „nástroja“ ako geometrického telesa,
- iii) podľa prevládajúceho mechanizmu úberu materiálu.

ad i) Delenie podľa hlavného energetického zdroja úberu resp. podľa druhu použitej energie je najviac zaužívané a rozšírené. Triedi jednotlivé technológie do hlavných skupín podľa prevládajúcej energie, ktorá je zdrojom úberu materiálu a to na:

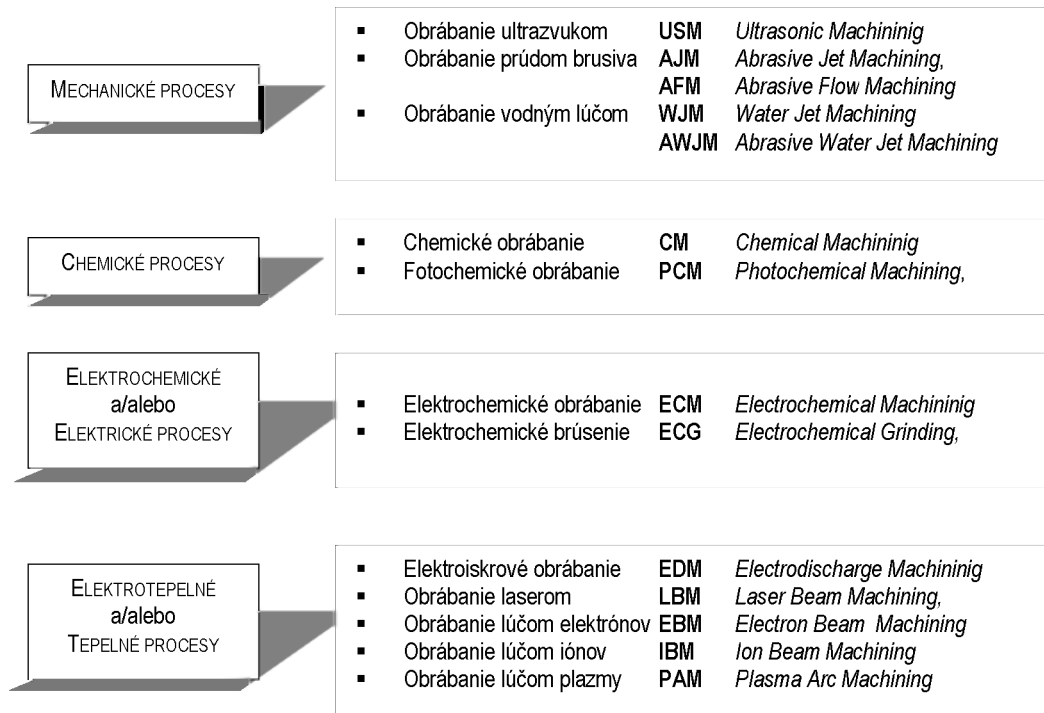
- mechanické procesy,
- chemické procesy,
- elektrické a/alebo elektrochemické procesy
- tepelné a/alebo elektrotepelné procesy.

Obr.2.3 znázorňuje toto delenie spolu so zatriedením používaných technológií do jednotlivých hlavných skupín. Zároveň okrem slovenských technických názvov uvádza medzinárodne zaužívané skratky a anglické názvy technológií, ktoré sú v súlade s medzinárodnou normou ISO DIN 8580. Predkladaná publikácia v nasledujúcich kapitolách zachováva toto delenie.

ad ii) Delenie podľa prítomnosti „nástroja“ vychádza zo smerov vývoja technológií ako bolo spomenuté vyššie. Slovo nástroj je uvedené v úvodzovkách z dôvodu, že sa používa v prenesenom zmysle. V prenesenom zmysle a to z dvoch dôvodov:

1. Pri vysvetľovaní teórie úberu materiálu sa o nástroji hovorí všeobecne ako o prostriedku, ktorý je príčinou úberu materiálu napr. laserový nástroj, elektrónový lúč ako nástroj. Pričom nástroj tu nie je tuhé geometrické teleso.
2. Nástroj ponímaný ako tuhé geometrické teleso, ktoré na rozdiel od klasického rezania a brúsenia nie je v priamom kontakte s obrábaným materiálom, ale v procese úberu materiálu

podlieha viac alebo menej intenzívnemu opotrebeniu. Slúži v tomto prípade na zabezpečenie geometrie vytváraného tvaru dutiny, otvoru, drážky a na zabezpečenie optimálneho priebehu procesu. Ako príklady sú nástroje pre ultrazvukové vŕtanie, elektrochemické a elektroiskrové hĺbenie.



Obr.2.3 Klasifikácia progresívnych metód obrábania

Nástroj ako podporné geometrické teleso sa používa v nasledujúcich procesoch:

- obrábanie ultrazvukom (USM)
- elektrochemické obrábanie (ECM)
- elektroiskrové obrábanie (EDM)

ad iii) Delenie podľa prevládajúceho mechanizmu úberu materiálu rozlišuje:

- procesy s prevládajúcim brúsnym účinkom: opracovanie ultrazvukom (USM), opracovanie prúdom brusiva (AJM, AFM)
- procesy s erozívnym účinkom ako obrábanie vodným lúčom (WJM, AWJM)
- procesy chemického rozpúšťania materiálu: zahŕňajú chemické frézovanie (CM), fotochemické obrábanie (PCM), elektrochemické obrábanie (ECM), elektrochemické brúsenie (ECG),
- procesy s prevládajúcim tepelným účinkom na úber materiálu, označované tiež ako **energolúčové technológie** a to elektroiskrové obrábanie (EDM), opracovanie laserom (LBM), obrábanie lúčom plazmy (PAM), obrábanie lúčom elektrónov (EBM), obrábanie lúčom iónov (IBM).

Medzi **energolúčové technológie** okrem elektroerozívneho opracovania, laserového, elektrónového, iónového a plazmového lúča patria aj procesy chemického a elektrochemického opracovania. Energetický lúč definuje *Taniguchi* [10] ako usmernený tok extrémne malých častíc ako sú fotóny, elektróny, ióny, plazma alebo chemicky a elektrochemicky reaktívne atómy.

Charakteristické pre energolúčové procesy je, že úber materiálu sa deje zvyšovaním vnútornej energie atómov v povrchu obrobku. Odoberanie materiálu je výsledkom reakcie elementárnej častice energetického lúča (atóm, elektrón, ión...) na časticu (atóm) materiálu alebo účinkom zhluku atómov na zhluk atómov. Procesy opracovania sú realizované ako tepelné (LBM, PAM, EBM, EDM), reaktívne (CM, ECM) alebo dynamické (IBM) prebiehajúce na atomárnej úrovni.

2.2 Základné charakteristiky progresívnych technológií

Pôvodne boli progresívne metódy obrábania vyvinuté a začali sa používať ako alternatívne spôsoby obrábania. V súčasnosti predstavujú v mnohých prípadoch bežný spôsob opracovania alebo variantné riešenie klasickej technológie opracovania alebo tvarovania a v niektorých prípadoch sú jediným prvkom progresívnej výroby.

Ich používanie je podoprené dokázateľnými výhodami, medzi ktoré klasici technológie obrábania zaraďujú:

- i) obrobiteľnosť materiálov
- ii) tvarovú komplexnosť dielcov
- iii) jednoduchú automatizáciu výroby
- iv) integritu povrchu a vysokú presnosť
- v) miniaturizáciu dielcov.

ad i) Obrobiteľnosť materiálov. Tento pojem charakteristický pre rezania a brúsenie materiálov, založený na mechanických vlastnostiach materiálov ako je tvrdosť, pevnosť, húževnatosť, sa v prípade týchto procesov vytráca. Pre progresívne metódy opracovania mechanické vlastnosti materiálov nepredstavujú obmedzenie obrobiteľnosti. Dôležitú úlohu tu majú ďalšie vlastnosti ako sú tepelná vodivosť, teplota tavenia, elektrická vodivosť, atómové číslo, lomové vlastnosti a pod.

ad ii) Tvarová komplexnosť súčiastok. Zvyšujúce sa požiadavky na zložitosť tvarov vyrábaných dielcov upriamujú záujem na používanie nových procesov úberu materiálu. Ako príklad možno uviesť vŕtanie. Je jednoduché a ľahké vŕtať kruhový otvor konvenčným spôsobom, ale štvorcový otvor alebo iný nerotačný tvar je vŕtať klasickým spôsobom ťažké, ba až nemožné. Pre elektroiskrové a elektrochemické obrábanie to nepredstavuje problém.

Tvarovanie drážok a otvorov do dielcov o hrúbke niekoľko mikrometrov je zložitá úloha pre konvenčné technológie, ale pre technológie chemického frézovania alebo fotochemického obrábania to predstavuje jednoduché riešenie.

ad iii) Automatizácia výroby. Automatizácia výrobného systému a informačný tok vo výrobnom procese redukuje výrobné časy, znižuje výrobné náklady, zásoby atď. Tento aspekt účinne pôsobí pri nasadzovaní NC (*numerical control*) a CNC (*computer numerical control*) strojov a zavádzaní CAD/CAM (*computer aided design/manufacturing*) systémov do výroby s konečným vyústením do počítačom integrovanej výroby CIM (*Computer Integrated Manufacturing*). Integrácia progresívnych technológií do automatizovaných výrobných systémov je z pohľadu riadenia procesov jednoduchšia v porovnaní s klasickými technológiami. Príkladom toho sú dostupné NC a CNC stroje pre elektroiskrové obrábanie, CNC laserové zariadenia, NC a CNC riadenie pohybu dýzy vodného lúča, automatické riadenie procesov iónového a elektrónového lúča a iné.

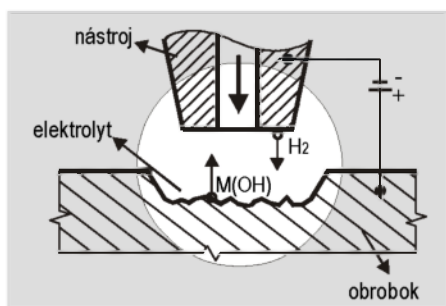
ad iv) Integrita povrchu a požiadavka vysokej presnosti. Povrchy opracované rezaním alebo brúsením vykazujú stopy silného mechanického ovplyvnenia (spevnenie, zvyškové napätia, stopy chvenia, výrazné mikronerovnosti), ktoré môže mať nepriaznivé účinky na úžitkové vlastnosti obrobených povrchov. Na druhej strane rezanie a brúsenie takých materiálov ako sú keramické materiály a vláknové kompozity prináša rad neriešiteľných problémov spojených s vlastnosťami opracovaného povrchu. Práve pre tieto materiály predstavujú progresívne procesy obrábania alternatívne riešenie pre získanie povrchov s požadovanými vlastnosťami. Požiadavka vysokej presnosti dokončených povrchov nachádza rovnako kladnú odozvu u týchto technológií. Rozvoj ultrapresného obrábania a nanotechnológie sú toho dôkazom. Presnosť úberu v oblasti atomárnych a molekulárnych vrstiev dokážu zabezpečiť iónové a elektrónové procesy odparovania a rozprašovania vo vákuu.

ad v) Miniaturizácia. Trendy reducie rozmerov dielcov zvyšujú potrebu používania nových procesov, ktoré umožňujú úber materiálov nielen v oblasti mikrorozmerov, ale nano a dokonca úber niekoľkých molekulárnych a atomárnych vrstiev. Ultra malé priemery ($10 \div 100 \mu\text{m}$) otvorov nie je možné vŕtať bežnými technológiami EDM, LBM, ECM, ale technológie mikrochemického obrábania, obrábania zväzkom elektrónov (EBM) a iónov (IBM) riešia aj túto úlohu. Možno povedať, že mikroobrábanie, ako nedávno zaužívaný pojem pre opracovanie rozmerovo malých dielcov, sa stáva významným zdrojom vybraných oblastí priemyselnej výroby.

V nasledujúcich tabuľkách (Tab.2.2 až Tab.2.8) sú v prehľade uvedené charakteristiky progresívnych technológií, ktoré sú náplňou tejto knihy. Je potrebné podotknúť, že tabuľky nemajú porovnávaci charakter. Princíp úberu materiálu a stručná charakteristika procesu je v tab.2.2.

Tab.2.2 Znázornenie princípu technológie a jej stručná charakteristika .

CHEMICKÝ A ELEKTROCHEMICKÝ PRINCÍP ÚBERU MATERIÁLU



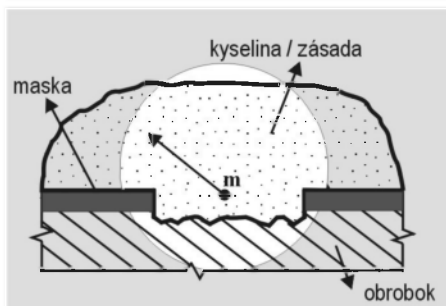
Elektrochemické obrábanie ECM

Obrábanie tvarov, zložitých profilov a otvorov s vyššou intenzitou úberu;

použitie: len pre vodivé materiály,

nevýhody: požiadavka vstupných technologických skúšok pre určenie vhodných parametrov procesu; vysoké náklady na zariadenie, vysoká energetická náročnosť.

MRR: $2,5 \div 12 \text{ mm/min}$ v závislosti na prúdovej hustote;



Chemické obrábanie CM

Chemické pôsobenie na úber materiálu;

použitie: pre skoro všetky kovy; tvrdé, krehké a nevodivé materiály;

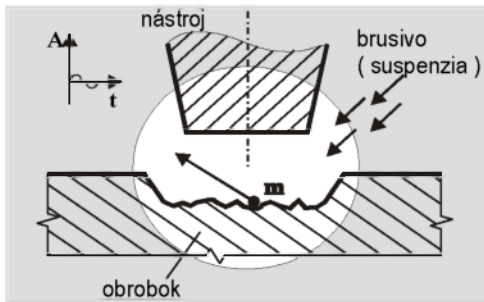
nevýhody: maximálna hĺbka odleptanej vrstvy materiálu do 12 mm; proces vyžaduje vysokú zručnosť prevádzkovania;

Výhody: nízke náklady na zariadenie;

MRR: $0,0025 \div 1 \text{ mm/min}$

MECHANICKÝ PRINCÍP ÚBERU MATERIÁLU

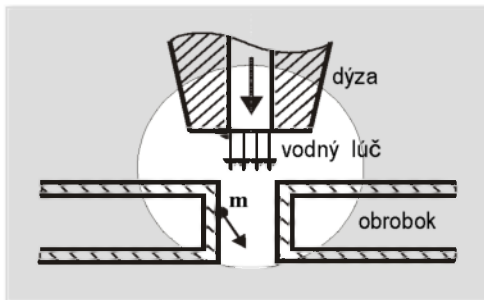
Tab.2.2 pokračovanie

**Ultrazvukové obrábanie USM**

Úber materiálu pomocou abrazívnej suspenzie, ktorá prúdi v medzere medzi kmitajúcim nástrojom a obrobkom; použitie: tvorenie plytkých nerovnomerných profilov do tvrdých a krehkých vodivých a nevodivých materiálov

nevýhody: vysoké náklady, nízka intenzita úberu materiálu.

MRR: $0,4 \pm 1,6 \text{ mm/min}$

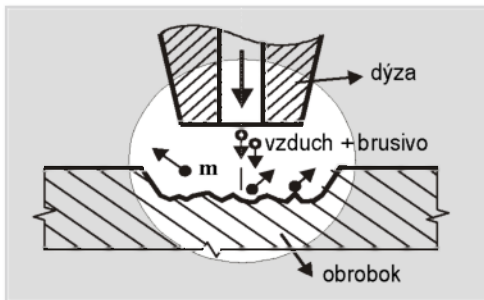
**Vodný a abrazívny vodný lúč WJM / AWJ**

Nie je limitované vlastnosťami materiálu; je doporučené najmä pre opracovanie ťažkoobrobiteľných materiálov ako keramika a kompozitné materiály do hrúbky 25 mm;

výhody: technológia šetriaca životné prostredie,

nevýhody: vysoká hlučnosť

MRR: mení sa v závislosti od druhu materiálu obrobku;

**Technológia abrazívneho lúča AJM**

Používa stlačený plyn, obyčajne vzduch, na urýchlenie prúdenia pevného brusiva;

použitie: prednostne pre čistenie povrchov a oddeľovanie veľmi malých dielcov z krehkých materiálov, nie je vhodné pre opracovanie a tvarovanie rozmerovo väčších dielcov,

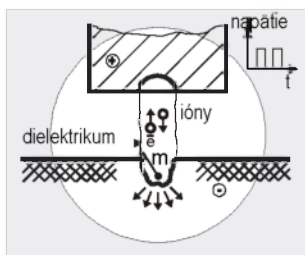
nevýhody: pomalý úber materiálu, nízky výkon zariadenia.

Poznámka k tab. 2.2: Skratka MRR (*material removal rate*) udáva lineárnu intenzitu úberu materiálu (mm/min) alebo objemovú intenzitu úberu (mm^3/min). Označuje sa tiež ako výkon opracovania.

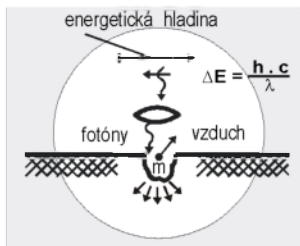
Základné fyzikálne parametre procesov uvádza tab.2.3. Vhodnosť progresívnych technológií pre spracovanie vybraných konštrukčných materiálov uvádza tab.2.4. Tab.2.5 poukazuje na procesy z pohľadu požiadaviek na vlastnosti materiálu, uvádza dosahované tolerancie rozmerov a posudzuje stav povrchu po aplikácii technológie. Zároveň charakterizuje kvantitatívne intenzitu úberu materiálu, ako to udáva *Kalpákjian* [3]. Je potrebné zdôrazniť, že kvantitatívne údaje o jednotlivých technológiách sa líšia podľa literárnych údajov, čo vyplýva zo skutočnosti, že tieto parametre sa vždy vzťahujú k určitému výrobnému zariadeniu. Z toho dôvodu sa môže stať, že v rámci jedného procesu sú podľa rôznych zdrojov, udávané odlišné rozsahy vstupných a výstupných parametrov.

Tab.2.2 pokračovanie

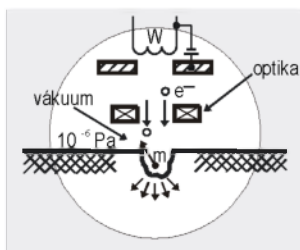
ELEKTROTEPELNÝ PRINCÍP

**Elektroerozivne obrábanie EDM**

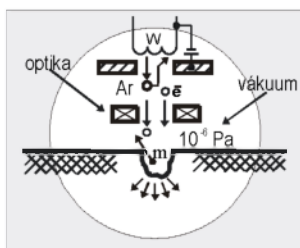
pre elektricky vodivé a tvrdé materiály; vysoké náklady a malá životnosť nástrojovej elektródy; nutnosť výroby vždy novej nástrojovej elektródy pri zmene profilu dielca;
EDM zvyšuje tvrdosť vytváranej povrchovej vrstvy (spevnenie) a redukuje medzu únavy;
MRR: okolo 0,15 cm³/min

**Technológia laserového lúča LBM**

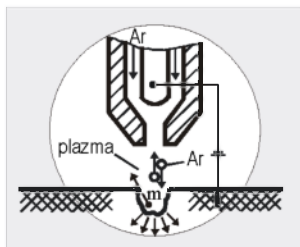
široko aplikovateľná technológia pre všetky druhy materiálov; nedoporučuje sa pre veľmi tenké dielce a pre úber malého množstva materiálu; Nevýhodou je tepelne ovplyvnená zóna, nerovnomernosť rezu a vysoké nároky na presnosť nastavenia ohniskovej vzdialenosti lúča od povrchu obrobku; nákladné zariadenie a energeticky náročný proces
MRR: 0,006 cm³/min

**Elektrónový lúč EBM**

vyžaduje sa vákuové prostredie (vákuová komora) pre prácu; vhodné pre vŕtanie otvorov a tvarovanie mikro rozmerov; nevýhodou sú vysoké náklady na zaradenie, rozmermi obmedzená použiteľnosť (vŕtanie do hĺbky 6 mm), nízka produktivita a tepelné ovplyvnenie vytváraného povrchu.
MRR: 0,0008 ÷ 0,002 cm³/min

**Technológia iónového lúča IBM**

vyžaduje sa vákuové prostredie (vákuová komora); vhodné pre tvarovanie mikro a nano rozmerov a veľmi jemné opracovanie povrchov, nevýhody: vysoké náklady a vysoká zručnosť prevádzkovania, obmedzená použiteľnosť daná rozmermi vákuovej komory; povrchy nie sú ovplyvnené teplom, nie je tepelný proces ale dynamický

**Obrábanie plazmovým lúčom PAM**

vhodné pre opracovanie všetkých kovových materiálov vysokou rýchlosťou úberu;
nevýhody: vysoké prevádzkové náklady; náklady na zariadenie a tepelne ovplyvnená zóna rezu.

Tab. 2.3 Typické parametre vybraných progresívnych spôsobov úberu materiálu (tabuľka udáva stredné hodnoty podľa prameňov [1, 2, 11])

Typické parametre	USM	AJM	AWJ	ECM	EDM	EBM	LBM	PAM
Napätie [V]	220	110	220	10	45	150000	4500	100
Prúd [A]	12 striedavý	1.5	-	10 000 jednosmerný	60 jednosmerný pulzný	0.001 jednosmerný pulzný	-	500 jednosmerný
Výkon [W]	2400	250	10 000	100 000	2700	150 malý 2 000 stredný	2 malý 2 000 stredný	50 000
Medzera* [mm]	0.25	0.76	2,5	0.20	0.03	102	152	7.62
Prostredie	Brúsna suspenzia	Zmes brusiva a vzduchu	Zmes vody a brusiva	Elektrolyt	Kvapalné dielektrikum	Vákuum	Vzduch	Zmes argónu a vodíka

Tab.2.4 Posúdenie vhodnosti progresívnych technológií pre opracovanie vybraných druhov konštrukčných materiálov (zdroj: [3])

Materiál obrodku	USM	WJM	AJM	ECM	CHM	EDM	EBM	LBM	PAM
Kovové materiály									
Hliník	3	2	2	2	1	2	2	2	1
Horčík	2	2	2	1	1	1	2	2	1
Vysokolegované ocele	3	1	1	1	2	1	2	2	1
Titán	2	1	2	2	2	1	2	2	2
Žiarupevné ocele	1	1	1	2	3	1	1	3	3
Nekovové materiály									
Keramika	1	1	1	4	3	4	1	1	4
Plasty	2	2	2	4	3	4	2	2	3
Kompozitné materiály	1	1	1	4	2	4	2	2	4

Hodnotenie použitia 1- optimálne; 2 – vhodné 3 - menej vhodné 4 - nevhodné

Fyzikálny princíp progresívnych technológií nie je doménou iba procesu úberu materiálu, ale využíva sa aj v iných procesoch spracovania materiálu. Tak isto sa používa pre meracie systémy (meranie fyzikálnych veličín ako meranie otáčok, dĺžky pomocou lasera) v defektoskopii (ultrazvuk na identifikáciu materiálov a zváraných spojov), elektrónový lúč v mikroskopii a analýze povrchu materiálu, laserový lúč pre snímacie systémy v informačných technológiách (CD prehrávače, laserové tlačiarne), v humánnej medicíne (laserový skalpel) a iné.

Tab.2.6 uvádza využívanie týchto postupov v jednotlivých procesoch spracovania materiálov. Tab.2.7 uvádza názvy energolúčových procesov používaných pri spracovaní materiálov.

* Pre každú technológiu označuje vzdialenosť medzi povrchom obrobku a „nástrojom“. Pre EDM, ECM a USM je to medzera (z angl. *gap*) medzi povrchom a nástrojom, pre AWJ, LBM je to vzdialenosť medzi dýzou a povrchom materiálu (z angl. *stand off*). (pozn. autora)

Tab.2.5 Charakteristické požiadavky na materiál obrobní a vybrané ukazovatele stavu povrchu (spracované podľa [1, 2, 10])

Proces	Požiadavka na vlastnosti materiálu	Integrita povrchu	Intenzita úberu materiálu [cm ³ /h]	Rozmerové tolerance [mm]
USM	Tvrdosť nad 35 HRC	mierna	19,7	0,008
AJM	žiadna	bez zvyškových napätí	1,0	0,05
WJM	žiadna	bez tepelného ovplyvnenia		0,05
ECM	elektricky vodivý	bez zvyškových napätí, bez ostrapov, lesklý	983	0,05
EDM	elektricky vodivý	tepelne ovplyvnený povrch, bez ostrapov	49 ÷ 197	0,015 ÷ 0,13
CM	chemicky aktívny	bez zvyškových napätí, bez ostrapov, lesklý	1,0	0,05
LBM	žiadna	tepelne ovplyvnený povrch	0,007	0,03
EBM	žiadna	tepelne ovplyvnený povrch	0,10	0,03
PAM	chemicky aktívny	tepelne ovplyvnený povrch, bez zvyškových napätí	4916	1,27

Tab.2.6 Využívanie princípov progresívnych metód v technológiách spracovania materiálov

princíp	ultrazvuk	vodný lúč	abrazívny lúč	chemická reakcia	elektrolýza	elektrický výboj	laser	iónový lúč	elektrónový lúč	plazma
A - delenie materiálov	✗	✗		?	?		✗	?	✗	✗
B - spájanie materiálov	✗			?			✗	✗	✗	✗
C- tvarovanie materiálov										
C1 zlievanie										
C2 tvárnenie	✗						✗			✗
C3 prášková metalurgia	?						?	✗	✗	?
C4 rezanie brúsenie	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
C5 fyz.-chem. pôsobenie				✗	✗	✗	✗	✗	✗	?
D - tepelné spracovanie				✗	✗		✗	✗	✗	✗
E - rozmerové opracovanie	✗	?	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	
F - zmena stavu povrchu				✗	✗	✗	✗	✗	✗	?

✗ - zaužívaný proces, ? - obmedzené využívanie - nepoužívané alebo nevhodné

Tab.2.8 sumarizuje oblasti využitia progresívnych technológií v operáciách obrábania.

Energolúčové procesy sa používajú v technológii spracovania materiálov v štyroch oblastiach:

- pri úbere a delení materiálov (*removal/separation*)
- pri spájaní a spevňovaní materiálov (*joininng/consolidation*)
- pri tvarovaní a tvarovom obrábaní (*forming*)
- pri povrchovej úprave (*surface treatment*)

Tab.2.7 Energolúčové technológie a ich použitie v pri spracovaní materiálov

	úber a delenie materiálov	spájanie a spevňovanie modifikácia povrchu	tvarovanie rozmerové opracovanie	povrchová úprava
laserový lúč	LBM	zváranie	brúsenie	kalenie vytvrdzovanie
elektrónový lúč	EBM,	zváranie, naprašovanie	leštenie	žíhanie, kalenie
	EDM,WEDM	nárazové zváranie	leštenie	
iónový lúč	iónové opracovanie leptanie	implantácia iónové plátovanie	iónové hľadenie leštenie	iónová nitridácia
plazma	LAM	zváranieTIG, MIG spájanie, pokovovanie	leštenie	kalenie
chemický lúč	CM, PCM	CVD, chemické cementovanie	chemicko-mechanické leštenie a brúsenie	reaktívne chemické čistenie
elektrochemický lúč	ECM	povlakovanie	leštenie	reaktívne elektrochemické čistenie

Tab 2.8 Hlavné oblasti využitia progresívnych technológií pre operácie obrábania

Proces	Operácia
USM	výroba rozmerovo malých dielcov, tvarovanie otvorov a dutín ľubovoľného tvaru
AJM	tvorenie plytkých tvarových drážok, značkovanie, leštenie
WJM	tvarové rezanie, brúsenie, leštenie, výroba drážok a zápichov, vrtanie, frézovanie sústruženie,
ECM	hĺbenie otvorov a dutín ľubovoľného tvaru a veľkosti, opracovanie mikro dielcov, leštenie, brúsenie, odstraňovanie ostrapov
EDM	hĺbenie otvorov a dutín ľubovoľného tvaru, rezanie a vyrezávanie ľubovoľných tvarov, dierovanie, výroba drážok a zápichov, odstraňovanie ostrapov
CM	hĺbenie otvorov a dutín ľubovoľného tvaru, leštenie, odstraňovanie ostrapov, značkovanie
LBM	tvarové rezanie, dierovanie, výroba drážok, obrábanie tvarových plôch, mikroobrábanie,
EBM	opracovanie drobných dielcov, vrtanie, výroba drážok a zápichov, tvarové rezanie
PAM	tvarové rezanie a vrtanie, hĺbenie otvorov a dutín ľubovoľného tvaru ,

Z uvedeného výberu charakteristík vyplývajú široké možnosti využitia týchto technológií, ale aj napriek ich výhodám zostávajú alternatívnym alebo variantným riešením. V súčasnosti je zavádzanie týchto technológií spojené s vysokými finančnými nákladmi nielen na zariadenie, ale aj na realizáciu technológie. Je preto nutné riadiť sa pri zavádzaní novej technológie určitými kritériami rozhodovania.

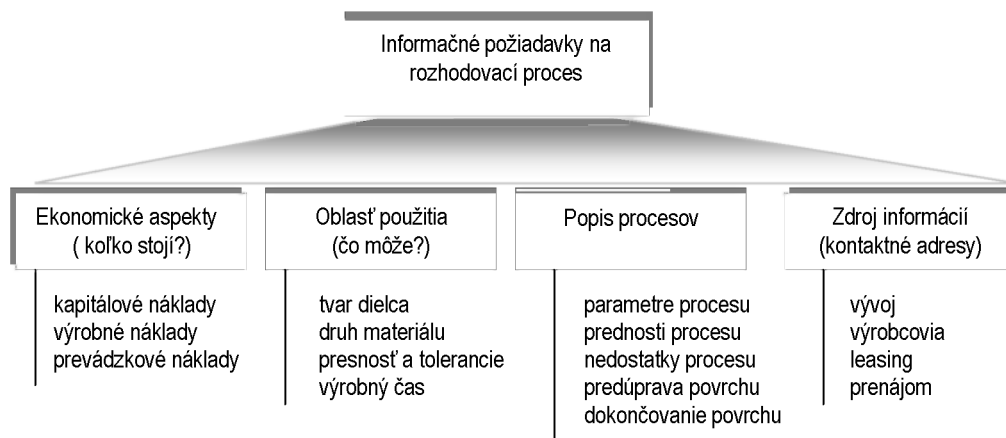
Kritéria pre výber progresívnej technológie berú do úvahy vstupné údaje o výrobku, požadovanej kvalite povrchu, hospodárnosti výroby a prevádzkové požiadavky, tab. 2.9.

Tab. 2.9 Kritéria pre výber technológie (zdroj van Lutterwelt [9])

obrobok	tvár, rozmery, druh materiálu, citlivosť na tlak, rezné sily, teplotu, koróziu
kvalita povrchu	presnosť tvaru a rozmerové tolerance, integrita povrchu, reprodukovateľnosť
hospodárnosť	doba prípravy, výrobný čas, kapitálové náklady, prevádzkové náklady (vrátane nákladov na obsluhujúci personál, nástroje, údržbu a bežné výdavky)
prevádzkové požiadavky	ľudské zdroje: vzdelanie, zručnosť, bezpečnosť, pracovné podmienky, životné prostredie organizačné: flexibilita, predpoklady pre automatizáciu a integráciu do automatizovaných výrobných systémov

Rozhodovací proces pre výber vhodnej technológie sa okrem vyššie uvedených kritérií musí riadiť aj informačnými požiadavkami [5] obr.2.4, ako:

- Čo stojí technológia t.j. ekonomické aspekty výroby a hospodárske ukazovatele technológie.
- Čo môže technológia t.j. hľadisko charakterizované kvalitatívnymi ukazovateľmi vstupov a výstupov.
- Čo dokáže technológia t.j. výkonové ukazovatele technológie.
- Dostupnosť technológie t.j. zdroje informácií o stave vývoja, výroby a dodávateľoch zariadení a technológie.



Obr. 2.4 Hlavné zdroje informácií pre rozhodovací proces výberu technológie [5]

Na záver je potrebné povedať, že z roka na rok sa venuje viac pozornosti týmto progresívnym (netradičným) procesom. Ako dôkaz je zvyšujúce sa množstvo technických článkov, konferencií, kníh, vedeckých a technických sympózií. Tieto aktivity nielen učia odbornú komunitu vo výrobnej sfére o vynikajúcich a jedinečných možnostiach týchto procesov, ale tiež zabezpečujú úspešnú budúcnosť pre tieto spôsoby opracovania materiálov.

Účelom publikácie je oboznámiť čitateľa s používanými progresívnymi procesmi rovnako ako s procesmi, ktoré sa ukazujú prísľubom do blízkej budúcnosti.

Pri klasifikácii progresívnych technológií sa kniha pridrižiava triedenia procesov, ktoré zaviedol Snoyers et al (1986) a sú uvedené na obr.2.3, aj preto, že je viac rozšírené a zaužívané. Na druhej strane, kniha používa aj názov energolúčové technológie, čo je z hľadiska charakteru procesov, ktoré tam patria možno aj výstižnejšie.

Literatúra ku kapitole 2:

1. ASM – Metals Handbook - Machining, Vol. 6, ASM International, March, (1997), 9.ed.
2. Cobelli, P; Maccarini, G; Zavanella, L.: Tecniche di lavorazione non tradizionali, Atti n.80, Università degli Studi di Brescia, 1999 1.ed.
3. Kalpakjian, S.: Manufacturing Engineering and Technology. Addison-Wesley Pub.Comp.Inc. (1989)
4. Kaczmarek, J.: Principles of Machining by Cutting, Abrasion and Erosion. Wydawnictwo naukowo-techniczne, Warsaw, (1976), 1.ed. pp.448-462
5. Maňková, I.: Sources of technological information in production process. In.: MicroCad 97 Miskolc 26.feb 1997 p.25-30
6. Maňková, I.; Beňo, J.: Trendy vývoja rezných nástrojov. seminár Pramet 95, Sjf Košice, 1995
7. McGeough, J. A.: Advanced Methods of Machining, Chapman and Hall, London, (1988), 1.ed.
8. Snoeys, R.; Staelens, F.; Dekkyser, W.: Current Trends in Non-Conventional Material Removal Processes, *Annals of the CIRP* Vol.35/2, (1986), p. 468
9. van Luttervelt, C.A.: On the Selection of Manufacturing Methods Illustrated by an Overview of Separation Techniques for Sheet Materials, *Annals of the CIRP* Vol.39/2 (1989), pp.587 –607
10. Taniguchi, N.: Energy Beam Processing of Materials. Clarendon Press Oxford, 1989
11. Tool and Manufacturing Engineers Handbook, Vol.1 Machining, SME, Dearborne, 1983

3 MECHANICKÉ PROCESY ÚBERU MATERIÁLU

Trochu zavádzajúci názov jednej skupiny progresívnych/netradičných technológií úberu materiálu vychádza z mechanickej podstaty technológií, ktoré sú do tejto skupiny zaradené.

Zavádzajúci názov z toho dôvodu, že všetky tzv. tradičné alebo klasické metódy používajú na úber materiálu mechanickú energiu ako svoj primárny zdroj, čo je aj pre tieto procesy do istej miery charakteristické. Do tejto skupiny sú začlenené nasledujúce technológie:

- **obrábanie ultrazvukom** (*USM*), pôvodne nazývané aj ako brúsenie nárazovým účinkom (*impact grinding*), je známe aj pod názvami ako ultrazvukové vrtanie, ultrazvukové rozmerové obrábanie, ultrazvukové abrazívne obrábanie alebo vrtanie so suspenziou,
- **technológie abrazívneho lúča** (*AJM, AFM*), patria k procesom abrazívneho opracovania nárazovým účinkom brúsnej častice na povrch (*impact machining process*),
- **opracovanie vodným lúčom** (*WJM, AWJM*) využíva hydromechanickú energiu sústredeného vodného lúča a jeho mechanický a erozívny účinok.

Úber materiálu je pre uvedené procesy spojený s priamym mechanickým abrazívnym účinkom voľných brúsnych častíc dopadajúcich určitou kinetickou energiou na povrch materiálu (jednoznačne v prípade ultrazvukového obrábania a procesov abrazívneho lúča), a tiež erozívnym účinkom čistého vodného prúdu a/alebo vodného prúdu v synergii s brúsnyimi časticami (vodný lúč a abrazívny vodný lúč).

V prípade vodného lúča je úber materiálu spôsobený eróziou, ale ako primárny zdroj energie sa využíva hydromechanická energia. Na základe toho sa opracovanie vodným lúčom zaraďuje medzi mechanické procesy.

Mechanizmus úberu materiálu je charakterizovaný procesmi mikrovylamovania a mikrovystiepania (*microchipping*) čiastočiek materiálu následkom nárazu drobných častíc brusiva na povrch. Pre procesy opracovania vodným lúčom mechanizmus úberu materiálu je v erozívnom opotrebení povrchu vplyvom pôsobenia vysokotlakového vodného lúča. Podrobnejší popis mechanizmu úberu materiálu je pri jednotlivých technológiách v nasledujúcich kapitolách.

Z uvedeného dôvodu sa obrábanie ultrazvukom a prúdom abraziva klasifikuje ako technológia brúsenia voľným brusivom, a v systematickom triedení procesov nachádza miesto medzi abrazívnymi procesmi a nie progresívnymi/nekonvenčnými procesmi. To vysvetľuje aj nejednotnosť klasifikácie procesov obrábania (pozri obr.1.6 kap.1).

Mechanické procesy úberu materiálu sa obyčajne používajú na opracovanie veľmi tvrdých materiálov (tvrdosť nad 35 HRC), ktoré sú tradičnou cestou len ťažko a ekonomické nevýhodne opracovateľné, jednak pre ich tvrdosť, ale aj húževnatosť alebo krehkosť.

Keramika, kompozitné a organické materiály sú vhodnými kandidátmi pre uvedené mechanické procesy, pretože väčšina z nich je elektricky nevodivá a teda nevhodná pre elektrochemické alebo elektroiskrové procesy.

Organické materiály majú navyše sklon k poškodeniu samovznietením alebo spálením, preto nie sú vhodné ani pre spracovanie procesmi, ktoré využívajú intenzívne tepelné pôsobenie na úber materiálu ako je laser, plazma.

4 CHEMICKÉ A ELEKTROCHEMICKÉ PROCESY ÚBERU MATERIÁLU

Chemické a elektrochemické procesy úberu materiálu využívajú chemické a elektrochemické reakcie v plynnom alebo kvapalnom prostredí na odstránenie častíc (atómov alebo molekúl) materiálu a vytvorenie požadovaného tvaru dielca.

Chemické a elektrochemické procesy úberu materiálu patria do skupiny tzv. energolúčových technológií. Taniguchi (1989) [kap.1, 11] definuje tieto procesy ako postupy, ktoré prebiehajú pomocou lúča chemicky alebo elektrochemicky reagujúcej látky v plynnom alebo kvapalnom prostredí.

Pri úbere materiálu, produkty reakcie, ktorými sú atómy a molekuly materiálu obrobnú kombinované s reagujúcou látkou (chemická zlúčenina, elektrolyt), sú odstraňované z povrchu prúdom plynu alebo kvapaliny. Na odstránenie rozpusteného materiálu je potrebné použiť nútenú cirkuláciu elektrolytu, alebo prúdenie tepla, aby chemická reakcia rozpúšťania bola vždy aktívna. Nútená cirkulácia sa nepoužíva iba v procesoch leštenia a elektrochemického označovania.

Aj keď sú zvyčajne uvádzané spoločne tvoria dve veľké skupiny procesov, v závislosti na primárnom zdroji energie používanej na úber materiálu, a to:

- chemické procesy, kde primárny zdroj energie je chemický dej rozpúšťania materiálu,
- elektrické a/alebo elektrochemické procesy, kde primárny zdroj energie je elektrická energia a jej pôsobenie na kvapalinový vodič – elektrolyt. Tieto procesy využívajú jav elektrolýzy na úber materiálu.

Chemické procesy úberu materiálu.

Chemické obrábanie je proces, ktorý využíva chemickú reakciu ako primárny zdroj energie na úber (odstránenie) materiálu.

Do tejto skupiny sú zaradené nasledujúce procesy, ktoré tvoria zároveň obsahovú náplň kapitoly 4.1:

- chemické obrábanie (*CM Chemical Machining*), rozšírené pod názvom chemické frézovanie
- fotochemické obrábanie, ktoré okrem chemických dejov, využíva na tvarovanie dielcov poznatky fotografickej techniky,
- termické odstraňovanie ostrapov, ktoré využíva tepelný účinok chemickej reakcie.

K chemickým procesom patria aj procesy leštenia a čistenia povrchov, ale nie sú v nasledujúcej kapitole rozoberané.

Elektrické a/alebo elektrochemické procesy úberu materiálu.

Elektrochemické procesy úberu materiálu využívajú riadené anodické rozpúšťanie materiálov prechodom jednosmerného elektrického prúdu elektrolytom. Elektrochemické obrábanie využíva

na vytváranie požadovaného tvaru dielca, nástroj ako geometrické teleso určitého tvaru, ale úber materiálu sa realizuje chemickým rozpúšťaním materiálu v podmienkach elektrolýzy.

Do tejto skupiny patrí široké spektrum procesov ako je:

- elektrochemické obrábanie, kde je zaradené elektrochemické sústruženie, vŕtanie, frézovanie, hĺbenie a tvarovanie,
- elektrochemické brúsenie a honovanie,
- elektrochemické leštenie a morenie,
- elektrochemické odstraňovanie ostrapov.

Chemické a elektrochemické obrábanie má svoje zvláštne podmienky použitia pri výrobe kovových (vodivých) predmetov. Najmä elektrochemické obrábanie sa môže použiť na opracovanie materiálov nezávisle na ich tvrdosti, húževnatosti a iných fyzikálnych vlastnostiach za predpokladu, že materiál obrobku je elektricky vodivý. Požiadavky priemyslu, ale vyvolali vývoj a použitie kombinovaných procesov elektrochemického a elektroiskrového procesu pre tvarovanie nevodivých alebo čiastočne vodivých keramických a kompozitných materiálov.

Chemické a elektrochemické procesy sa uplatňujú v procesoch mikroopracovania a nanotechnológií.

5 ELEKTROTEPELNÉ PROCESY ÚBERU MATERIÁLU

Elektrotepelne a/alebo tepelne procesy využívajú na úber materiálu ako primárny zdroj tepelnú energiu, ktorú poskytujú vysokoenergetické lúče elektrónov, fotónov iónov a plazmy. Do tejto skupiny patrí:

- elektroerozívne spracovanie (EDM)
- laserový lúč (LBM),
- plazmový lúč (PAM),
- elektrónový lúč (EBM)
- iónový lúč (IBM).

Taniguchi (1989) ako prvý nazval tieto procesy ako **energolúčové procesy**. Technickej verejnosti je tento názov známy, aj keď niekedy nie je celkom jasné, čo obsahuje.

Energetický lúč je definovaný ako usmernený tok extrémne malých energetických častíc, ako sú fotóny, elektróny, ióny, plazma alebo chemicky a elektrochemicky reaktívne atómy. Podľa typu častíc sa energolúčové procesy delia do 6. skupín:

1. spracovanie lúčom fotónov (*photon energy beam processing*) - zaužívaný názov laserový lúč, je tepelný proces úberu materiálu prebiehajúci na vzduchu pomocou úzkeho bodovo fokusovaného lúča alebo širokého lúča,
2. spracovanie lúčom elektrónov (*electron beam processing*) zahŕňa:
 - lúč elektrického výboja (EDM) usmerný pomocou nástroja v dielektrickom prostredí
 - lúč elektrónov vo vákuu (EBM), široký alebo úzky fokusovaný lúč
 obidva procesy sú tepelné procesy úberu materiálu. Opracovanie lúčom elektrónov používa elektrónový lúč s vysokým urýchľovacím napätím pri nízkom prúde (10 kV, 1 mA), a EDM používa iskrový výboj s vysokou prúdovou hustotou a nízkym urýchľovacím napätím (100A v špičke impulzu a napätie niekoľko voltov),
3. spracovanie lúčom iónov (*ion beam processing*) je dynamický alebo reaktívny proces prebiehajúci vo vákuu,
4. spracovanie lúčom atómov alebo molekúl (*atom or molecule beam processing*) používa široký lúč častíc (atómy alebo molekuly) najčastejšie pre naparovanie tenkých vrstiev,
5. spracovanie lúčom plazmy (*plasma beam processing*) je tepelný proces prebiehajúci na vzduchu alebo v ochrannej atmosfére,
6. spracovanie lúčom chemicky a elektrochemicky reagujúcich (reaktívnych) látok (*chemical and electrochemical beam processing*), úber materiálu sa deje chemickým rozpúšťaním. Podrobne sú tieto procesy popísané v kapitole 4.1 a 4.2.

Charakteristické pre energolúčové procesy je, že úber materiálu sa deje zvyšovaním vnútornej energie atómov v povrchu obrobku. Odoberanie materiálu je výsledkom reakcie elementárnej častice energetického lúča (atóm, elektrón ión...) na časticu (atóm) materiálu alebo účinkom zhluku častíc (atómov) na zhluk častíc (atómov). Procesy spracovania sú realizované ako tepelné (LBM, PAM, EBM, EDM), reaktívne (CM, ECM) alebo dynamické (IBM) prebiehajúce na atomárnej úrovni.

Podstatou procesov, ktoré prebiehajú na atomárnej úrovni je, že energia potrebná na odstránenie atómu z povrchu obrobku musí byť väčšia ako energia mriežkovej väzby E_b a musí existovať prebytok energie povrchovej bariéry E_s , ktorá sa zhoduje s potenciálnou bariérou

povrchu. Potom minimálna špecifická energia δ (J/m^3) potrebná pre úber jednotkového množstva materiálu je vyjadrená vzťahom:

$$\delta = (E_b + E_s) N_A / V_A$$

N_A je Avogardovo číslo $6,022 \cdot 10^{23}$ (atom/mol), V_A je molárny objem materiálu obrobku (m^3/mol).

Minimálna špecifická energia δ je dôležitá hodnota v procesoch energolúčového spracovania. Významom zodpovedá strižnému napätiu τ_s pri obrábaní rezaním alebo brúsením. Hodnota strižného napätia je závislá na hrúbke odrezávanej vrstvy. Pre hrúbku vrstvy $1 \mu\text{m}$ (čo zodpovedá brúseniu) je $\tau_s = 1,0 \cdot 10^4 \text{ MN/m}^2$, táto hodnota sa blíži k hodnote teoretického strižného napätia $\tau_{st} = G/2\pi = 1,3 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$. Pre väčšiu hrúbku odrezávanej vrstvy, okolo $10 \mu\text{m}$, je strižné napätie $\tau_s = 0,1 \cdot 10^4 \text{ MN/m}^2$, čo zodpovedá oblasti presného frézovania. So znižujúcou sa hrúbkou odrezávanej vrstvy hodnota strižného napätia stúpa.

Pri energolúčových procesoch sa rozmery odoberanej vrstvy pohybujú od úrovne vzdialenosti atómov v mriežke kovu (asi $0,3 \div 0,4 \text{ nm}$) až po hodnoty veľkosti zrna materiálu, to znamená, že hrúbka odoberanej vrstvy sa pohybuje rozmedzí $10^{-5} \div 10^{-3} \mu\text{m}$. Hodnota minimálnej špecifickej energie potrebnej pre odobratie materiálu musí byť väčšia ako suma väzbovej energie mriežky. Energia väzby atómov pri atmosferickom tlaku je okolo 10 eV ($1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$), vo vysokom vákuu asi 1 eV . Pre hrúbku odoberaného materiálu v oblasti atómovej mriežky, pre chemické a elektrochemické opracovanie, udáva **Taniguchi** (1989) hodnoty potrebnej minimálnej energie $\delta = 10^5 \div 10^4 \text{ MJ/m}^3$. Pre procesy tepelného natavenia, odparenia a napravovania je špecifická energia $\delta = 10^6 \div 10^5 \text{ MJ/m}^3$ vyššia, pretože na vypudenie atómu z mriežky do okolia je potrebné vyvinúť viac energie. Pre porovnanie, minimálna špecifická energia potrebná pre odrezanie hrúbky vrstvy $1 \mu\text{m}$ ocele je okolo $\delta = 10^3 \text{ MJ/m}^3$.

Dôležitými výkonovými ukazovateľmi energolúčových procesov sú príkon P_m , na jednotku plochy na makroskopickej úrovni, a príkon P_a , na jednotkový rozmer častice na mikroskopickej alebo atomárnej úrovni. Tieto veličiny sú tiež označované ako hustota energie (W/m^2). Nasledujúca tabuľka uvádza orientačné hodnoty týchto veličín, pomocou, ktorých je možné určiť orientačne rýchlosť úberu materiálu.

Tab.1 Vstupná hustota energie (W/m^2) na makro a mikro úrovni (spracované podľa Taniguchi (1989))

proces	makroskopická P_m [W/m^2] (stredná hodnota) na plochu, kde dopadá lúč	mikroskopická P_a [W/m^2] (na atomárnej úrovni) na jednotkový rozmer častice	rýchlosť úberu materiálu [m/s] $v = P_m / \delta$
CH a ECM	$10^4 \div 10^5$	$10^{11} \div 10^{12}$	$10^{-7} \div 10^{-6}$
AFM, krehký a húževnatý lom	$10^8 \div 10^9$	$10^{11} \div 10^{12}$	široko meniteľné
mikroobrábanie / brúsenie	$10^6 \div 10^7 / 10^8 \div 10^9$	$10^{11} \div 10^{12} / 10^9 \div 10^{10}$	široko meniteľná
tavenie EBM, LBM, EDM, PAM	$10^9 \div 10^{12}$ $10^8 \div 10^9$	$10^{10} \div 10^{11}$ (pre pulzujúci zdroj)	$10^{-1} \div 10^0$
odparovanie EBM, LBM	$10^{10} \div 10^{11}$	$10^{11} \div 10^{12}$ (pre pulzujúci zdroj)	$10^{-2} \div 10^{-1}$
IBM	$10^5 \div 10^6$	$10^{12} \div 10^{13}$	$10^{-8} \div 10^{-7}$

Nasledujúce kapitoly, venované v úvode vymenovaným energolúčovým technológiám, sú prednostne zamerané na procesy úberu a delenia materiálov.

3.1 Obrábanie ultrazvukom

Obrábanie ultrazvukom (zaužívaná anglická skratka **USM** *Ultrasonic machining*) predstavuje proces, ktorý využíva ultrazvukové vlny (mechanicko-akustické vlnenie) s frekvenciou okolo 20kHz na úber materiálu rozrušovaním povrchu nárazovým účinkom rozkmitaného brusiva.

Proces bol vyvinutý v 50-tych rokoch pre dvojrozmerné a trojrozmerné (2D a 3D) opracovanie keramických materiálov a ostatných tvrdých a krehkých materiálov ako sklo, diamant, tvrdené a tepelne odolné zliatiny, polovodičové materiály a tiež pórovité materiály ako grafit. Prvý patent na priemyselné využitie podal v roku 1945 *Balamuth*, hoci historicky prvý článok o možnostiach použiť ultrazvuk pri obrábaní publikovali *R. W. Wood* a *A. L. Loomis* roku 1927 [8, 14].

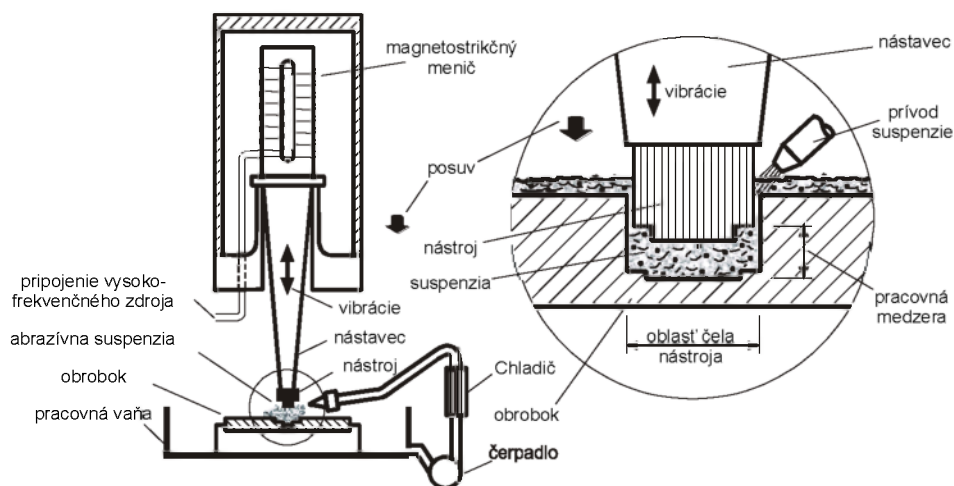
Záujem o USM vzrástol začiatkom 80-tych rokov v dôsledku širšieho využívania keramických a kompozitných materiálov v priemysle. V súčasnosti patrí medzi bežné postupy obrábania tvrdých a krehkých, nevodivých a tiež nekovových materiálov.

USM opracovanie pozostáva z dvoch metód:

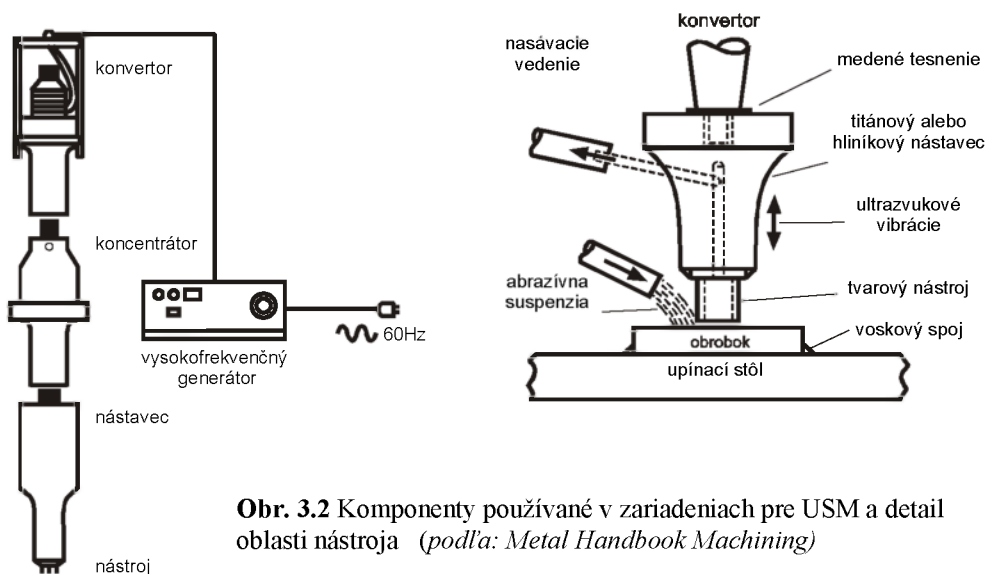
- ultrazvukové obrábanie (USIG alebo USM – *ultrasonic impact grinding*) „klasická“ technológia ultrazvukového opracovania s použitím brúsnej suspenzie a nerotujúceho nástroja.
- rotačné ultrazvukové obrábanie (RUM – *rotary ultrasonic machining*), ultrazvukové opracovanie rotačným nástrojom bez použitia abrazívnej suspenzie.

3.1.1 Princíp ultrazvukového opracovania

Princíp USM opracovania je založený na brúsnom účinku suspenzie kvapaliny (voda, petrolej, lieh, strojný olej) a jemného brusiva, cirkulujúceho medzi obrobkom a nástrojom. Nástroj kmitá frekvenciou v oblasti ultrazvukového vlnenia. Obr. 3.1 zobrazuje princíp opracovania pomocou ultrazvuku. Vysokofrekvenčný zdroj aktivuje zväzok magnetostrikčného materiálu, ktorý vytvára kmitanie s nízkou amplitúdou v držiaku nástroja. Tento kmitavý pohyb je prenášaný malým tlakom nástroja na suspenziu, ktorá obrusuje povrch, vytvára požadovaný tvar obrobku a zároveň odplavuje triesky.



Obr. 3.1 Princíp opracovania ultrazvukom (zdroj: Bellows, Kohls [2])



Obr. 3.2 Komponenty používané v zariadeniach pre USM a detail oblasti nástroja (podľa: *Metal Handbook Machining*)

3.1.1.1 Zariadenie

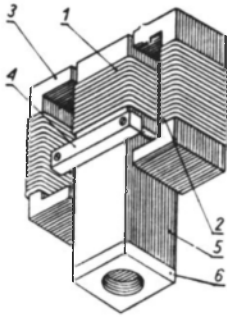
Zariadenie pre ultrazvukové obrábanie pozostáva z generátora prúdu, magnetostrikčného meniča, koncentrátora, pracovného nástroja a čerpadla na privod suspenzie. Jednotlivé komponenty zariadenia majú svoju špecifickú úlohu pre generovanie parametrov procesu, obr.3.2.

Vysokofrekvenčný generátor elektrických kmitov sa používa ako zdroj premeny nízkofrekvenčnej (50Hz) energie na vysokofrekvenčnú energiu (najčastejšie 20 000Hz). Používa sa zdroj o výkone 150 – 2 500W, pričom výkon zdroja závisí od veľkosti plochy použitého nástroja. Obyčajne sa pre nástroje s veľkou plochou vyžaduje väčší výkon zdroja než pre nástroje s menšou plochou. Generátor napája magnetostrikčný alebo piezoelektrický menič, z ktorého sa získavajú mechanické vibrácie rovnakej frekvencie.

Konvertor alebo menič (*transducer*) sa používa na premenu elektrickej energie na energiu mechanicko-akustického kmitania. Je založený na princípe buď magnetostrikčného alebo piezoelektrického javu. Podstata týchto javov je, že niektoré materiály za pôsobenia vonkajšieho magnetického alebo elektrického poľa menia svoju dĺžku napr. železo (Fe), nikel (Ni), kobalt (Co) a ich zliatiny, tiež ferity a iné. Základom zariadenia pre USM opracovanie je teda magnetostrikčný alebo piezoelektrický menič. Na obr.3.3. je magnetostrikčný menič, ktorého princíp je najčastejšie popisovaný. Kapacita meniča je daná koeficientom magnetostrikčného predĺženia:

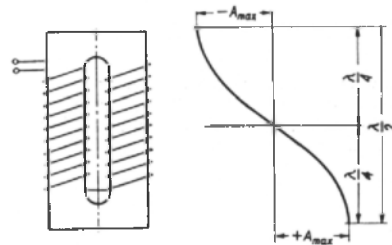
$$\varepsilon_m = \frac{\Delta \ell}{\ell} \quad (3.1)$$

kde $\Delta \ell$ je prírastok dĺžky, ℓ - dĺžka magnetostrikčného jadra. Predĺženie je závislé od druhu materiálu magnetostrikčného meniča. Najčastejšie sa používajú zliatiny typu permaloy a permedur. Sú to materiály s výborným koeficientom magnetostrikčného predĺženia [6], [8], [10].



Obr.3.3 Magnetostrikčný menič (zdroj: Kaczmarek)

1 - vysokofrekvenčné vinutie; 2 - polarizačné vinutie;
3 – teleso; 4 –magnetostrikčný nosič;
5 – magnetostrikčné jadro; 6 – prípojka amplitúdového meniča



Obr.3.4 Zmena vlny predĺženia pozdĺž dĺžky magnetostikčného meniča

(zdroj: Kaczmarek [6])

Obr.3.4 ukazuje zmenu vlny predĺženia pozdĺž dĺžky magnetostikčného meniča. Ak je uzol vlny kmitania v strede veľkosti magnetostrikčného meniča, potom maximálna hodnota amplitúdy kmitu vzniká vo vzdialenosti $1/4$ vlnovej dĺžky od stredu a maximálna výchylka zodpovedá dĺžke magnetostriktora $\ell = 0,5 \lambda$, pričom vlnová dĺžka λ sa vypočíta podľa vzťahu:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{1}{f} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3.2)$$

kde c – rýchlosť zvuku (m/s) v magnetostrikčnom materiále, f – frekvencia zmeny magnetického poľa (1/s), E - Youngov modul pružnosti (MPa), ρ – merná hmotnosť magnetostrikčného materiálu ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$). Ak je daný magnetostrikčný materiál a jeho dĺžka ℓ , podmienka (3.2) bude splnená voľbou vhodnej frekvencie, nazývanej rezonančná frekvencia, ktorá sa vypočíta podľa vzťahu [6]:

$$f_r = \frac{1}{2\ell} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3.3)$$

Koncentrátor (*booster*) je zosilňovač kmitov, ktorý sa vkladá medzi menič a nástavec. Jeho úlohou je zvyšovať amplitúdu ultrazvukových kmitov (UZ). Amplitúda UZ kmitov sa obvyčajne pohybuje v rozmedzí od $0,001 \div 0,1 \mu\text{m}$ v závislosti od druhu materiálu [6]. Pre obrábanie ultrazvukom je potrebná vyššia amplitúda až v rozmedzí $0,025 \div 0,09 \text{ mm}$ [1]. Zosilňovač, obvyčajne kovová trubica alebo tyč cylindrického tvaru, má dĺžku asi 1,5 násobok vlnovej dĺžky zvuku, aby sa zabezpečila maximálna amplitúda kmitov

Nástavec (*horn*) ako ďalší element zariadenia, vedie kmitanie na nástroj. Je to trubica s dĺžkou okolo 120 mm obvyčajne vyrobená z titánu alebo hliníka. Nástavce väčších dĺžok sú z hliníka. K nástroju je pripojený pevne (pájkovaním) alebo rozoberateľne (závitom). Nástroj je k nástavcu pripojený v oblasti maxima vlny s presnosťou $\pm 0,04\lambda$, aby nedošlo k útlmu kmitov (λ – dĺžka vlny kmitov). Tvar nástavca je cylindrický so stupňovitou zmenou priemeru alebo kužeľovitý, zložitejšie nástavce majú exponenciálny tvar a sú vyrobené s vysokou presnosťou, aby zosilňovali amplitúdu kmitov na nástroji. Rôzne tvary nástavcov a vplyv ich rozmerov na zosilnenie amplitúdy kmitov (najčastejšie zmenou priemeru) uvádzajú *Buda, Békés* [3] a *Thoe et al.* [14].

Nástroj (*ultrasonic tool* alebo *sonotrode*) má negatívny tvar vytváraného profilu (tvar resp. otvor). Základnou požiadavkou pre výrobu nástrojov je vhodný nástrojový materiál, jeho dobrá odolnosť voči opotrebeniu a vysoká únavová pevnosť. Najčastejšie sa vyrába z nehrdzavejúcej ocele s vyššou trvanlivosťou, ale tiež z monelu či molybdénu. Pre kusovú výrobu a tvarovo zložitejšie výrobky aj z mosadze. Mosadz je dobre obrábiteľná, ale má nižšiu odolnosť voči opotrebeniu. Voľba materiálu nástroja je závislá aj od druhu obrábaného materiálu.

3.1.1.2 Charakteristiky ultrazvukového obrábania

Parametre procesu ultrazvukového opracovania na princípe USIG pre priemyselné zariadenia sa pohybujú v nasledujúcich rozsahoch [1], [9], [11], [14]:

- výkon vysokofrekvenčného zdroja: $50 \div 2\,400$ W;
- frekvencia kmitania: $15\,000 \div 40\,000$ Hz, najčastejšie používaný rozsah pre komerčne vyrábané zariadenia je okolo 20 000 Hz;
- amplitúda kmitov: $0,013 \div 0,10$ mm;
- nástrojový materiál: antikorózna oceľ, molybdén, monel, mosadz;
- druh brusiva: karbid bóru a kremíka (B_4C tvrdosť podľa Knoopu 2 800 HK, SiC 2 500 HK) diamantový prach 6 500 ÷ 7 000 HK, kubický nitrid bóru (KNB 4 700 HK), oxid hliníka (Al_2O_3 2 100 HK);
- doporučená veľkosť zrna brusiva: pre hrubovanie $0,05 \div 0,03$ mm, zrnitosť $200 \div 400$; pre dokončovanie $0,014 \div 0,009$ mm, zrnitosť $800 \div 1000$ (podľa ISO 525-75);
- suspenzia: voda, petrolej, lieh, strojný olej; koncentrácia brusiva sa pohybuje v rozmedzí $20 \div 60\%$, najčastejšie sa používa suspenzia typu voda 50%, brusivo 50%, doporučená teplota suspenzie je $2 \div 5$ °C, ale proces môže prebiehať aj pri izbovej teplote suspenzie;
- rýchlosť posuvu nástroja: $20 \div 50$ mm/min;
- rýchlosť rezania: mení sa v závislosti od druhu materiálu obrobku, obr.3.5;
- vzdialenosť medzi nástrojom a obrobkom: nástroj nie je v priamom kontakte s obrobkom, ale asi vo vzdialenosti $0,025 \div 0,075$ mm od povrchu obrobku.

Materiál	Rýchlosť rezania [mm.min ⁻¹]	Pomer úbytku materiálu obrobku k opotrebeniu nástroja
sklo	3,8	100 : 1
ferit	3,2	100 : 1
grafit	2,0	100 : 1
keramika	1,5	75 : 1
kryštál	1,7	50 : 1
karbid volfrámu	0,25	1.5 : 1
karbid bóru	0,20	2 : 1
nástrojová oceľ	0,13	1 : 1

Obr. 3.5. Rýchlosť rezania pre
vybrané materiály [mm/min]
(spracované podľa údajov [1],[11])

Podmienky rezania:
nástrojový materiál: oceľ,
brusivo: B_4C , zrnitosť 320,
priemer nástroja 12,7mm,
dĺžka otvoru 12.7mm

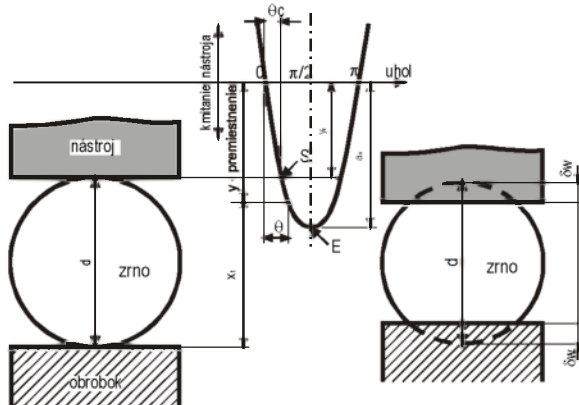
Základné technické a ekonomické ukazovatele USM vhodné pre porovnanie procesu a hodnotenie jeho účinnosti sú:

- úber materiálu
- opotrebenie nástroja
- kvalita opracovaného povrchu

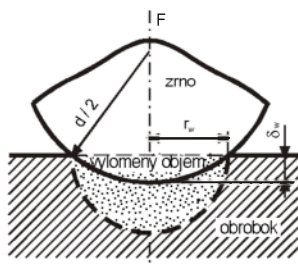
3.1.2 Úber materiálu

USM je abrazívny proces a úber materiálu je predmetom extenzívneho výskumu a vysvetľuje sa nasledujúcimi mechanizmami: [3, 7, 14]

- mechanickým účinkom abrázie (odbrusovania) priamym nárazom častice na povrch obrobku
- mikro vydrobovaním (*microchipping*) po náraze voľne sa pohybujúcej brúsnej častice,
- kavitačným účinkom brúsnej suspenzie.
- chemickým pôsobením spojeným s vlastnosťami kvapalného média v suspenzii.

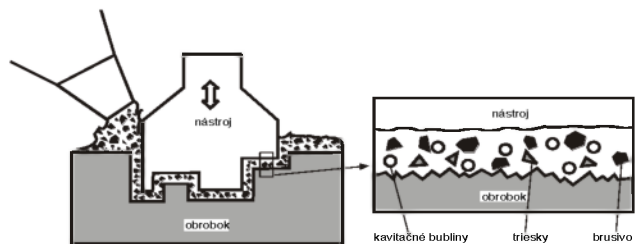


Obr. 3.6 Účinok rozkmitaného zrna brusiva na nástroj a obrobok (podľa Kainth et. al. [12])



Obr. 3.7 Zóna kontaktu zrna s obrobkom (podľa Kainth et al. [12])

δ_w - hĺbka vtlačenia do materiálu
 r_w - polomer kontaktu zrna



Obr. 3.8 Detail pracovnej zóny s úlomkami triesky, kavitačnými bublinami a brúsnymi zrnami rozptýlenými v suspenzii

Priamy náraz brúsnych častíc na povrch materiálu s vysokou kinetickou energiou, ktorú získali od kmitajúceho nástroja, rozrušuje jeho celistvosť. Účinok zrna brusiva na materiál obrobku a nástroja zjednodušene ukazuje obr.3.6 a detail zóny vtlačenia zrna brusiva obr.3.7 [12].

Tvrdé a krehké materiály (sklo, keramika), ktoré sú pre USM metódy najvhodnejšie, sa pôsobením nárazu častíc porušujú krehkým vylamovaním, čiastočky materiálu vo forme triesky sa odštiepajú alebo vylamujú z povrchu.

Pri mäkkých a húževnatých materiáloch (olovo, meď, väčšina ocelí) sa brusivo vtlača do povrchovej vrstvy a spevňuje ju, ďalším nárazom rozkmitanej častice sa spevnený povrch obrobku postupne rozrušuje.

Kavitačný účinok spôsobuje mikrotrhliny v povrchovej vrstve materiálu. Pri šírení ultrazvukových kmitov vznikajú v suspenzii bubliny, obr.3.8, ktoré v dôsledok nárazu na povrch materiálu praskajú a vybuchujú. Výbuch bubliny tiež rozkmitá abrazívnu časticu, ktorá pri náraze na povrch obrobku vyvoláva vznik mikrotrhlín. Postupne do mikrotrhlín a do pórov materiálu vnikne kvapalina zo suspenzie a spôsobí odštiepenie častí materiálu. **Kremer** [7] popisuje kavitačný jav pri ultrazvukovom opracovaní grafitu ako prioritný účinok úbytku materiálu. Kavitačný účinok USM je však slabý v porovnaní s priamym nárazom a predstavuje asi 5% - ný podiel na celkovom úbere materiálu [6]. Čas kontaktu medzi časticami brusiva a povrchom je veľmi malý asi $10 \div 100 \mu s$, rovnako ako plocha kontaktu [11].

Intenzitu úberu materiálu, alebo tiež výkon opracovania pri abrazívnom pôsobení častíc brusiva na povrch, určil **Kaczmarek** [6] ako:

- intenzita objemového úberu (*volumetric removal rate - VRR*) :

$$Q_v = \frac{\ell \cdot B \cdot a}{t_m} \quad [\text{mm}^3/\text{min}] \quad (3.4)$$

- intenzita plošného úberu (*surface removal rate*)

$$Q_s = \frac{B \cdot \ell}{t_m} \quad [\text{mm}^2/\text{min}] \quad (3.5)$$

- lineárny úber (*linear removal rate*):

$$A_L = \frac{a}{t_m} \quad [\text{mm}/\text{min}] \quad (3.6)$$

kde B je šírka povrchu, t_m – čas pôsobenia častice na povrch, ℓ – dĺžka pracovnej plochy, a – hĺbka rezu (hrúbka vrstvy odstraňovaného materiálu v jednej vrstve), hĺbka rezu nie je jednotná na celom opracovanom povrchu.

Na produktivitu USM opracovania, ktorá môže byť udaná lineárnou alebo objemovou intenzitou úberu vplyva viacero faktorov, tieto faktory zároveň ovplyvňujú kvalitu opracovaného povrchu, sú to:

- vlastnosti materiálu
- akustický systém
- vlastnosti suspenzie

3.1.2.1 Vlastnosti materiálu obrobku

Ultrazvuková technológia je vhodná pre opracovanie kovových a nekovových materiálov s vyššou tvrdosťou nad 40 HRC, ale odporúča sa aj pre kompozitné materiály a pórovité materiály ako grafit.

Vlastnosti materiálu obrobku, ktoré ovplyvňujú produktivitu USM sú predovšetkým krehkosť a tzv. nárazová tvrdosť (*impact hardness*). Nízka produktivita úberu materiálu je spojená s vyššou plasticitou materiálu obrobku. **McGeough** [8] uvádza tzv. „kritérium krehkosti“, podľa ktorého delí materiály do troch skupín v závislosti na účinnosti USM opracovania vid' údaje v tab.3.1. Kritérium krehkosti τ_x je pomer pevnosti v strihu k lomovému napätiu daného materiálu.

Tzv. nárazová tvrdosť (*impact hardness*) je rovnako dôležitá vlastnosť ako krehkosť materiálu. Hĺbka vtlačenia δ_w , ktorú spôsobí náraz častice je nepriamo úmerná tvrdosti materiálu (tvrdosť podľa Brinella HB) podľa vzťahu [8]:

$$HB = \frac{F_c}{4\delta_w d} \quad (3.7)$$

kde: d - je priemer vtlačenej oblasti, F_c - sila pôsobiaca na časticu.

Z uvedeného vyplýva rôzne správanie sa tvrdých a krehkých kovových aj nekovových materiálov. Tab.3.2 uvádza vlastnosti vybraných sledovaných materiálov a prevládajúci mechanizmus úberu pri ultrazvukovom vŕtaní otvorov s priemerom 10 mm [4].

Pri náraze abrazívnych častíc na povrch kovových a húževnatých materiálov, vzniká plastická deformácia a spevnenie povrchovej vrstvy je bez výrazného vylamovania materiálu obrobku. K výraznému vylamovaniu dochádza pri krehkých materiáloch, kde častice triesky sú vyštiepvané v tvare pyramídy a úber materiálu je kontinuálny vo forme malých kráterov. Veľkosť triesky je asi 1/10 veľkosti abrazívnych častíc alebo niekoľko mikrometrov [4].

Kompozitné materiály s vlákňitou štruktúrou a polymérovou maticou sa nárazom abrazívnych častíc porušujú krehkým lomom vlákien a plastickou deformáciou matrice.

Tab. 3.1 Vplyv kritéria krehkosti na kvalitatívnu účinnosť USM (zdroj: McGeough [8])

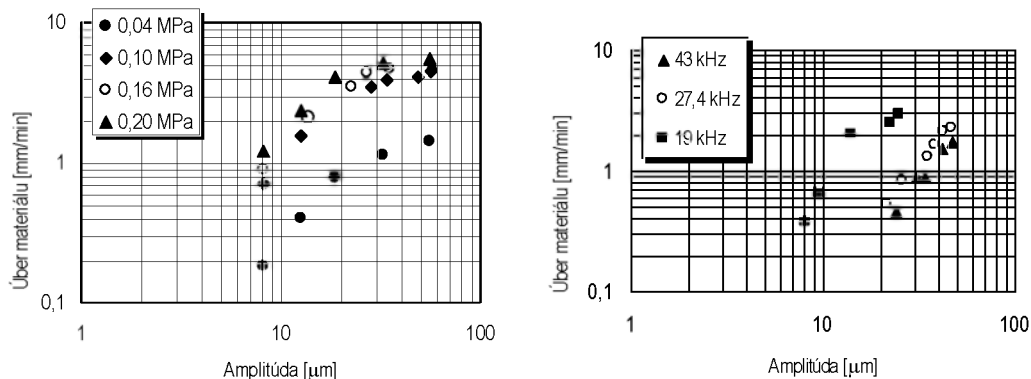
Kritérium krehkosti	Účinnosť USM	Typické materiály
$T_x > 2$	Vysoká	sklo, keramika, diamant, krištáľ
$1 < T_x < 2$	Stredná	temperované a tvrdé ocele a zliatiny,
$0 < T_x < 1$	Nízka	meď, olovo, väčšina ocelí

Tab. 3.2 Porovnanie vlastností vybraných druhov materiálov a prevládajúci mechanizmus úberu materiálu (spracované podľa Dam, Quist, Schreiber [4])

Materiál	Tvrdosť HV	K_{IC}	Mechanizmus úberu materiálu
sklo	asi 700	0.7	krehký lom
Al_2O_3	1 750	4	
TiB_2	1 950	-	
SiC	2 500	5	krehký lom a plastická deformácia
Si_3N_4 lisovaný za tepla	2 000	6	
tetragonálny ZrO_2 stabilizovaný ytriom	850	7	plastická deformácia
tetragonálny ZrO_2 stabilizovaný cérom	1 400	8	

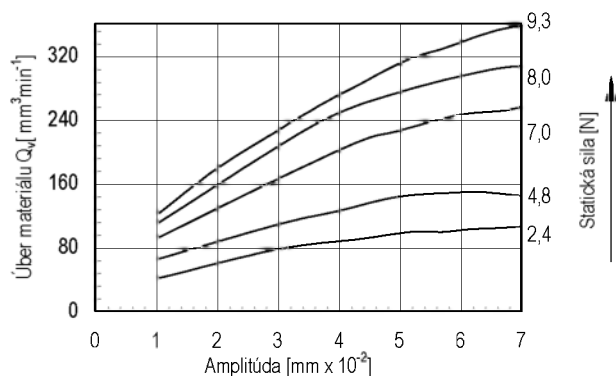
3.1.2.2 Akustický systém

Akustický systém je charakterizovaný frekvenciou a amplitúdou ultrazvukových kmitov. Frekvencia sa pohybuje v rozmedzí $15 \div 40$ kHz, niekedy až 50 kHz, priemyselné zariadenia najviac využívajú oblasť okolo 20 kHz. Veľkosť amplitúdy upravených kmitov pre ultrazvukové opracovanie je v rozmedzí od 0,013 do 0,10 mm, v závislosti na zariadení.



Obr. 3.9 Vplyv amplitúdy kmitov na úber materiálu pri zmene tlaku nástroja a pri zmene frekvencie kmitania (*Kremer et al.[7]*)

obrobok – legovaná nástrojová oceľ; nástroj – uhlíková oceľ; brusivo B₄C, zrnitosť 120 podľa ISO



Obr.3.10 Vplyv amplitúdy kmitov a statickej sily na mieru úberu materiálu

(*Kainth et al.[12]*)

Podmienky :

vŕtanie otvoru do skla

s priemerom $d = 12,7$ mm

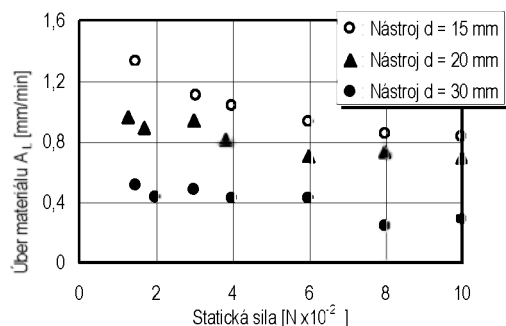
frekvencia – 25,2 kHz

brusivo - B₄C, zrnitosť 400 podľa ISO

Zmena frekvencie kmitov nemá výrazný vplyv na parametre procesu USM. Väčšina komerčne dostupných zariadení má možnosť zmeny rozsahu frekvencie v malom rozpätí. *Kremer* [7] uvádza, že vplyv frekvencie kmitov na rýchlosť úberu je lineárna a závisí od vlastností opracováneho materiálu. Výraznejší je vplyv amplitúdy kmitov na úber. Amplitúda kmitov závisí od druhu zosilňovača a na riadení ultrazvukového zdroja. S rastom amplitúdy kmitov rastie rýchlosť úberu materiálu. Rýchlosť rezania závisí od amplitúdy.

Vplyv rozsahu amplitúdy na zvyšovanie rýchlosti úberu materiálu je obmedzený účinkom zrnitosti abrazívnych častíc. Obr.3.9 a, b ukazujú overené závislosti rýchlosti úberu materiálu na zmene amplitúdy pre rôzne frekvencie kmitov a rôznu veľkosť statického tlaku (prítlaku) nástroja.

Rozenberg a Nepiras [8, 14] poukázali na skutočnosť, že existujú hraničné (optimálne) hodnoty statického tlaku nástroja a amplitúdy kmitania na stúpajúci úber materiálu, obr.3.10. Rovnako **Kremer** [7] uvádza, že pri vŕtaní grafitu dochádza pri vyšších hodnotách statického tlaku nástroja k zníženiu intenzity úberu materiálu, obr.3.11.

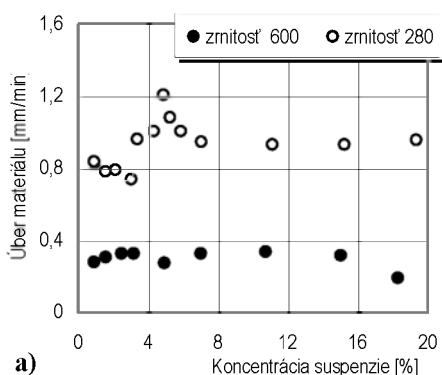


Obr.3.11 Vplyv statickej sily na úber materiálu (*Kremer et al.[7]*)

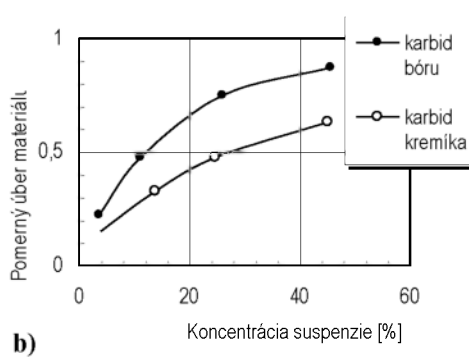
obrobok – grafit ELLOR 9
 nástroj – oceľ XC38
 brusivo- B_4C , zrnitosť 280
 frekvencia – 25,2 kHz
 amplitúda – 50 μm
 koncentrácia brusiva 20%

3.1.2.3 Suspenzia

Na úber materiálu majú vplyv vlastnosti suspenzie dané koncentráciou, veľkosťou zrna brusiva, tvrdosťou brusiva a spôsobom prívodu suspenzie medzi nástroj a obrobok. Rozsah koncentrácie brusiva v suspenzii sa pohybuje v rozmedzí 20 až 60%. Nosné médium pre brusivo (obyčajne voda) musí mať nízku viskozitu a hustotu, dobrú zmáčavosť a vysokú tepelnú vodivosť pre účinné chladenie. Na obr. 3.12 a, b [8] je závislosť úberu materiálu na koncentrácii suspenzie pri opracovaní materiálov ako grafit a sklo.



a)



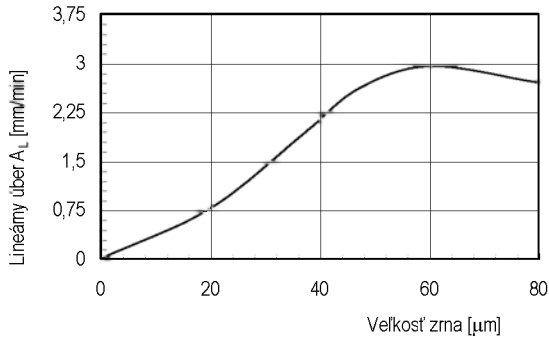
b)

Obr. 3.12 Vplyv zmeny koncentrácie suspenzie na úber materiálu: **a)** vŕtanie grafitu d = 20mm, podmienky rovnaké ako pri obr. 3.11 (*Kremer et al.[7]*); **b)** opracovanie skla (*McGeough[8]*)

Kavitačný efekt procesu, systém prívodu suspenzie medzi nástroj a obrobok a statický tlak nástroja môžu ovplyvniť účinnosť koncentrácie brusiva pri úbere materiálu.

Veľkosť zrna má podobný účinok na úber materiálu ako amplitúda, obr. 3.13. Optimálna intenzita úberu materiálu (*removal rate*) sa dosahuje, ak je veľkosť zrna porovnateľná s veľkosťou amplitúdy. Tvrdosť brusiva v suspenzii tiež ovplyvňuje úber materiálu, vid' obr.3.12b.

Kremer [7] uvádza, že intenzita úberu skla pri použití B_4C brusiva je o 15 až 20% vyššia než pri použití SiC brusiva. Zároveň konštatuje, že pre pórovité materiály ako je grafit, tvrdosť brusiva nie je výrazne rozhodujúca, podľa jeho výsledkov rozdiel v intenzite úberu medzi vyššie uvedenými brusivami pre opracovanie grafitu predstavuje iba o 10% vyššiu intenzitu pre tvrdšie brusivo na báze B_4C .

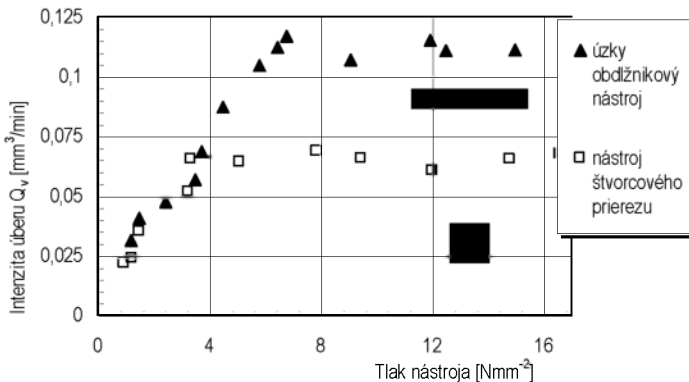


Obr.3.13 Účinok veľkosti zrna na úber materiálu (McGeough [8])

3.1.3 Materiál nástroja a opotrebenie nástroja

Nevýhodou USM opracovania je nepriaznivý účinok brusiva na materiál nástroja a jeho následné opotrebenie. Pre produktivitu opracovania je rozhodujúci tvar nástroja a veľkosť jeho aktívnej plochy. Veľké nástroje obyčajne rýchlo pohlcujú ultrazvukovú energiu a tlmia kmitanie. Zväčšenie plochy nástroja redukuje úber materiálu v dôsledku zníženia amplitúdy kmitov.

Efekt tvaru nástroja sa prejavuje zmenou produktivity. Závislosť na obr.3.14 ukazuje vplyv tvaru prierezu nástroja na intenzitu úberu materiálu pri konštantnej pracovnej ploche. Závislosť zároveň dokumentuje vplyv statického tlaku nástroja pri USM. Do určitej hodnoty tlaku, ktorá sa



Obr.3.14 Účinok tvaru nástroja na úber materiálu (McGeough [8])
obrobok – sklo
plocha obidvoch nástrojov 16 mm²

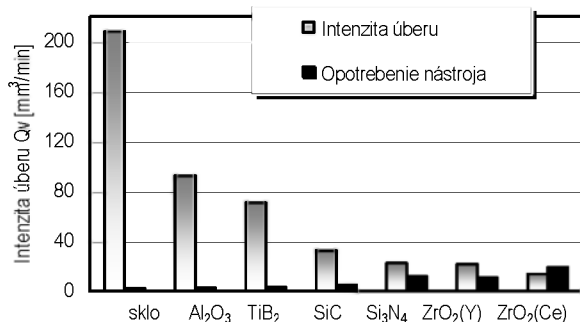
stanoví obyčajne experimentálne, úber materiálu narastá, potom napriek vzrastu tlaku nástroja intenzita úberu zostáva na konštantnej úrovni [8].

Pre opotrebenie nástroja pri USM platia podobné pravidlá ako pri klasickom obrábaní, aj keď v tomto prípade nie je nástroj v priamom kontakte s obrobkom.

Opotrebenie závisí na dvojici materiál obrobku/nástroj a na použitom druhu brusiva. Základnou požiadavkou je vyššia tvrdosť nástroja ako obrobku. **Kaczmarek** [6] uvádza, že pri

opracovaní skla nástrojovou oceľou je relatívny úbytok hmoty nástroja 1%. Ak sa použije karbidový nástroj a brúsny prášok B_4C , redukuje sa relatívne opotrebenie nástroja na 0,1%. Nástroj sa opotrebuje rýchlejšie, ak brusivo a obroбок sú tvrdšie ako materiál nástroja. Pri opracovaní wolfrám karbidu brusivom z bór karbidu a nástrojom vyrobeným z mosadze relatívne opotrebenie nástroja dosahuje 140% [6].

To dokazuje, že proces mechanického odbrusovania a vyštiepavania resp. vylamovania (*chipping*) materiálu pri USM sa vyskytuje paralelne pre nástroj aj obroбок. Intenzita opotrebenia závisí na pevnostných vlastnostiach materiálu. Obr.3.15 ukazuje závislosť pomeru úberu materiálu k úbytku (opotrebeniu) nástroja pre rôzne druhy materiálov [5].



Obr.3.15 Porovnanie miery úberu pre rôzne druhy materiálu obroбку a opotrebenia nástrojového materiálu z ocele St 37 pri USM vŕtaní otvorov s priemerom $d=10\text{mm}$, brusivo B_4C zrnitosť 280 podľa ISO (Dam et al. [4])

3.1.4 Vlastnosti opracovaného povrchu

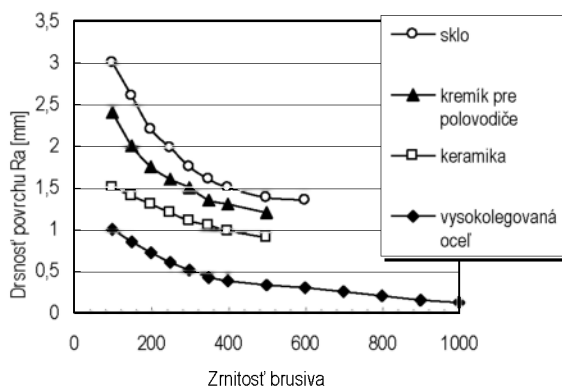
Hodnotenie vlastností opracovaného povrchu vychádza z posúdenia dosahovanej drsnosti a presnosti opracovaného tvaru. Komerčné zariadenia zabezpečujú rozmerové tolerancie v rozmedzí $\pm 0,03$ až $0,005\text{ mm}$ a drsnosť Ra od $0,51 \div 0,76\text{ }\mu\text{m}$ [9]. Drsnosť povrchu a jeho akosť ovplyvňuje koncentrácia suspenzie, veľkosť zrna brusiva a ich tvrdosť, amplitúda chvenia (vibrácií). Povrch nie je ovplyvnený teplom.

3.1.4.1 Drsnosť povrchu

Kvalita opracovaného povrchu závisí na vlastnostiach opracovaného materiálu, na akustickom systéme USM a na vlastnostiach suspenzie. Podmienky procesu, ktoré vplyvajú na produktivitu majú výrazný účinok aj na stav opracovaného povrchu.

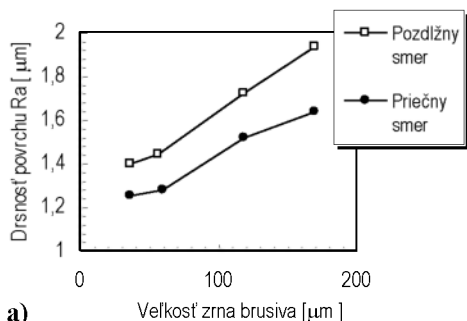
Hlavná premenná procesu – zrnitosť brusiva – má vo všeobecnosti najvýraznejší účinok. Obr. 3.16 ukazuje priebeh dosahovanej drsnosti povrchu v závislosti na zmene zrnitosti brusiva pre opracovanie rôznych druhov materiálov – krehkých nekovových materiálov a tvrdej legovanej ocele.

Hocheng a Hsu [5] sledovali drsnosť povrchu v pozdĺžnom a priečnom smere pri vŕtaní otvoru s priemerom $d = 10\text{mm}$ do kompozitného materiálu zloženého z uhlíkových vlákien v polymérovej matici. Obr. 3.17a dokumentuje vplyv veľkosti zrna brusiva na drsnosť Ra meranú v pozdĺžnom a priečnom smere. Obr.3.17b ilustruje vplyv koncentrácie brusiva v suspenzii na drsnosť Ra .

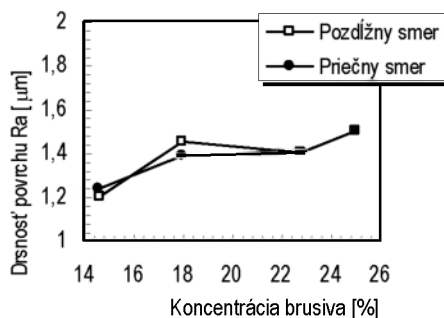


Obr. 3.16 Závislosť drsnosti povrchu od použitej zrnitosti brusiva pre rôzne druhy materiálov (spracované podľa McGeough[8] a Buda-Békés [3])

Kremer [7] konštatuje na základe výsledkov viacerých bádateľov, že zvýšenie amplitúdy kmitov zvyšuje drsnosť povrchu. Zmena prítlačku nástroja v širokom rozsahu má len malý účinok na akosť opracovaného povrchu. **Nepiras** (1956) a **Rozenberg** (1973) [14] nezávisle na sebe uvádzajú, že pri vŕtaní je drsnosť po obvode otvoru vyššia ako v dolnej časti, ale ak sa použije veľmi jemná zrnitosť brusiva na úroveň plavených práškov je dosahovaná drsnosť povrchu otvoru rovnaká v každom smere.



a)



b)

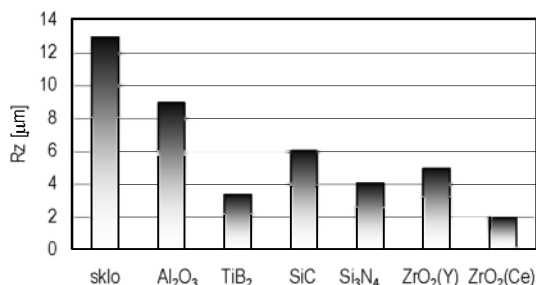
Obr. 3.17 a) Vplyv veľkosti zrna brusiva na drsnosť povrchu – obrobok: kompozit na báze carbon/epoxy, frekvencia 20kHz, brusivo SiC, zrnitosť 150, koncentrácia 14%, nástroj: oceľ;

b) Vplyv koncentrácie brusiva na drsnosť povrchu (zdroj: Hocheng, Hsu [5])

Tab.3.3 Údaje pre ultrazvukové obrábanie keramických materiálov so zrnitosťou brusiva 320

Materiál	Tvrdosť HV	Drsnosť Ra [μm]	Doporučené brusivo	Úber [mm ³ /min] Nástroj d=5mm	Úber [mm ³ /min] Nástroj d=10mm
Grafit	65	1-2	SiC/B ₄ C	164	224
SiO ₂	500	0,85	SiC/B ₄ C	39	50
Al ₂ O ₃	1 000	0,90	SiC/B ₄ C	7,6	9,3
ZrO ₂	1100	0,75	B ₄ C	0,65	3,1
Sialon	1 500	0,40	B ₄ C	1,20	1,8
SiC	2 400	0,30	B ₄ C	0,6	3,5

Druh materiálu obrobku ovplyvňuje výslednú drsnosť povrchu. Na obr.3.18 sú porovnané dosiahnuté hodnoty drsnosti R_z pre rôzne druhy keramických materiálov [4]. Tab.3.3 tiež uvádza porovnávacie hodnoty drsnosti povrchu vyjadrené cez R_a , ako aj doporučené brusivo a dosiahnuté hodnoty úberu materiálu pre rôzne keramické materiály, ako to uvádza *Kremer* a *Gilmor* [14]. Tieto výsledky hovoria o tom, že materiály, ktoré vykazujú vysokú produktivitu pri USM opracovaní (hodnoty úberu nad 50 mm³/min) majú zároveň vyššie hodnoty drsnosti (porovnaj s obr.3.15).



Obr. 3.18 Drsnosť povrchu pri ultrazvukovom obrábaní keramických materiálov
Podmienky ako na obr.3.15
(*Dam et al. [4]*)

3.1.4.2 Presnosť rozmerov pri ultrazvukovom obrábaní

Vo všeobecnosti je presné opracovanie limitované najmä relatívnym tvarovým a rozmerovým opotrebením nástroja. Aj keď pri ultrazvukovom obrábaní nástroj je len vo funkcii tzv. tvarovača, pre dosiahnutie vysokej presnosti sa vyžaduje jeho tvarová a rozmerová stálosť počas procesu úberu materiálu. To znamená, že čím vyššia je požiadavka na rozmerovú presnosť produktu, tým musí byť materiál nástroja odolnejší voči opotrebeniu. Rozmerové opotrebenie nástroja ako kritérium je určené vzťahom podľa [6]:

$$m_s = \frac{\varepsilon}{\Delta} \quad (3.8)$$

kde ε je chyba udávaná ako dolná alebo horná odchýlka od nominálneho rozmeru, Δ je dovoľená odchýlka rozmerov opracovaného povrchu.

Parametre procesu USM, ktoré vplyvajú na produktivitu opracovania majú rovnaký vplyv aj na presnosť ultrazvukového opracovania. Najviac vplyva na odchýlku rozmerov zrnitosť brusiva. Presnosť nástroja, jeho tuhosť a odolnosť voči chveniu, rovnako ako aj veľkosť zŕn brusiva a intenzita opotrebenia nástroja majú najvýraznejší vplyv na presnosť rozmerov.

Veľkosť zrna brusiva, ako už bolo spomenuté, má dominantný vplyv nielen na akosť, ale aj na presnosť povrchu. Väčšie zrno spôsobuje rýchlejší úber materiálu, ale menšiu presnosť a vyššiu drsnosť. Ak sa použijú malé zrná (zrnitosť v oblasti plavených práškov) intenzita úberu je pomalšia a dosahuje sa vyššia akosť opracovaného povrchu a tiež vyššia presnosť rozmerov.

Tab 3.4 ilustruje dosahovanú presnosť rozmerov pre zvolenú zrnitosť brusiva [1].

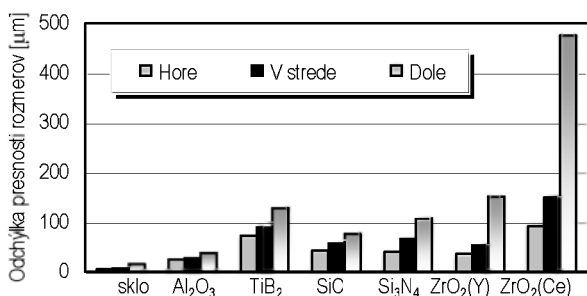
Presnosť je ovplyvnená tiež veľkosťou plochy nástroja, amplitúdou kmitov a materiálom obrobku. Väčšina pojednaní o presnosti pri USM sa týka výroby otvorov a ich odchýliek od nominálneho rozmeru. Pri hodnotení rozmerovej presnosti pri výrobe otvorov ultrazvukovým

opracovaním sa sledujú odchýlky rozmerov, ako aj kužeľovitosť otvorov, ich asymetria a oválnosť otvorov a tiež vlnitosť povrchu. Oválnosť a asymetria otvorov vznikajú v dôsledku laterálneho (bočného) chvenia a v dôsledku nepresnosti posuvu nástroja.

Tab. 3.4 Vzťah medzi zrnitosťou a presnosťou

Zrnitosť brusiva (ISO)	Presnosť rozmerov [μm]
240	0,38
800	0,25

Na presnosť vyrobených otvorov má výrazný vplyv aj materiál obrobku ako to ilustruje obr. 3.19. Autori [5] sledovali kužeľovitosť vyrobených otvorov v rôznych keramických materiáloch. Zaujímavosťou je, že materiály, ktoré vykazovali veľmi dobrú drsnosť povrchu po USM opracovaní, ako napr. ZrO_2 , mali nepriaznivé výsledky pri odchýlkach presnosti rozmerov (porovnaj obr.3.18 a obr. 3.19).



Obr.3.19 Odchýlka presnosti rozmerov od nominálneho priemeru otvoru pri USM vŕtaní otvorov s priemerom 10mm (podľa Dam et al.[4])

3.1.5 Hlavné oblasti použitia ultrazvukového opracovania

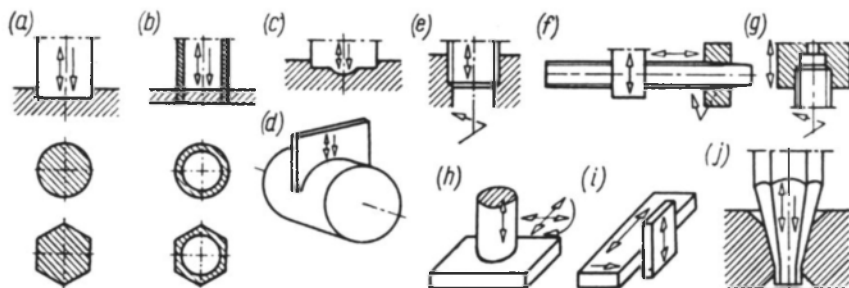
Postupy USM sa používajú v celom rade výrobných procesov. Doporučujú sa pre materiály s tvrdosťou od 35 ÷ 40 HRC a viac, vtedy sa dosahuje optimálna produktivita procesu. Vo všeobecnosti sa doporučuje pre opracovanie plôch do prierezu 1000 mm² [1, 2, 14].

Pri voľbe technológie je nutné experimentálne a empiricky overiť poznatky pre každú kombináciu parametrov, pokiaľ nie je zaručená dodávateľom zariadenia a technológie. Obr.3.20 ukazujú niektoré najčastejšie spôsoby rozmerového ultrazvukového opracovania.

USM technológia sa charakterizuje ako širokospektrálna, načo poukazujú aj najvýznamnejšie oblasti použitia, ako sú:

- delenie materiálov;
- hĺbenie drážok a otvorov kruhových ale aj nesymetrických tvarov. Komplexnosť tvaru je limitovaná iba konfiguráciou nástroja. Produktivita je obmedzená opotrebením nástroja. Pri výrobe otvorov je pomer hĺbky otvoru k jeho šírke limitovaný v pomere 3:1 [2]. Môžu sa vyrábať otvory do najmenšieho priemeru 0.003mm;
- vŕtanie hlbokých otvorov pre hlavňové systémy, kde sa využíva ultrazvukové kmitanie nástroja pre intenzifikáciu klasického vŕtania;
- frézovanie a rezanie závitov;
- výborná produktivita sa dosahuje pri brúsení, leštení a lapovaní skla a keramiky;

- opracovanie tvarovo zložitých elektród pre elektroiskrové metódy opracovania;
- výroba tvárniacich nástrojov zo spekaného karbidu;
- výroba dýz z keramického materiálu;
- rezanie a vŕtanie kompozitných materiálov a vlákien KEVLAR, rezanie termoplastov a rezanie gumy, kde sa vytvárajú tzv. čisté rezy bez ostrapov;
- tvarovanie diamantov a iných drahých kameňov použitím diamantového prášku alebo prášku z kubického nitridu bóru do brúsnej suspenzie.



Obr.3.20 Druhy ultrazvukového obrábania a), b) výroba kruhových a tvarových otvorov; c) gravírovanie; d) delenie; e), f) rezanie vnútorných závitov; g) rezanie vonkajších závitov; h), i), j) lapovanie a leštenie rovinných, bočných plôch a otvorov (zdroj: Kaczmarek [6])

Okrem obrábania sa princíp ultrazvuku využíva aj v iných procesoch ako sú:

- **čistenie produktov a dielcov** – odmasťovanie pred následnou operáciou povlakovania, predúprava povrchu pre nanášanie oteruvzdorných vákuovo naprašovaných (PVD) vrstiev na rezné nástroje, čistenie zlatých a strieborných šperkov;
- **spájkovanie** – spájkovanie hliníka, kde sa využíva deštruktívny účinok ultrazvukových kmitov na odstránenie oxidickej vrstvy na povrchu hliníka,
- **zváranie** – spájanie materiálov bez tepelného zdroja, spájanie plastických hmôt, zváranie fólií [10].
- **tvárnenie** – špeciálne postupy tvárnenia.

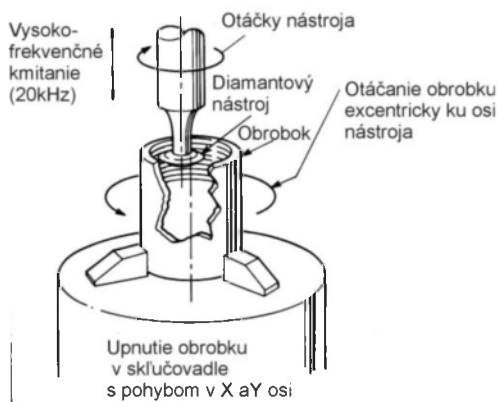
Princíp ultrazvuku sa široko využíva pri nedeštruktívnych metódach merania ako kontrola akosti zváraných spojov, kontrola celistvosti a hrúbok materiálov, meranie rozmerov a iné. Široké využitie má ultrazvuk aj v oblasti humánnej medicíny.

3.1.5.1 Rotačné ultrazvukové obrábanie

Rotačné ultrazvukové obrábanie (medzinárodne zaužívané označenie *Rotary Ultrasonic Machining* RUM) je samostatnou časťou ultrazvukového opracovania a je kombináciou procesov ultrazvukového obrábania a brúsenia diamantovým nástrojom [13]. Proces bol vyvinutý prednostne pre opracovanie krehkých a veľmi tvrdých materiálov ako sklo a keramika.

Mechanizmus úberu materiálu je založený na princípe krehkého vylamovania čiastočiek materiálu vplyvom vysokofrekvenčného kmitania diamantového nástroja. Princíp opracovania je znázornený na obr.3.21 pre rezanie vnútorného závitú [1].

Technológia je podobná konvenčnému vŕtaniu skla nástrojmi z diamantu, ale nástroj okrem rotačného pohybu má aj vlastnú frekvenciu, ktorou kmitá. Pri opracovaní sa neprivádza abrazívna suspenzia, ale do oblasti rezu sa privádza chladiaca kvapalina obyčajne voda, ktorá odplavuje častice materiálu triesky. Amplitúda kmitov je okolo $0.025 \div 0.05\text{mm}$.



Obr.3.21 Rotačné ultrazvukové obrábanie - príklad rezania vnútorného závitu
(podľa: *Metal Handbook Machining*)

Základné rozdiely medzi „klasickou“ technológiou ultrazvukového opracovania a technológiou rotačného ultrazvukového obrábania sú:

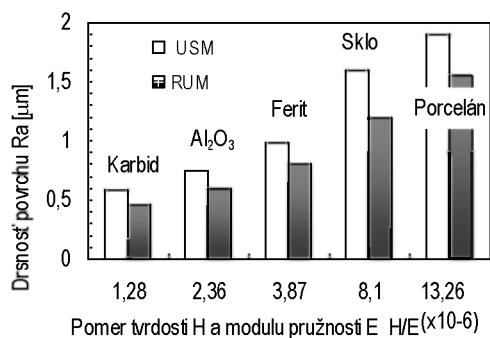
- pohyb diamantového nástroja pri rotačnom USM je axiálny, vysokofrekvenčný a zároveň axiálny rotačný, obr.3.21; pri klasickom USM nástroj koná len vibračný pohyb;
- rotačné ultrazvukové obrábanie používa diamantové nástroje v tvare klasických brúsnych kotúčov;
- na úber materiálu sa používajú abrazívne častice diamantového nástroja;
- USM proces používa nástroj na prenos kmitania, prítlak a usmernenie toku suspenzie a nie je v priamom kontakte s obrobkom, kým pri rotačnom ultrazvukovom obrábaní nástroj je v priamom kontakte s obrobkom.

Porovnanie charakteristických parametrov obidvoch procesov ako je intenzita objemového úberu –VRR (*volumetric removal rate*), dosahovaná drsnosť povrchu a nominálna odchýlka rozmerov určená kruhovitosťou pre rôzne druhy materiálov, ilustruje obr.3.22a,b,c, ktorý zároveň dáva predstavu o vhodnosti jednej alebo druhej technológie.

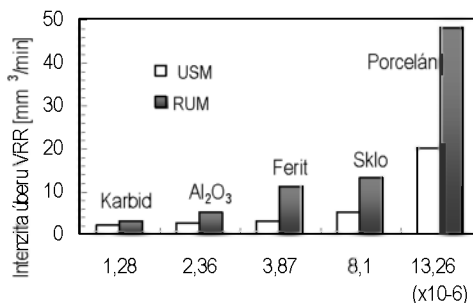
Ako ukazujú výsledky porovnávacieho hodnotenia oboch procesov, rotačné ultrazvukové obrábanie dáva lepšie výsledky z hľadiska kvality opracovaného povrchu hodnoteného drsnosťou a odchýlkou kruhovitosti a zároveň umožňuje väčší úber materiálu pre sledované druhy materiálov obrobkov.

Určujúcim ukazovateľom hospodárnosti procesu RUM je výkon opracovania vyjadrený cez intenzitu objemového úberu materiálu VRR (mm^3/s), a ako to uvádza *Pei et al.* [13], intenzita úberu materiálu závisí prednostne od amplitúdy kmitania, statického prítlaku nástroja, priemeru diamantových zŕn a koncentrácie diamantových zŕn, ktorá sa udáva ako počet diamantových zŕn na jednotku plochy kotúča. Priebeh jednotlivých závislostí sú znázornené na obr.3.23.

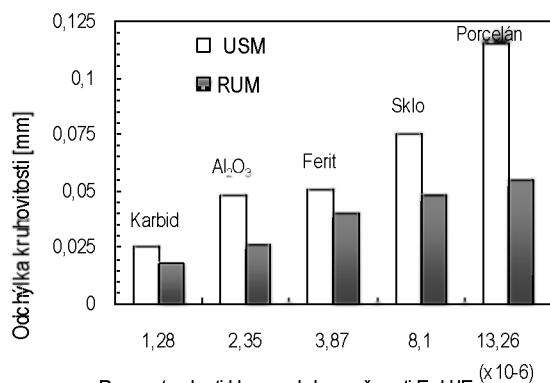
Použitie technológie rotačného ultrazvukového obrábania RUM je limitované veľkosťou prierezu a hmotnosti nástroja. Nástroj s nástavcom musia mať rezonančnú frekvenciu 20kHz. Veľká hmotnosť nástroja môže tlmiť amplitúdu kmitov. Doporučený maximálny priemer nástroja je 38 mm, limitujúca hmotnosť je okolo 40 g [11].



a)



b)



c)

Obr.3.22 Porovnanie účinku pomeru tvrdosti a modulu pružnosti materiálu obrabku na:

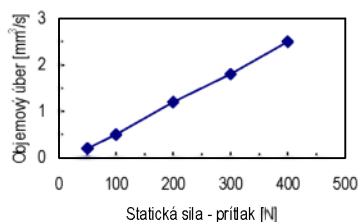
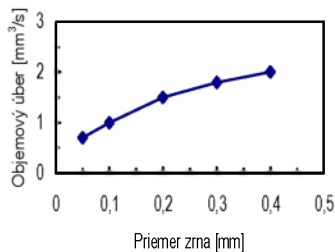
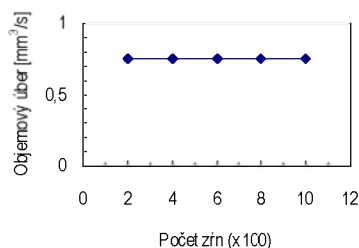
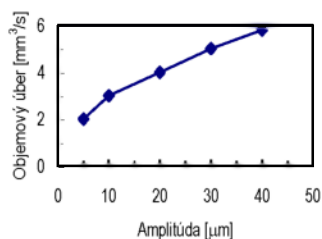
a) drsnosť povrchu

b) odchýlku kruhovitosti

c) úber materiálu –VRR

pre konvenčné USM a rotačné ultrazvukové obrábanie RUM

(spracované podľa Thoe, Aspinwall, Wise[14])



Konštantné podmienky procesu:

otáčky nástroja 1000 ot/min;

prítlak nástroja 600N;

amplitúda kmitov 0,025mm;

priemer zrna 0,05mm;

Obr. 3.23 Závislosť výkonu procesu rotačného ultrazvukového opracovania od parametrov procesu: amplitúdy kmitov, statického prítlaku nástroja, priemeru zrna brusiva a počtu zŕn. (spracované podľa Pei et al. [13])

Rotačné ultrazvukové obrábanie sa efektívne využíva najmä v tých priemyselných oblastiach, kde sa používajú krehké a vysokotvrde materiály ako keramika, sklo, karbidy kovov, ďalej pri výrobe rozmerovo malých predmetov s požiadavkou na vysokú presnosť rozmerov a akosť obrobeného povrchu: [11, 13, 15]:

- pre opracovanie keramických materiálov a feritov,
- pre materiály na jadrové reaktory,
- opracovanie plazmovo striekaných povlakov,
- opracovanie Al_2O_3 substrátov pre mikroelektronické obvody,
- vŕtanie hlbokých otvorov malých priemerov do veľmi tvrdých materiálov,
- vŕtanie kompozitných materiálov pre letecký priemysel,
- na výrobu prototypov s požiadavkou na vysokú presnosť výroby.

Literatúra ku kapitole 3.1:

1. ASM – Metals Handbook - Machining, Vol. 6, ASM International, March, (1997), 9.ed.
2. Bellows, G.; Kohls, J. B.: Drilling without Drills. Special Report 743, *American Machinist*, March, (1982), p.187
3. Buda, J.; Békés, J.: Teoretické základy obrábania kovov, SVTL, Bratislava, (1967) 1.vyd.
4. Dam, H.; Quist, P.; Schreiber, M. P.: Productivity, Surface Quality and Tolerances in Ultrasonic Machining of Ceramics. *J. of Mat.Proc.Technol.* 51, (1995), p.358-368
5. Hocheng, H.; Hsu, C.C.: Preliminary Study of Ultrasonic Drilling of Fiber Reinforced Plastics. *J. of Mat.Proc.Technol.* 48, (1995), p.255-266
6. Kaczmarek, J.: Principles of Machining by Cutting, Abrasion and Erosion. Wydawnictwo naukowo-techniczne, Warsaw, (1976), 1.ed. pp.448-462
7. Kremer, D.; Saleh, S. M.; Ghabrial, S. R.; Moisan, A.: The State of the Art of Ultrasonic Machining, *Annals of the CIRP*, Vol.30/1 (1981), p.107-110
8. McGeough, J. A.: Advanced Methods of Machining, Chapman and Hall, London, (1988) 1.ed.
9. Snoeys, R.; Staelens, F.; Dekkyser, W.: Current Trends in Non-Conventional Material Removal Processes, *Annals of the CIRP* Vol.35/2, (1986), p. 468
10. Turňa, M.: Špeciálne metódy zvarovania. Alfa Bratislava, (1989), 1.vyd.
11. Tool and Manufacturing Engineers Handbook, Vol.1 Machining, SME, Dearborne, 1983
12. Kainth, G. S.; Nandy, A.; Singh, K.: On the Mechanism of Material Removal in USM. *Int. J. Mech. Too Des. And Res.*, 19, (1979) pp. 33-41
13. Pei, Z. J.; Prabhakar, D.; Ferreira, P.M.; Haselkorn, M.: A Mechanistic Approach to the Prediction of Material Removal Rates in Rotary Ultrasonic Machining. *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol 117, May (1995) pp. 142 –151
14. Thoe, T. B.; Aspinwall, D. K.; Wise, M.L.H.: Review on Ultrasonic Machining. *Int. J. Tools Manufact.* Vol 38, No 4, pp 239-255.
15. Švehla, Š.; Figura, Z.: Ultrazvuk v technológii. Alfa Bratislava, 1984. 1.vyd.

3.2 Technológie abrazívneho lúča pre úber materiálu

Opracovanie povrchov voľným abrazivom (známe pod anglickým názvom *Abrasive Jet Machining* **AJM** a *Abrasive Flow Machining* **AFM**) patrí k dokončovacím metódam vo výrobnom procese. Ako je známe, dokončovacie procesy predstavujú kritickú a nákladnú fázu vo výrobe. Náklady na dokončovacie operácie činia asi 15% celkových nákladov na obrábanie. Z toho dôvodu sa hľadajú technológie, ktoré spĺňajú vysoké nároky na kvalitu opracovaného povrchu, zároveň sú ekonomicky menej náročné a dajú sa jednoducho automatizovať.

V ostatnom čase sa do popredia pozornosti dostávajú progresívne technológie a medzi nimi dve modifikácie opracovania voľným brusivom, známe ako:

- Opracovanie abrazívnym lúčom – *AJM Abrasive Jet Machining** – opracovanie lúčom abraziva obsiahnutom v prúde vysokorýchlostného stlačeného plynu;
- Opracovanie prúdom abraziva – *AFM Abrasive Flow Machining* – opracovanie prúdením abraziva, proces predstavuje tvarovanie povrchu a hrán pretláčaním polotuhého abrazívneho média cez zúžený priechod tvorený kombináciou prípravok/obrobok.

V odbornej literatúre je pomerne málo poznatkov o uvedených procesoch a sústreďujú sa na kvalitatívny popis metód s dôrazom na aplikačné možnosti. Veľmi málo prameňov podáva kvantifikované poznatky o mechanizme úberu materiálu a kvalite opracovaného povrchu.

Pretože tieto procesy sú charakterizované ako procesy odstraňovania materiálu pomocou voľného brusiva, platia aj pre ne základné zákonitosti abrazívneho deja ako je mikrorezanie, mikrorytie a mikrozahladzovanie.

3.2.1 AJM – princíp úberu a zariadenie

AJM je opracovanie povrchu mechanickým nárazom častice – *impact machining process*, kde k úberu materiálu dochádza po dopade vysokorýchlostného prúdu abrazívnych častíc. **Kaczmarek** [9] uvádza podobný proces pod názvom *abrasive blast treatment*, (ALA), ako proces odvodený od konvenčného tryskania (*sand blasting*). Podobne **Venkatesh** [6] charakterizuje AJM proces ako proces odvodený od konvenčného tryskania, od ktorého sa odlišuje v troch základných bodoch:

- i) tryskanie sa používa na čistenie povrchu súčiastok, kým AJM sa používa na úber materiálu;
- ii) zrná abraziva používané pre tryskanie sú väčšie, pre AJM sa používajú prášky s veľkosťou častíc medzi 10 ÷ 50 µm;
- iii) AJM umožňuje uzavreté riadenie vysokorýchlostného prúdu častíc.

Princíp úberu materiálu je podobný ako pri ultrazvukovom opracovaní (USM) t.j. brúsnym účinkom dopadajúcej častice brusiva s vysokou kinetickou energiou. Aj napriek podobnému mechanizmu úberu však oba procesy AJM aj USM majú viac odlišností ako podobností.

* Keďže tieto procesy nie sú bežne používané, nie je v slovenskom jazyku pre ne jednoznačne určený jednoduchý názov. Popisný názov z anglického prekladu je pomerne dlhý, preto budú ďalej v texte pre tieto technológie používané medzinárodne zaužívané skratky.

Ako uvádza *Venkatesh*, USM proces je rýchlejší s vyššou rýchlosťou úberu materiálu, v zóne rezu sa tvorí teplo a je zároveň ekonomicky náročnejší. Pri USM procese sa miera opotrebenia nástroja považuje za hlavný ukazovateľ hospodárnosti.

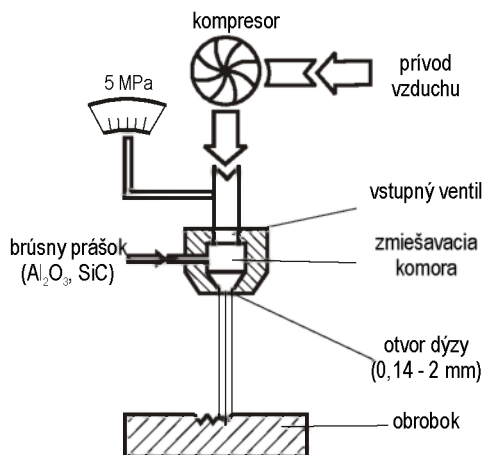
AJM proces je proces pomalého úberu materiálu, generuje menej tepla, keďže sa používa stlačený vzduch ako nosné médium pre brusný prášok a je to proces lacnejší. Ukazovateľom hospodárnosti procesu je intenzita úberu materiálu.

Materiál je pri AJM metóde odstraňovaný mechanickým pôsobením zmesi stlačeného vzduchu alebo iného priemyselného plynu s veľmi jemnými brúsnyimi časticami vo forme brúsnych práškov uvádzaným pod názvom *abrasive*, slovenský ekvivalent abrazív. Najčastejšie používané prášky sú na báze taveného oxidu hlinitého Al_2O_3 a karbidu kremíka SiC .

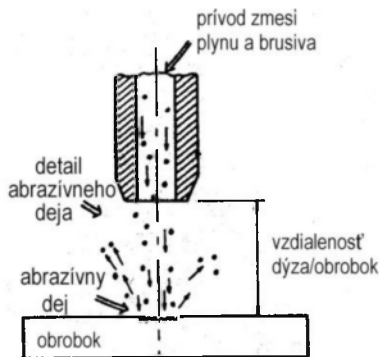
Základný princíp AJM zariadenia je znázornený na obr.3.24. Detail abrazívneho deja pre abrazívne obrábanie ukazuje obr.3.25. Jednotlivé komponenty priemyselného zariadenia sú znázornené na obr.3.26. Zariadenie využíva zdroj priemyselného plynu stlačeného na tlak okolo 800 kPa. Pred prívodom do zmiešavača je plyn filtrovaný za účelom odstránenia nežiadúcich prímiesok ako voda a olej, z toho dôvodu neoddeliteľnou súčasťou zariadenia sú rôzne filtre a separátory.

Abrazív – brúsny prášok je uskladňovaný v zásobníku a odtiaľ posúvaný do vibračného zmiešavača, kde sa rovnomerne mieša so stlačeným vzduchom alebo iným plynom. Odtiaľ je potom prúd zmesi vedený k dýze. Rýchlosť vytekajúceho lúča je medzi $150 \div 300$ m/s.

Dôležitou súčasťou zariadenia je odsávač prachu a ochranný priklop, ktorý chráni pracovníka a pracovné prostredie pred zvýšenou prašnosťou, ktorú proces produkuje.



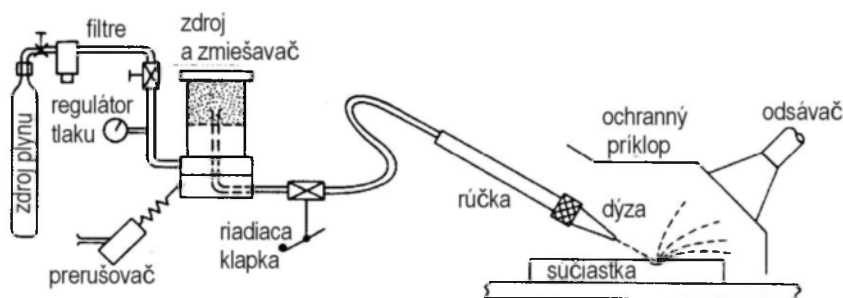
Obr.3.24 Princíp opracovania abrazívnym lúčom (spracované podľa [3-5])



Obr.3.25 Detail procesu abrazívneho lúča (zdroj *Venkatesh* [6])

Dýza pre AJM proces, z ktorej prúdi abrazívna zmes sa skladá z troch častí – vstupnej, zmiešavacej a výstupnej, – kde každá časť má vymedzenú funkciu a napomáha tvorbe vysokorýchlostného a vysokotlakového abrazívneho lúča. Vnútny prierez a tvar jednotlivých komponentov používanej dýzy znázorňuje obr.3.27, podľa navrhnutej konštrukcie pre priemyselné zariadenie vyrobené ako prototyp na Univerzite v Singapore [6].

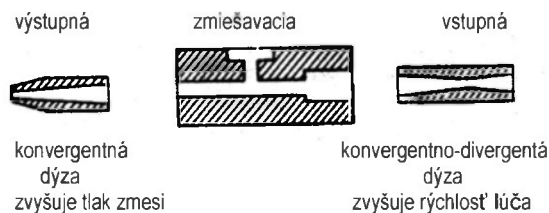
Dýzy pre AJM sa vyrábajú z karbidu wolfrámu (WC) alebo syntetického zafíru. Zafírová dýza má dlhšiu životnosť a je drahšia. Vyrába sa s priemerom od 0,13 až po 2,25 mm [1, 8]. V prípade požiadaviek na vyššiu intenzitu úberu sa používajú dýzy s priemerom okolo 3,5 mm [6].



Obr.3.26 Princíp priemyselného zariadenia pre ručné opracovanie abrazívnym lúčom (spracované podľa [3÷5])

Výhodou dýzy na báze karbidu wolfrámu je, že okrem kruhového otvoru môže mať aj obdĺžnikový otvor s rozmermi od $0,08 \div 0,5$ mm do $0,18 \div 3,8$ mm, a tiež, že do značnej miery redukuje rozptyl lúča pri rezaní. Prevádzková doba pre dýzu na báze karbidov sa udáva na $8 \div 15$ hodín pri použití brúsneho prášku z karbidu kremíka (SiC), a okolo $20 \div 35$ hodín pre brúsny prášok z oxidu hlinitého (Al_2O_3). Priemerná prevádzková doba zafírovej dýzy je okolo 300 hodín [1, 8]. Životnosť dýz závisí vo veľkej miere na druhu abraziva a pracovnom tlaku zmesi.

AJM proces sa charakterizuje ako proces pomalý, ale lacný v porovnaní napr. s procesom USM alebo abrazívnym vodným lúčom AWJ. Množstvo odoberaného materiálu za jednotku času je okolo 10 g/min.



Obr.3.27 Zobrazenie tvarov výstupnej dýzy, zmiešavacej komory a vstupnej dýzy, ktoré spolu tvoria dýzu pre AJM proces (zdroj Venkatesh [6])

3.2.1.1 Charakteristika abrazívneho lúča – AJM

Technologické a prevádzkové charakteristiky abrazívneho lúča sú kvantitatívne určené nasledujúcimi doporučenými rozsahmi parametrov [1, 3 – 5, 7]. Každý výrobca zariadenia bližšie špecifikuje používané rozsahy.

- brusivo – abrazív: Al_2O_3 , SiC sa používajú pre čistenie, rezanie a odíhľovanie, uhličitan horečnatý Mg_2CO_3 sa doporučuje pre ľahké čistenie a leptanie a pieskovanie, hydrouhličitan sodný NaCO_3 pre tvarové rezanie mäkkých materiálov, drvené sklo a sklenené guľičky pre leštenie;
- priemer zrna práškov sa pohybuje od 10 do 60 μm ;

- výstupný tlak zmesi vzduchu a abraziva: od 5 do 8 MPa; tlaky nižšie ako 4,5 MPa sa z hľadiska efektívneho úberu materiálu neodporúčajú;
- použitý plyn: stlačený vzduch, dusík (N_2), oxid uhličitý (CO_2), alebo iný priemyselný plyn s vysokou čistotou bez cudzích prímiesok ako sú olej a voda;
- rýchlosť pohybu lúča: $150 \div 300$ m/s
- vzdialenosť medzi ústím dýzy a obrobkom: $0,8 \div 75$ mm, podľa tvaru otvoru v dýze a požiadavky na koherentný nerozptýlený lúč;
- intenzita úberu materiálu sa udáva v priemere okolo 10 mg/min, a je závislá na mernej hmotnosti materiálu, pre sklo sa udáva $16 \text{ mm}^3/\text{min}$; pre kovy od $1,6$ do $4,1 \text{ mm}^3/\text{min}$;
- tok abraziva: $10 \div 20$ g/min, pre jemné dokončovanie povrchov $3 \div 5$ g/min;
- rýchlosť posuvu lúča: $0,03 \div 0,20$ mm/s.

3.2.1.2 Vplyv parametrov AJM procesu na úber materiálu

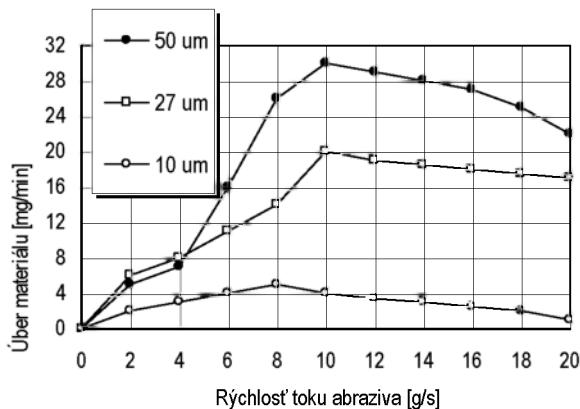
Intenzita úberu materiálu a kvalita opracovaného povrchu je ovplyvnená:

- druhom obrábaného materiálu,
- rýchlosťou prúdenia abraziva,
- druhom a veľkosťou abrazívnych častíc,
- vzdialenosťou medzi obrobkom a dýzou.

Pre úber materiálu, ako už bolo spomenuté v úvode, platia základné zákonitosti procesu abrazívneho opracovania voľným brusivom:

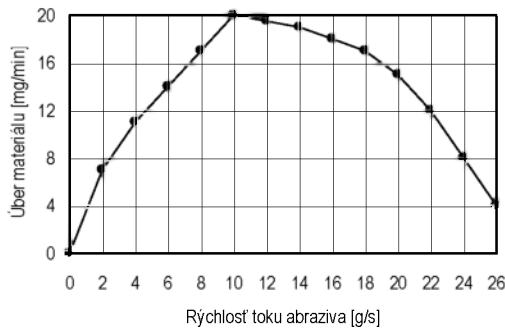
- úber materiálu sa zvyšuje so zvyšovaním jeho tvrdosti,
- úber materiálu sa zvyšuje so zväčšovaním zrna brúsneho prášku,
- úber materiálu sa zvyšuje väčšou výtokovou rýchlosťou lúča.

Kvantifikácia týchto poznatkov je zhrnutá graficky na obr.3.28, pre účinok veľkosti častíc na úber materiálu, a na obr.3.29, pre účinok rýchlosti prúdenia abraziva.



Obr. 3.28 Účinok veľkosti častíc abraziva na úber materiálu pri opracovaní tabuľového skla (zdroj [1])

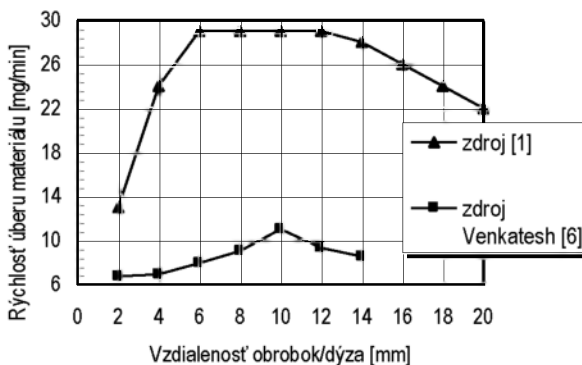
Veľkosť brúsnych zŕn používaných v procese AJM, sa volí podľa aplikácie. Pre rezanie sa doporučujú väčšie zŕna, pre čistenie a leštenie povrchov menšia veľkosť zrna práškov [1, 8]. Literatúra neudáva kvantifikované údaje. Komerčne dostupné stupne označovania veľkosti zrna brúsnych práškov nie sú vhodné pre AJM, pretože ich veľkosť nie je dosť dobre klasifikovaná [1], okrem toho obchodné prášky môžu obsahovať kremíkový prach, ktorý je zdraviu škodlivý. Prášky by sa nemali recyklovať a znovu používať, pretože kontaminované prášky so zvyškami opracovaného materiálu zanášajú dýzy. Pre likvidáciu použitých práškov platia príslušné bezpečnostné predpisy.



Obr. 3.29 Účinnosť rýchlosti toku abrazívneho prášku na úber materiálu pri opracovaní tabuľového skla (zdroj [1])

Vzdialenosť medzi obrobkom a výstupom lúča z dýzy ovplyvňuje intenzitu úberu materiálu pri AJM procese, ako to ilustruje obr. 3.30. Optimálna hodnota intenzity úberu materiálu závisí na vzdialenosti obrobok/dýza, na veľkosti zrna brúsneho prášku, ako aj rýchlosti toku lúča [1, 6].

Prúd abrazívnej zmesi má obvyčajne cylindrický tvar, ktorý sa zachováva iba do krátkej vzdialenosti asi 1,6 mm po opustení dýzy. Podľa údajov [1], vo väčšej vzdialenosti sa lúč diverguje do kužeľovitého tvaru a šírka jeho rozptýlenia je závislá na tlaku systému. Vzdialenosť medzi obrobkom a dýzou sa mení so spôsobom aplikácie lúča. Pre čistenie a mechanické spevňovanie povrchu sa doporučuje vzdialenosť 5 ÷ 13 mm, kým vzdialenosť od 13 do 75 mm sa aplikuje pre operácie s menším vplyvom na povrch. Požiadavka vysokej presnosti opracovania a eliminácie tvorenia úkosov sa dosahuje veľmi malou vzdialenosťou dýzy od povrchu asi 0,8 mm.



Obr.3.30 Účinnosť vzdialenosti obrobok/dýza na mieru úberu materiálu (spracované podľa [1,6])

a) (zdroj [1]) pri opracovaní tabuľového skla (iné parametre neudané)

b) (zdroj [6]) veľkosť zrna 40 μ m, priemer otvoru dýzy 3,5mm, obrobok tvrdé sklo

3.2.1.3 Charakteristika povrchu po AJM procese

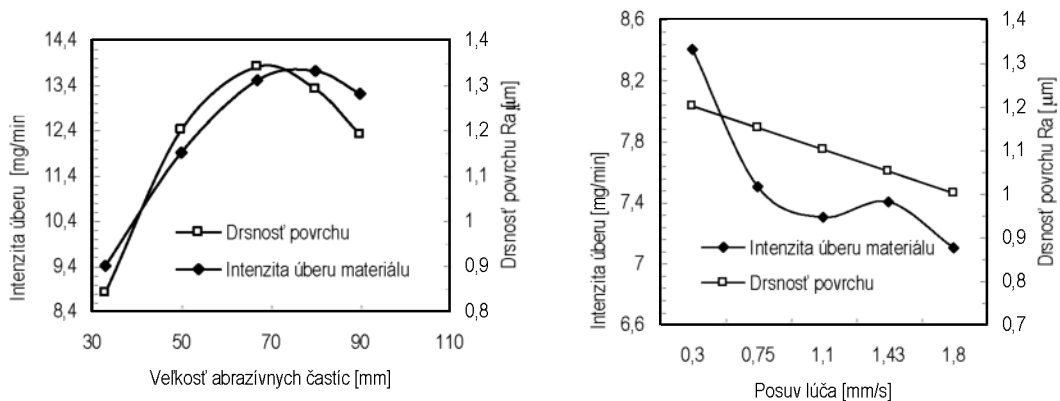
AJM proces tvorí povrch s granulovanou matnou štruktúrou. Dosahovaná stredná drsnosť povrchu je v rozsahu $Ra\ 0,15 \div 1,5\ \mu\text{m}$ a je ovplyvnená veľkosťou zrna a druhom použitého prášku, pozri tab. 3.5. Dosahované tolerance rozmerov sú udávané v rozsahu $0,13 \div 0,05\ \text{mm}$.

Pri procese nedochádza k výraznej deformácii obrobku, keďže sily pôsobiace na obrobok sú malé. Tepelné pôsobenie procesu je minimálne, povrch nie ovplyvnený teplotou.

Tab. 3.5 Dosahovaná drsnosť povrchu pre rozdielnu veľkosť zrna abraziva pri opracovaní nehrdzavejúcej ocele AISI 316 (DIN X5CrNiMo18 10) (spracované podľa [1])

Druh abraziva	Veľkosť zrna [μm]	Drsnosť povrchu $Ra\ [\mu\text{m}]$
Oxid hliníka Al_2O_3	10	0,20–0,50
	25	0,25–0,53
	50	0,38–0,96
Karbid kremíka SiC	20	0,30–0,50
	50	0,43–0,86
Sklenené guľičky	50	0,30–0,96

Zároveň na kvalitu opracovaného povrchu vyjadrenú cez parameter drsnosti povrchu Ra , vplyvajú tie isté charakteristiky procesu AJM ako na intenzitu úberu materiálu (viď kap. 3.2.1.2.) Porovnávacie hodnotenie grafických priebehov závislosti úberu materiálu, dosahovanej drsnosti povrchu na zmene veľkosti brúsnej častice a rýchlosti posuvu lúča znázorňuje obr. 3.3 1a,b, podľa výsledkov ktoré publikoval *Venkatesh* [6].



Obr.3.31 Účinok veľkosti použitého brúsneho zrna a posuvu lúča na mieru úberu materiálu. a drsnosť povrchu (spracované podľa [6])

Parametre procesu: konštantná veľkosť zrna $85\ \mu\text{m}$ (zrornosť 180), priemer otvoru dýzy $3,5\ \text{mm}$, uhol dopadu lúča 90° ; vzdialenosť dýza/obrobok $5\ \text{mm}$; obrobok: tvrdené sklo

3.2.1.4 Oblasť použitia procesu AJM

AJM lúč sa uplatňuje pri opracovaní ťažkoobrábateľných a krehkých materiálov ako je sklo a keramika. Doporučuje sa pre jemné dokončovanie povrchov, pre vyrezávanie a vŕtanie plytkých tvarov a otvorov na pomerne malých plochách.

Hlavné oblasti aplikácie predstavujú technológie rezania, čistenia, odihľovania, spevňovania povrchu alebo pieskovania keramiky, skla, spekaného karbidu, tvrdených liatin a plastov.

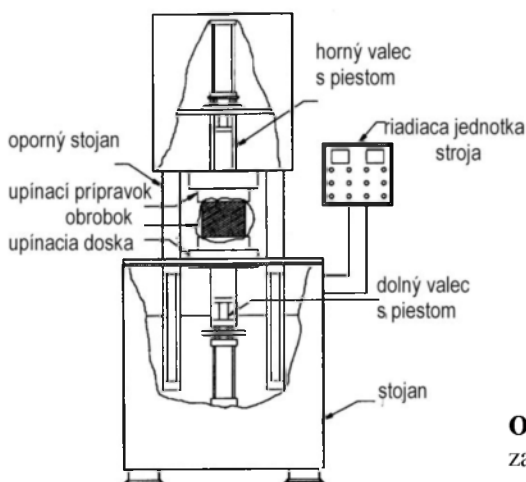
Konkrétne rozšírenie našla AJM technológia predovšetkým pre:

- opracovanie otvorov v elektrotechnickom priemysle;
- gravírovanie registračných čísel motorov v automobilovom priemysle;
- odihľovanie chirurgických ihlíc, plastických komponentov, hydraulických piestov;
- vŕtanie a rezanie malých otvorov a tvarov v skle, keramike a tvrdených liatinách;
- pieskovanie čísel (označenia) do kovov, plastických komponentov a tvrdených skiel automobilov;
- odihľovanie a odstraňovanie ostrapov na kovových a plastových komponentoch;
- matovanie skla.

3.2.2 AFM – charakteristika princípu úberu a zariadenie

Opracovanie prúdom abraziva AFM predstavuje pokrokový proces dokončovania povrchov pomocou polotuhého viskózneho abrazívneho média, ktoré je pretláčané cez priechod medzi obrobkom a prípravkom. Vytvára vysokú úroveň dokončeného povrchu a úzke tolerancie geometrického tvaru. Odstraňuje malé množstvo materiálu prúdom polotuhého abrazívneho média. Abrázia (brúsny účinok) sa vyskytuje len v mieste, kde je obmedzené prúdenie média. Postup opracovania je podobný ako pri brúsení a lapovaní, kde brusivo mierne leští povrch alebo hrany.

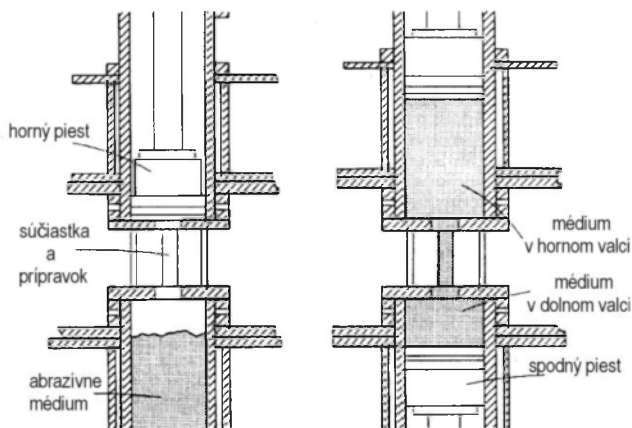
Hlavnými prvkami zariadenia sú stroj na pretláčanie média, prípravok a brúsne médium. Obr.3.32 znázorňuje základnú zostavu AFM procesu.



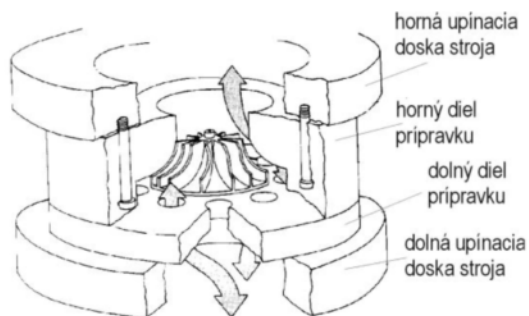
Obr.3.32 Schematické znázornenie zariadenia pre AFM proces. (zdroj [7])

Detail pracovnej zóny ilustruje obr.3.33. Stroje pre AFM zabezpečujú tlaky v rozsahu používanom pre pretláčacie stroje od 700 do 22 000 kPa, zároveň zabezpečujú prietok abrazívneho média až do 380 l/min [1]. Prietok média závisí od tlaku, viskozity média a konfigurácie prípravok/obrobok.

Obr.3.33 Detail pracovného procesu – brúsne médium v dolnom valci pred pracovným cyklom a následné rozloženie média po pretlačení cez priechod medzi prípravkom a súčiastkou. (zdroj [1])



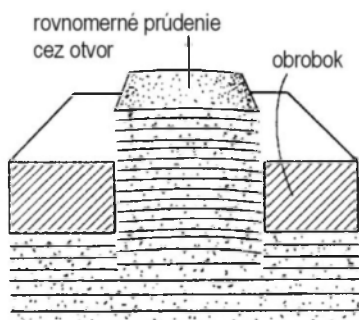
Prípravok slúži na upínanie súčiastky, na usmernenie toku média a pomáha pri vytváraní vhodného priechodu média. Proces si vyžaduje len jednoduché prípravky. Obr.3.34 ukazuje príklad konštrukcie prípravku. Prípravok zároveň zamedzuje prúdeniu média v oblasti, ktorú nie je potrebné upraviť. Tok brúsneho média cez priechod v uzavretom opornom stojane zabezpečujú piesty v dolnom a hornom valci zariadenia. Pracovný cyklus je daný počtom dvojzdvihov piestov. Počet cyklov ovplyvňuje mieru úberu materiálu. Medzi počtom cyklov a veľkosťou zaoblenia hrany je lineárna závislosť, predovšetkým v oblasti prvých 8 cyklov, ako uvádza **Williams a Rajurkar** [7].



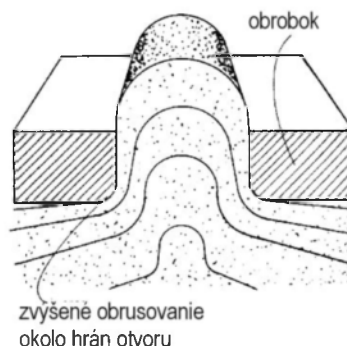
Obr.3.34 Príklad konštrukcie prípravku pre dokončovanie povrchu lopatiek. Prípravok slúži na obmedzenie prúdenia medzi vonkajšou časťou obrobku a vnútornou časťou prípravku. (zdroj [1])

Abrazívne médium je zložené z polotuhého polymérového prostriedku, ktoré je nosičom abrazívnych zŕn. Nosič je zmes polymérov na báze kaučuku a kvapalného maziva. Zmenou vzájomnej koncentrácie brusiva a nosného média sa mení jeho viskozita. Zmena viskozity brúsneho média sa docieľuje aj zmenou teploty. So zvyšovaním teploty viskozita klesá, čo umožňuje rovnaký druh média použiť pre rôzne prierezy priechodov medzi obrobkom a prípravkom.

Viskozita* média a rýchlosť jeho prúdenia majú podobný účinok na intenzitu úberu materiálu a na veľkosť zaoblenia hrán. Pre rovnomernú intenzitu úberu materiálu sa doporučuje nízka rýchlosť prúdenia, pre zaobľovanie hrán vyššia rýchlosť. Vyššia rýchlosť prúdenia pri nižšej viskozite média cez priechod spôsobuje, že hrany sa obrusujú rýchlejšie ako steny priechodu. Obr. 3.35 a 3.36 znázorňujú vplyv viskozity média na jeho tok cez priechod.



Obr.3.35 Priebeh prúdových čiar pri prúdení vysoko viskózneho média cez priechod. (zdroj [1,7])



Obr.3.36 Prúdenie nízko-viskózneho média. Médium prúdi rýchlejšie cez priechod než okolo hrán. Pri spätnom prietoku (jeden uzavretý cyklus) sa obrusuje aj druhá hrana. (zdroj [1,7])

Tab.3.6 ukazuje niektoré pravidlá pre výber vhodnej viskozity abrazívneho média v závislosti od rozmerov priechodu a vzájomného pomeru dĺžky/šírky priechodu.

Tab.3.6 Doporučená viskozita média pre priechod s pomerom dĺžky ku šírke 2:1 (podľa [8])

Rozmer priechodu [mm]	Kvalitatívna charakteristika viskozity média				
	nízka	nízka až stredná	stredná	stredná až vysoká	vysoká
minimálny	0,4	0,8	1,6	3,2	6,4
maximálny	3,2	6,4	13	25	50

Podľa zaužívaných pravidiel a odporúčaní sa používa médium s vyššou viskozitou pre leštenie alebo obrusovanie stien veľkých priechodov, pre zaobľovanie hrán a pre malé priechody sa doporučuje nižšia viskozita. Hodnoty viskozity abrazívneho média pre každé zariadenie a technológiu špecifikuje výrobca, v dostupnej literatúre nie je kvantifikovaná. Pri hodnotení vplyvu

*Viskozita (z lat. väzkosť, vnútorné trenie resp. odpor) je reologická vlastnosť látok, kde pre kvapaliny platí, že za pôsobenia napätia deformácia s časom lineárne rastie, pre elastické pevné látky zase deformácia závisí len na veľkosti napätia. Prevrátená hodnota viskozity je tekutosť. Dynamická viskozita má jednotku Pa.s (pascalsekunda). Kinematická viskozita je podiel dynamickej viskozity a hustoty kvapalnej látky (m^2/s), v prípade brúsneho média pre AFM sa jedná o viskoelastickú látku na báze polymérov, v ktorej sa pomer deformácie k napätiu časom mení, vlastností takej látky sa popisujú kombináciou vlastností viskózne kvapaliny a elastickej tuhej látky (pozn. autora).

viskozity média na úber materiálu a akosť opracovaného povrchu sa udávajú kvalitatívne ukazovatele.

Ako brusivo sa používajú zrná karbidu kremíka SiC, karbidu bóru B₄C, oxidu hliníka Al₂O₃ a diamantu s rozmermi zrna od 0,005 ÷ 1,5 mm. Pre veľkosť zrna platí, čím väčšie zrno, tým je úber materiálu vyšší, pre jemné dokončovanie povrchu sa doporučuje veľmi jemná zrnitosť. Zrnitosť brusiva ovplyvňuje kvalitu opracovaného povrchu.

Brúsny účinok média na materiál závisí od:

- veľkosti zrna
- koncentrácie brúsneho prášku v polotuhom médiu
- pretláčacieho tlaku
- tvrdosti obrábaného materiálu.

Dosahované parametre akosti opracovaného povrchu a presnosti rozmerového opracovania sú udávané podľa [2, 7, 8] v nasledujúcich rozsahoch:

- drsnosť povrchu R_a okolo 0,05 μm ,
- tolerancie rozmerov $\pm 5 \mu\text{m}$,
- najmenší opracovaný rozmer otvor s priemerom 0,2 mm,
- rozmery zaoblenia hrán od 0,025 mm do 1,5 mm.

Počet pracovných cyklov piesta, pretláčací tlak, zrnitosť a koncentrácia brusiva a konštrukcia prípravku sú hlavné parametre procesu, ktoré vplyvajú na úber materiálu a kvalitu opracovaného povrchu pri AFM.

3.2.2.1 Mechanizmus úberu materiálu

Veľmi málo literárnych prameňov pojednáva a podáva teoretickú analýzu mechanizmu úberu materiálu pri AFM procese. Vzťah medzi parametrami procesu a prevádzkovými charakteristikami nie je doposiaľ úplne známy. Presný mechanizmus, ktorým jednotlivé častice sprevádzajú proces úberu je len čiastočne pochopený, vyžaduje si systematickú analýzu a pozorovanie procesu prúdenia viskózneho média. Na modelovanie prúdenia sa v ostatnom čase veľmi úspešne používa metóda konečných prvkov [2].

Mechanizmus úberu častíc z povrchu pevného materiálu je pri AFM definovaný ako jednosmerný posuvný dej diskretných častíc po povrchu iného materiálu. Mechanizmus brúsneho účinku uvádzaný tiež ako mechanizmus abrázie (obrusovania) je popisovaný ako proces abrazívneho opotrebenia pri kontakte brúsnych zrn s povrchom obrobku.

Jain, Jain a Dixit [2] popisujú interakciu medzi brúsnym médiom a pevným povrchom dielca ako proces postupného mikrorytia (*microploughing*) a mikrorezania (*microcutting*).

Mikrorytie vzniká následkom jednoduchého prechodu jednej brúsnej častice, pričom nedochádza k oddeľovaniu materiálu. Materiál je časticou vyrývaný a posúvaný do strán. Po opakovanom prechode jednej častice, alebo viacerých častíc naraz, sa materiál vo forme malej častice oddeľuje v dôsledku nízkokycklického únavového lomu (*microfatigue*). K úbytku materiálu vo väčšom objeme dochádza postupne, na základe tzv. rycieho efektu (*ploughing effect*) pôsobenia viacerých častíc naraz, alebo opakovaného pôsobenia jednej častice po rovnakej dráhe.

Čisté mikrorezanie odstraňuje materiál vo forme triesky malého rozmeru – mikrotriesky. Mikrorytie a mikrorezanie sú dominantné mechanizmy úberu pre húževnaté materiály a samotné mikrorezanie je podľa [2] významné pre krehké materiály.

Pri AFM procese sa podľa [2] úber modeluje podobne ako pri brúsení a lapovaní, ako vryp (*scratch*), ktorý vytvorí brúsna častica za predpokladu, že má guľovitý tvar, tvorí iba jednu reznú hranu s negatívnym uhlom čela a sila pôsobiaca na každú časticu je konštantná a rovná priemernej zaťažujúcej sile v procese. Okrem toho, každá častica preniká do rovnakej hĺbky v materiále a všetky častice majú rovnakú veľkosť.

Takýto idealizovaný klasický model abrazívneho opotrebenia je teoretickým základom pre kvantifikáciu úberu materiálu pri AFM. Intenzitu objemového úberu materiálu, je potom možné určiť podľa takých hodnôt, ako je počet aktívnych zrn, ich tvar a hĺbka vytvoreného vrypu.

Na základe uvedených úvah **Jain, Jain a Dixit** [2] odvodili rovnice pre výpočet normálovej sily pôsobiacej na zrno rovnica (3.9) a pre výpočet intenzity úberu materiálu, rovnica (3.12).

Normálová sila pôsobiaca na hĺbku prieniku zrna guľového tvaru do povrchu je daná vzťahom:

$$F_n = \sigma_r \cdot \frac{\pi d_g^2}{4} \quad (3.9)$$

kde σ_r (N/m²) je normálové napätie pôsobiace na zrno guľového tvaru s priemerom d_g (m).

Hĺbka vrypu zrna t (m) pre danú tvrdosť obrábaného materiálu H_w sa určí podľa vzťahu:

$$t = \frac{d_g}{2} - \sqrt{\frac{d_g^2}{4} - \frac{F_n}{H_w \cdot \pi}} \quad (3.10)$$

Po odvodení prierezu vytvoreného žliabku sa objem odobratého materiálu pre jedno zrno V_a (m³) pre dĺžku kontaktu zrna s obrobkom L_t (m) vypočíta podľa rovnice (3.16) ako úber materiálu pre jedno zrno:

$$V_a = \left[\frac{d_g^2}{4} \cdot \sin^{-1} \frac{2\sqrt{t(d_g - t)}}{d_g} - \sqrt{t(d_g - t)} \cdot \left(\frac{d_g}{2} - 1 \right) \right] \cdot L_t \quad (3.11)$$

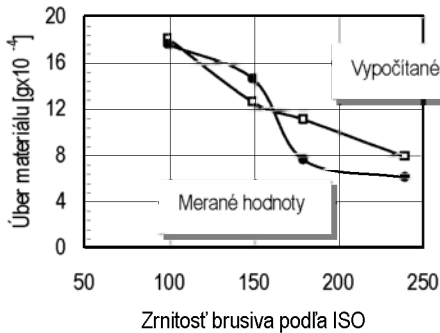
Celková intenzita objemového úberu materiálu V (m³) vychádza z predpokladu, že v skutočnosti k odobratiu častíc materiálu dochádza cez množstvo podobných procesov ako pri jednom zrne. Potom pre celkový úber v závislosti na počte zrn v procese:

$$V = 2 \cdot \pi \cdot N \cdot \ell_g \cdot \frac{R_v}{R_w} \cdot \left[\frac{d_g^2}{4} \cdot \sin^{-1} \frac{2\sqrt{t(d_g - t)}}{d_g} - \sqrt{t(d_g - t)} \cdot \left(\frac{d_g}{2} - 1 \right) \right] \cdot L_t \quad (3.12)$$

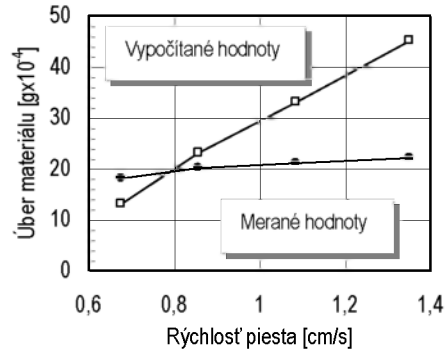
kde: R_v je polomer valca pre médium (m), R_w polomer obrobku (m), ℓ_g dĺžka záberu zrna (m).

Úber materiálu najviac ovplyvňujú zrnitosť, tlak piesta a rýchlosť jeho posuvu a koncentrácia brusiva. Ich priebeh je znázornený na obr. 3.37 pre AFM opracovanie mosadze s tvrdosťou 1500 HV, koncentrácia abraziva $K_b = 45\%$, priemer zrna $d_g = 0,152$ mm, zrnitosť 100, počet cyklov 50, podľa výsledkov publikovaných v [2], kde sú porovnané experimentálne získané výsledky s teoretickými výpočtami podľa modelových závislostí.

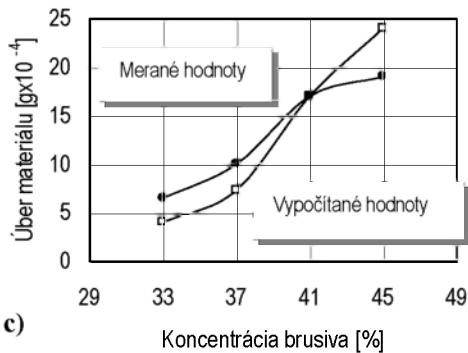
Koncentrácia abrazívnej zmesi $K_b = A_b / C$ je daná objemovým pomerom obsahu brúsnych častíc A_b v zmesi ku množstvu nosného média C .



a)



b)



c)

Obr.3.37 Závislosť úberu materiálu na parametroch AFM procesu

a) zrinitosť brusiva

b) rýchlosť posuvu písta

c) koncentrácia brusiva v médiu

(zdroj Jain, Jain, Dixit [2])

3.2.2.2 Kvalita opracovaného povrchu pri AFM

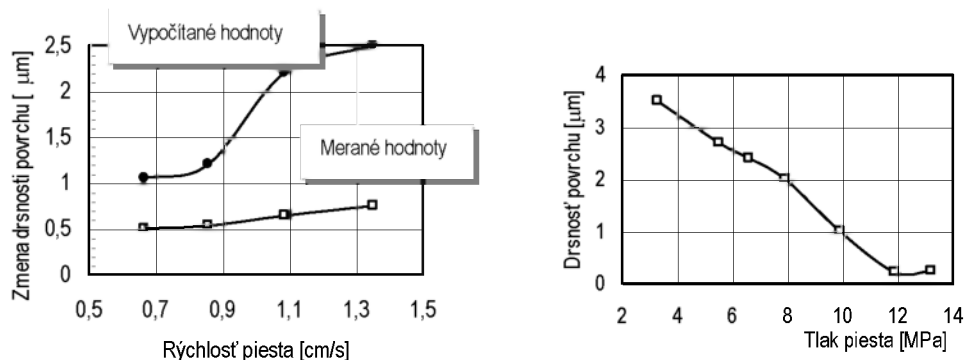
Ako už bolo uvedené v úvode, AFM proces patrí k dokončovacím metódam opracovania povrchov. Povrch má lesklý vzhľad a vysokú kvalitu dokončovacieho opracovania. Keďže úber materiálu zrnami je rovnomerný, nemôžu sa odstrániť rozmerové nepresnosti a defekty po predchádzajúcich operáciách. Dosahovaná drsnosť vyjadrená ako stredná aritmetická odchýlka profilu R_a je okolo $0,5 \mu\text{m}$.

Vplyv parametrov procesu na drsnosť povrchu je znázornená podľa výsledkov, ktoré uvádzajú **Jain, Jain, a Dixit** na obr.3.38 a 3.39. Podmienky pre sledovanie drsnosti povrchu boli rovnaké ako pre úber materiálu. Zákonitosti úberu materiálu a akosti opracovaného povrchu pri brúsení a lapovaní sú v zhode s výsledkami AFM procesu. So zvyšovaním zrnitosti brusiva (väčšie rozmery zrna) stúpa rýchlosť úberu materiálu a klesá akosť opracovaného povrchu.

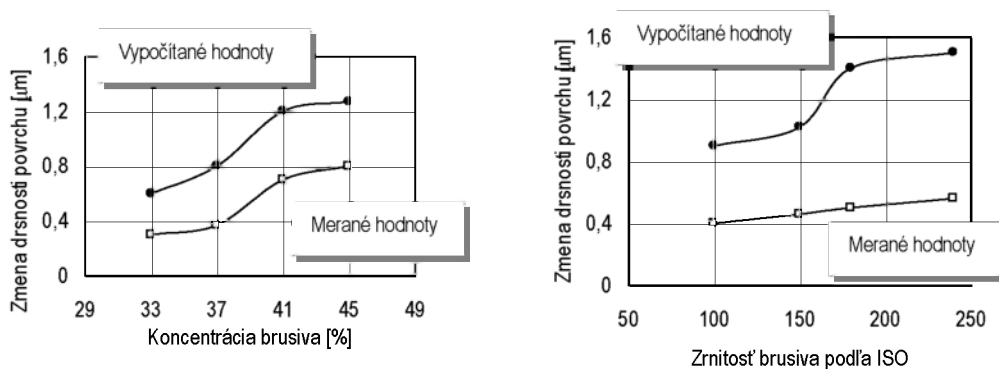
Hodnoty drsnosti povrchu klesajú so zvyšujúcou sa rýchlosťou posuvu písta, so stúpajúcim tlakom písta, percentuálnou koncentráciou brusiva a zrinitosťou brusiva pre daný počet cyklov.

Účinok viskozity média na drsnosť povrchu skúmal **Williams a Rajurkar** [7]. Podľa ich zistení stredná aritmetická odchýlka profilu R_a je najvyššia pre nízko viskózne médium (označenie viskozity média LV), najlepšia drsnosť povrchu bola pozorovaná pre stredne vysokú viskozitu

média s označením MHV. Obr.3.40 ukazuje dosiahnuté hodnoty drsnosti povrchu. Hodnoty viskozity boli označené iba kvalitatívne ako LV – nízkoviskózne médium, MV – stredne viskózne a MHV – stredne vysoko viskózne. Podľa údajov v literatúre výrobcovia zariadení udávajú kvantifikované hodnoty viskozity iba ako súčasť technológie.



Obr.3.38 Závislosť zmeny drsnosti povrchu na rýchlosti posuvu písta a na tlaku písta (zdroj. Jain, Jain, Dixit [2])



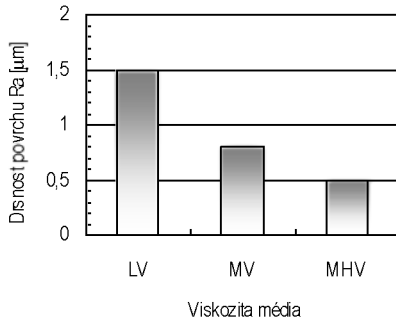
Obr.3.39 Závislosť zmeny drsnosti povrchu na koncentrácii brusiva v médiu a jeho zrntosti (zdroj. Jain, Jain, Dixit [2])

3.2.2.3 Oblasti použitia AFM technológie

Z hľadiska použitia je AFM charakterizované ako flexibilná metóda na dosiahnutie presných a rovnomerných povrchov. Používa sa pre odihľovanie, zaobľovanie, na presné rozmerové opracovanie, na odstraňovanie deformačne pretvorených vrstiev na ťažko dostupných plochách a na leštenie v širokom rozsahu rozmerov súčiastok – od malých ozubených kolies s priemerom 1,5 mm, alebo otvorov dýz s rozmerom 0,15 mm až po drážkované hriadele a disky turbín s priemerom do 1,2 m.

Pôvodne bola technológia AFM vyvinutá pre odihľovanie dielcov v leteckom priemysle, postupne pre svoju vysokú flexibilitu a nízke výrobné náklady bola aplikovaná v ďalších

odvetviach hromadnej a veľkosériovej výroby ako automobilový priemysel, výroba polovodičov a dokončovanie presných lekárskeho komponentov. Podľa [1] kapacita AFM procesu je 100 až 1000 dielcov za hodinu, operačný čas pre paletu výrobkov 1 až 3 minúty.



Obr.3.40 Závislosť drsnosti povrchu na viskozite média (zdroj Williams, Rajurkar [7])
LV- nízka viskozita, MV stredná, MHV stredne vysoká

Podmienky AFM:

10 cyklov,
brusivo SiC, zrnitosť 70, koncentrácia 65%,
prietok média 1147cm³/ dvojzdvih

Týmto procesom môžu byť dokončované rôzne materiály so širokým rozpätím tvrdosti ako napr. mäkký hliník a húževnaté zliatiny na báze niklu, tiež keramika a produkty práškovej metalurgie na báze karbidov.

Ďalšie konkrétne známe oblasti použitia sú [1, 2, 7, 8]:

- odihľovanie, zaoblňovanie a leštenie ložiskových kliebok
- odihľovanie a leštenie vstrekovacích foriem pre dielce v automobilovom a leteckom priemysle
- dokončovanie implantátov pre potreby humánnej medicíny
- odihľovanie palivových dýz
- dokončovanie tvárniacich nástrojov pre tlačenie, ťahanie, kovanie
- odstraňovanie deformačne pretvorených vrstiev na povrchoch krehkých obrobkov
- dokončovanie lopatiek rotorov, obežných kolies kompresorov a ozubených kolies.

Literatúra ku kapitole 3.2:

1. ASM– Metals Handbook– Machining, Vol. 16, ASM International, March, (1997), 9.ed.
2. Jain, R.K.; Jain, V.K.; Dixit, P.M.: Modeling of Material Removal and Surface Roughness in Abrasive Flow Machining Process. Int. J. Machine Tools and Man., 39,1999 p.1903–23
3. van Luttervelt, C.A.: On the Selection of Manufacturing Methods Illustrated by an Overview of Separation Techniques for Sheet Materials, *Annals of the CIRP* Vol.39/2 (1989), pp.587-07
4. McGeough, J. A.: Advanced Methods of Machining, Chapman and Hall, London, (1988),1.ed
5. Snoeys, R.; Staelens, F.; Dekkyser, W.: Current Trends in Non–Conventional Material Removal Processes, *Annals of the CIRP* Vol.35/2/ (1986), pp.467 –480
6. Venkatesh, V.C.: Parametric Studies on Abrasive Jet Machining. , *Annals of the CIRP* Vol.33/1 (1984), pp.109 – 112
7. Williams,R.E.; Rajurkar, K.P.: Stochastic Modeling and Analysis of Abrasive Flow Machining. *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol 114, Feb (1992) pp. 142 –151
8. Tool and Manufacturing Engineers Handbook, Vol.1 Machining, SME, Dearborne, 1983
9. Kaczmarek, J.: Principles of Machining by Cutting, Abrasion and Erosion. Wydawnictwo naukowo-techniczne, Warsaw, (1976), 1.ed. pp.448-462

3.3 Vodný lúč a abrazívny vodný lúč pre obrábanie

Rezanie a delenie materiálov pomocou vodného lúča pod názvom hydrodynamické obrábanie je známe už niekoľko desaťročí, avšak spoľahlivý, stabilný a účinný vodný lúč na opracovanie sa začal používať začiatkom roku 1970 pre delenie dreva a plastov.

Technologický proces využíva úzky vysokotlakový a vysoko-rýchlostný prúd vody (tlak vody okolo 400 MPa) ako rezný nástroj. Pridanie jemného brusiva zvýšilo účinnosť rezania, čo rozšírilo možnosti využitia vodného lúča.

Táto technológia prezentovaná ako abrazívny vodný lúč (*Abrasive Waterjet Machining* **AWJ**) bola komerčne zavedená roku 1983 pre rezanie skla [13]. AWJ nachádza široké uplatnenie pri obrábaní a opracovaní kovových a nekovových materiálov ako napr. liatiny, antikoročné ocele, legované uhlíkové ocele, nástrojové ocele, hliník, meď, titán a ich zliatiny, betón, keramika, kompozitné materiály s kovovou maticou a ďalšie.

Z hľadiska použitého pracovného média sa rozlišujú dve základné metódy:

- WJM – *Water Jet Machining* – čistý vodný lúč alebo tzv. hydrodynamické obrábanie,
- AWJ – *Abrasive Waterjet Machining* – obrábanie abrazívnym vodným lúčom – vodný lúč s prísadou jemného brusiva.

Abrazívny vodný lúč ako moderná technológia vhodná pre XXI. storočie sa vyznačuje viacerými prednosťami, z ktorých najdôležitejšie sú [13, 14, 16, 23]:

- vysoká rýchlosť rezania,
- schopnosť rezať rovinné, ale aj tvarovo zložené plochy v úzkych toleranciách,
- minimálne tepelné ovplyvnenie povrchu,
- malé deformáčné napätia v opracovanom povrchu,
- možnosť rezať v rôznych smeroch bez straty účinnosti lúča,
- možnosť riadiť dráhu lúča počítačom.

Univerzálnosť technológie abrazívneho lúča nachádza široké uplatnenie nielen pri vyrezávaní tvarov, ale aj pri technológii obrábania ako sústruženie, frézovanie, vŕtanie a rezanie závitov [13, 18, 24].

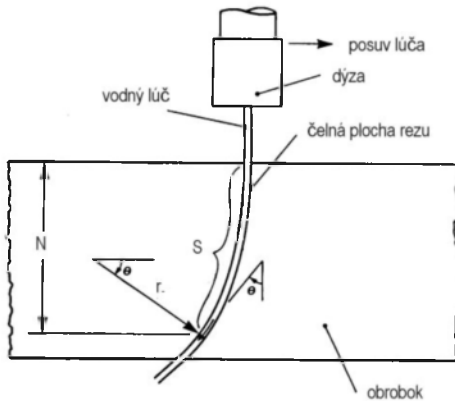
Vzhľadom na širšie uplatnenie procesu abrazívneho vodného lúča (AWJ) v praxi, sú poznatky prezentované v knihe prednostne vzťahované k tejto technológii.

3.3.1 Princíp rezania vodným lúčom

Rezanie vodným lúčom spočíva v odoberaní materiálu mechanickým účinkom dopadu úzkeho vodného prúdu s vysokou rýchlosťou a kinetickou energiou na jednotku plochy. Abrazivo ako prísada znásobuje mechanický účinok dopadu.

Lúč alebo prúd vody je generovaný vysokým tlakom vody, ktorá prechádza cez medzeru dýzy s priemerom okolo 0,3 mm [25]. Lúč vody preniká do obrobku, postupne stráca svoju kinetickú energiu a vychýľuje sa. Obr.3.41 ilustruje priebeh dráhy vodného lúča a jeho vychýlenie. Lúč sa v každom bode materiálu pohybuje po zaoblenej dráhe, ktorej polomer sa mení s predchádzajúcou dĺžkou oblúka. *Wilkins a Graham* [25] popisujú vychýľovanie a zároveň spomaľovanie lúča v reze ako dôsledok trenia medzi povrchom vodného lúča a povrchom materiálu obrobku.

Rozdiel medzi čistým vodným lúčom a abrazívnym vodným lúčom je v pridávaní jemného brusiva do prúdu vody. Obr.3.42 schematicky znázorňuje tento rozdiel. Rezanie vodným a abrazívnym vodným lúčom je definované ako vysoko-rýchlostný erozívny proces [1] alebo ako riadený proces erozívneho opotrebenia, kde abrazívne rezné médium je usmernené do úzkeho lúča s vysokou reznou účinnosťou [10, 11, 12].



Obr.3.41 Schematické znázornenie procesu rezania vodným lúčom a dráhy lúča (zdroj: Wilkins; Graham [25])

N – vzdialenosť vo zvislom smere, ktorú prejde lúč za čas t

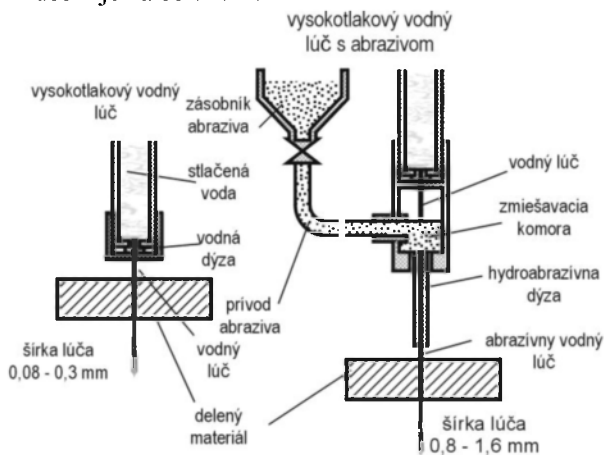
r – polomer zaoblenia lúča

S – dĺžka stopy lúča podľa čelnej plochy rezu [m]

θ – uhol vychýlenia lúča medzi skutočným smerom lúča v reze a východiskovým smerom

3.3.1.1 Zariadenie pre vodný lúč

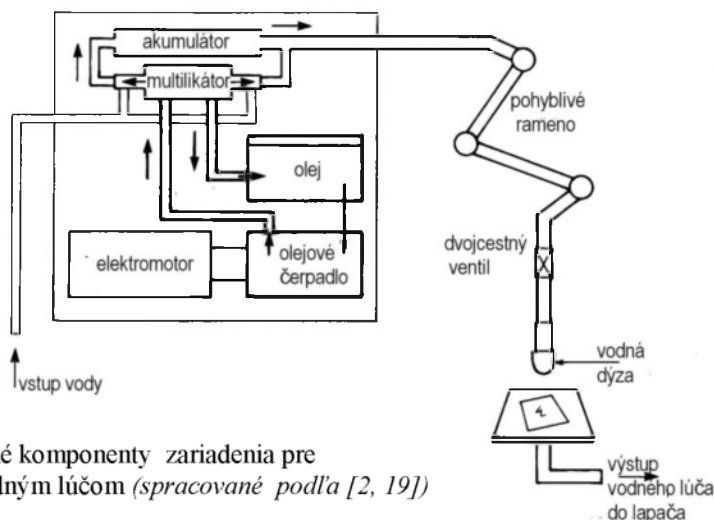
Hlavné prvky zariadenia, ktoré ilustruje obr.3.43 sú hydraulická jednotka, multiplikátor, akumulátor, filtre, potrubie na rozvod vody, dvojcestný priepustný ventil, dýza, nádoba na zachytávanie vody (lapač vody), prísady na úpravu vody. Detail princípu zariadenia a jeho popis je znázomený na obr. 3.44. Ukážka zostavy komerčne ponúkaného priemyselného zariadenia pre rezanie vodným lúčom je na obr. 3.45.



Obr.3.42 Zjednodušený model principiálneho rozdielu medzi technológiou čistého vodného lúča a abrazívneho vodného lúča [26]

Hydraulická jednotka slúži na vyvodenie vysokého tlaku vodného lúča pomocou systému hydraulických púmp. Vysokotlakový vodný lúč sa potom generuje hydraulickým zariadením

s multiplikátorom alebo triplexovým plunžerom. Druh konštrukcie zariadenia závisí od výrobcu. Zariadenia s multiplikátorom dodáva americká firma Flow Systems [26], druhý druh presadzujú japonské firmy [14].

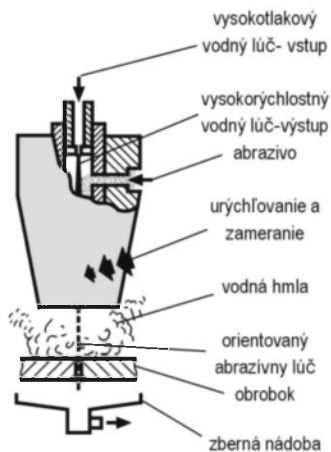


Obr.3.43 Hlavné komponenty zariadenia pre opracovanie vodným lúčom (spracované podľa [2, 19])

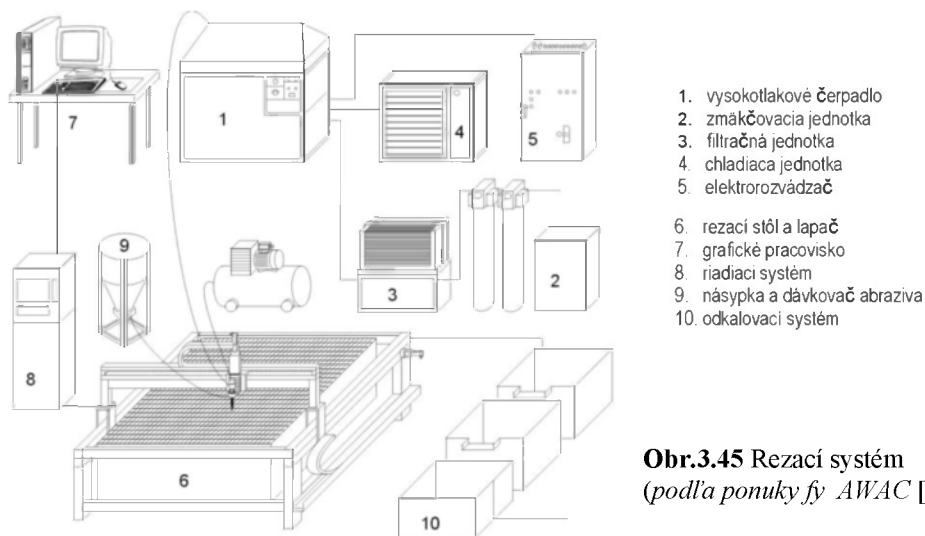
Multiplikátor je časťou hydraulickej jednotky a používa sa na zvýšenie tlaku vody obyčajne na 380 MPa. Znásobenie tlaku vody závisí od pomeru pracovných plôch dvoch vzájomne spojených piestov [14].

Akumulátor tlaku je vysokotlaková nádoba, ktorá tlmi rázy v kvapaline vyvolané vznikom pulzácie lúča ako následok stlačenia vody. Úlohou akumulátora je udržiavať rovnaký tlak a rýchlosť prúdiacej vody.

Filtre ako neoddeliteľná súčasť zariadenia, filtrujú kvapalinu a odplávajú nečistoty do veľkosti 1,2 až 0,5 μm , zároveň chránia štrbinu v dýze pred možným poškodením cudzími prímieskami.



Obr.3.44 Princíp abrazívneho vodného lúča [17]

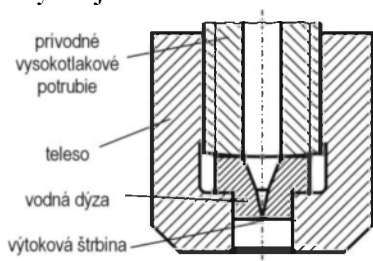


Obr.3.45 Rezací systém
 (podľa ponuky fy AWAC [27])

Potrubie na rozvod vody pozostáva z rôznych druhov armatúr a spojovacích elementov vyrobených z nehrdzavejúcej ocele obyčajne s priemerom $6 \div 14$ mm [19]. Potrubie je prispôbené flexibilnému pohybu rezacej hlavice. V súčasnosti sú tieto komponenty normalizované a štandardizované.

Dvojcestný ventil riadi postup rezania prídomom resp. zastavením prívodu prúdu kvapaliny.

Dýza je základná a najdôležitejšia časť zariadenia, ovplyvňuje kvalitu rezného lúča aj kvalitu rezu. Časť dýzy, v ktorej je úzky výtokový otvor (štrbina) s priemerom od 0,075 mm sa vyrába zo zafíru alebo spekaného karbidu, obr.3.46. V súčasnosti sa zafírové časti dýzy nahrádzajú diamantom, ktorý má 10 násobne vyššiu pracovnú životnosť, čo je výhodné z hľadiska údržby, pretože sa predlžuje doba medzi údržbami. Priemerná doba práce zafírovej dýzy je okolo 200 hodín, po tomto čase sa štrbina dýzy zanesie nečistotami a minerálnymi usadeninami z vody. Výhodou diamantovej dýzy je, že sa diamantová štrbina môže viackrát prečistiť, a po prečistení bude produkovať rovnako koherentný vysokotlakový prúd. Cena diamantovej dýzy je 7 až 10 násobne vyššia ako korundovej alebo zafírovej [2, 14, 17, 21]. Príklad konštrukcie dýzy pre čistý vodný lúč je na obr.3.46.



Obr.3.46 Príklad konštrukcie dýzy pre čistý vodný lúč [21]

Základný rozdiel medzi štandardným čistým vodným lúčom a abrazívnym lúčom spočíva v pridávaní jemného brusiva do prúdu vody cez rôzne systémy privodných mechanizmov, k čomu sú prispôbené aj konštrukčné riešenia dýz.

Obr. 3.47a, b ukazuje typy dýz pre abrazívny vodný lúč s rôznymi typmi prívodu brusiva a jeho zmiešavania s vodou [17]. Konštrukcia podľa obr.3.47a predstavuje ľahko vyrábateľný typ dýzy s jednoduchým vodným lúčom a radiálnym prívodom brusiva s možnosťou použitia aj pre čistý vodný lúč. Výhodou dýzy podľa schémy na obr.3.47b je axiálny prívod brusiva, tento spôsob prívodu brusiva zlepšuje jeho zmiešavanie s vodou a tým znižuje opotrebenie obvodu dýzy. Brusivo je privádzané cez zmiešavaciu komoru do vysokotlakového prúdu vody. V zmiešavacej komore sa brusivo ľubovoľne zmiešava s vysokotlakovou vodou a potom prechádza cez sekundárnu dýzu, ktorej otvor (štrbina) má priemer v rozmedzí od 0,75 ÷ 2,5 mm [28]. Výkon vodného lúča sa pohybuje od 7 do 45 kW. Používané brusivo je granát, minerálny piesok a v špeciálnych prípadoch kremíkový piesok.



Obr.3.47 Dýzy pre AWJ. (zdroj: van Luttervelt[17])

a) Dýza s jednoduchým vodným lúčom a radiálnym prívodom brusiva.

b) Dýza so zmiešaným lúčom a axiálnym prívodom brusiva

Podľa konštrukcie dýzy sa rozlišujú aj spôsoby rezania abrazívnym vodným lúčom. Preferujú sa dve hlavné technológie abrazívneho vodného lúča:

- systém s priamym prívodom brusiva (**AWJ** *abrasive waterjet*), pri ktorom je brusivo vedené zo zásobníka do zmiešavacej komory, v ktorej je vysokotlakovým vodným lúčom strhávané a urýchľované. Tento systém používa vysokorýchlostný vodný lúč na zmiešavanie a následné tvorenie abrazívneho lúča. Používané tlaky vody sú 7 ÷ 400 MPa, prietok abraziva je v rozmedzí 1 ÷ 20 kg/min [9].
- systém s priamym vstrekaním brusiva (**ASJ** *abrasive slurry jet*), v tomto prípade sa do dýzy privádza stlačená suspenzia zmiešaná s vodou v tlakovej nádobe. Používané tlaky sú do 100 MPa, prietok suspenzie je okolo 20 kg/min [5], pre presné rezanie sa udáva 1 ÷ 3 kg/min [14].

Podrobné hodnotenie oboch technológií z hľadiska výkonnosti podáva **Hashish** [9].

Z kvalitatívneho porovnania oboch druhov technológií abrazívneho lúča vychádza, že ASJ systém má vyššiu účinnosť a vyššiu prúdovú hustotu narážajúcich častíc ako AWJ, zároveň ASJ systém umožňuje použiť užšieho priemeru lúča a dýzu kompaktnej konštrukcie.

Úprava vody je ďalší veľmi dôležitý faktor z hľadiska zanášania otvoru dýzy. Podľa poznatkov [2, 14, 19, 28] najvýhodnejšia je demineralizovaná a deionizovaná voda. Otvor dýzy musí byť chránený pred rôznymi prísadkami vo vode, ktoré majú tendenciu usádzať sa v štrbine, ktorej priemer je 0,075 mm. Kvalita pracovného média resp. úprava vody závisí od výrobcu zariadenia, každá firma si uvádza svoje požiadavky, v závislosti od dodávaného zariadenia. Dodržanie kvality vody ovplyvňuje životnosť dýzy, tesnení a ventilov. Úprava vody ovplyvňuje aj rýchlosť rezania, kvalitu finálneho opracovania a celkové prevádzkové náklady.

Aditíva (prísady) do vody sú prídavky rôznych polymérov s lineárnymi molekulami. Roztok vody s polymérmi typu PAA (polyakrylamid) alebo PEO (polyetyloxid) vytvára súvislý lúč a ani po styku s materiálom sa lúč neroztiešťa. Lúč je potom pri rezaní účinnejší, energia koncentrovanejšia a lúč si zachováva kompaktné jadro (polyméry zabraňujú nadmernej turbulencii

prúdenia). Úprava vody polymérmi sa vyžaduje napr. pre vytváranie ostrých hrán na delených dielkoch.

Lapač vody je nádoba na zachytávanie vodného lúča, ktorý prechádza cez materiál, tiež slúži na tlmenie hluku a zároveň zachytáva triesku. Hladina hluku pri použití AWJ lúča je vysoká a môže dosahovať hodnoty viac ako 105 dB. Lapač musí byť dostatočne hlboký, aby bolo zabezpečené lámanie lúča ešte pred dosiahnutím dna, požadovaná hĺbka nádoby je $300 \div 600$ mm [2]. V prípade nedostatku priestoru sa môžu použiť aj nižšie nádoby naplnené kovovými guľôčkami.

Druhy používaných lúčov. Podľa možností zariadenia, jeho konštrukcie a požiadaviek na použitie existujú tri najčastejšie využívané druhy lúčov:

- Systém pulzujúceho lúča používa opakované a krátkodobé trvanie impulzu lúča, vznik tlakových špičiek, ktoré urýchľujú rozširovanie reznej medzery. Metóda je vhodná pre vŕtanie, rezanie, lámanie a drvenie hornín, uplatnenie v banskej ťažbe.
- Systém kontinuálneho lúča je charakterizovaný stálou energiou hladiny lúča počas procesu, je to najviac rozšírená metóda pre delenie materiálov, používa sa pri rezaní prakticky všetkých druhov materiálov.
- Systém kavitačného lúča pracuje na princípe javu lokálneho porušenia materiálu deštruktívnou silou kavitačných bublín, kavitujúci lúč je lúč kontinuálny s obsahom kavitačných bubliniek.

3.3.1.3 Charakteristika vodného a abrazívneho vodného lúča

Technologické a prevádzkové charakteristiky vodného a abrazívneho vodného lúča sú kvantitatívne určené doporučenými rozsahmi parametrov [2, 4, 9, 14, 19, 21, 28]:

- pracovný tlak vody: $300 \div 400$ MPa; pre WJM $60 \div 415$ MPa, pre delenie kovov čistým vodným lúčom až 690 MPa;
- brusivo: – prírodný granát, minerálny piesok, kremičitý piesok, oceľová drvina, oxid hlinitý;
- vzdialenosť medzi dýzou a obrobkom (často používaný anglicky výraz *stand off*) – od 2,5 do 6,35 mm alebo $10 \div 25$ mm;
- šírka lúča $0,1 \div 1,5$ mm (pre AWJ $1,2 \div 2,5$ mm);
- spotreba vody: je rozdielna podľa parametrov zariadení; pre priemer dýzy 0,127 mm sa udáva približne 26 l/hodinu;
- rýchlosť lúča: $600 \div 900$ m/s;
- materiál dýzy: zafír, spekaný karbid, nehrdzavejúca oceľ, karbid wolfrámu, karbid a nitrid bóru, diamant;
- šírka rezu: pre tenké materiály je šírka rezu asi o 0,3 mm väčšia než priemer otvoru dýzy.

3.3.2 Úber materiálu

Prevádzkové charakteristiky vodného lúča a abrazívneho vodného lúča, ktoré ovplyvňujú úber materiálu, kvalitu opracovaného povrchu a účinnosť procesu sú:

- tlak vody, rýchlosť prúdenia a rozmery otvoru dýzy
- vzdialenosť medzi dýzou a obrobkom
- uhol sklonu lúča
- druh a veľkosť brusiva (ak sa používa)

Hydraulické parametre technológie vysokotlakového lúča vychádzajú z teórie mechaniky tekutín. Tlak kvapaliny je v procese vodného lúča určený *Bernoulliho* rovnicou pre prúdenie nestlačenej kvapaliny:

$$v^2 = \frac{2p}{\rho} \quad (3.13)$$

kde v je rýchlosť prúdenia (m/s), p je tlak kvapaliny (MPa), ρ hustota kvapalného média (kg/m³).

Tlak kvapaliny je priamoúmerný štvorcu reznej rýchlosti, ktorý je proporcionálny ku kinetickej energii ($1/2 \cdot m \cdot v^2$) častice o hmotnosti m . Následkom toho tlak vodného lúča určuje presnú kinetickú energiu častice vo vodnom lúči. Pri vyšších tlakoch priemerná kinetická energia molekúl vody je vyššia a oveľa jednoduchšie porušuje molekulárne väzby v materiále obrobku. Z toho vyplýva, že tlak čistého vodného lúča potrebný pre rezanie sa musí zvyšovať so zvyšovaním tvrdosti materiálu obrobku.

V súčasnosti najvyššie hodnoty tlaku vody použité pre rezanie kovových materiálov dosiahli hodnotu 690 MPa [13] pre čistý vodný lúč. Ak je tlak vody adekvátny pre rezanie a pre daný materiál a zároveň je udržiavaný ako koherentný, potom intenzita úberu materiálu je určená koeficientom prúdenia.

Na základe rovnice (3.13) sa rýchlosť prúdenia určí objemom pretekajúcej kvapaliny (*volume flow rate*) ako objemový koeficient prúdenia Q_s vzťahom:

$$Q_s = 24C_D \cdot D^2 \cdot \sqrt{0,22 \cdot p / \rho} \quad (3.14)$$

kde C_D – je výtokový koeficient dýzy, D – priemer štrbiny v dýze (mm). Typický výtokový koeficient pre zažirovú alebo diamantovú dýzu má hodnotu 0,7 [2].

Tabuľka 3.7 uvádza používané tlaky vody a dosahované rýchlosti prúdenia pre výtokový koeficient 0,7.

Tab. 3.7 Rýchlosť prúdenia pre výtokový koeficient dýzy 0,7 (podľa [2])

Tlak vody [MPa]	Priemer štrbiny [mm]	Rýchlosť prúdenia [l/min]
380	0,15	0,64
	0,30	2,60
275	0,15	0,17
	0,30	2,20
200	0,15	0,49
	0,30	2,00

Rýchlosť prúdenia a tlak vodného lúča majú rôzny vplyv na rezanie. Rýchlosť prúdenia ovplyvňuje intenzitu úberu materiálu, kým tlak lúča vplyva nielen na úber, ale ovplyvňuje aj mechanizmus rezania. Tab.3.8 uvádza typické parametre rezania rôznych materiálov čistým vodným lúčom.

Ako vyplýva z tab.3.8 čistý vodný lúč umožňuje rezanie a delenie nekovových materiálov. Pre delenie a rezanie kovových materiálov je vhodnejší vodný lúč s pridaním abraziva (brusiva), ktoré

zvyšuje jeho účinnosť pri rezaní materiálov s vyššou tvrdosťou. Tab.3.9 uvádza rýchlosť rezania AWJ lúčom pre vybrané kovové a nekovové materiály s vyššou tvrdosťou.

Zvýšenie tlaku vody vyvolá vyššiu rýchlosť prúdenia, zvyšuje sa celková energia v dýze, čím sa vytvárajú predpoklady pre rezanie hrubších materiálov. Na druhej strane zvýšenie tlaku vody vyžaduje výkonnejšie zariadenia. Rovnako vyšší tlak vody zvyšuje rýchlosť lúča a jeho prienik do materiálu (hĺbku rezu). Zvýšenie tlaku vody zároveň zlepšuje kvalitu rezných hrán pri rezaní.

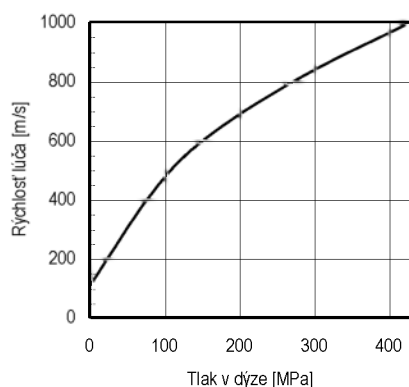
Tab.3.8 Rýchlosť rezania vodným lúčom bez brusiva (spracované podľa [2],[19],)

Materiál	Hrúbka [mm]	Rezná rýchlosť [mm/s]	Priemer dýzy [mm]	Pracovný tlak [MPa]
Azbestový obklad	18	1520	0,20	190
Gumová dlaždica	3	150	0,13	380
Sklo	300	420	0,15	350
Polypropylén	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

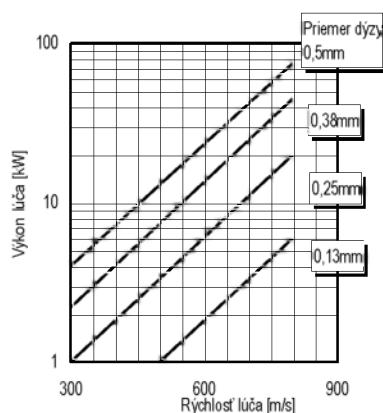
Tab.3.9 Rýchlosť rezania AWJ lúčom (spracované podľa [10,15])

Materiál	Hrúbka [mm]	Rezná rýchlosť [m/min]
Mäkká oceľ	1,6	0,50
	13	0,10
	50	0,038
	180	0,010
Nehrdzavejúca oceľ	5	0,40
	13	0,15
	25	0,076
Hliník	1,6	1,30
	6	0,50
	25	0,13
	100	0,025
Titán	3	0,50
	6	0,40
	12	0,10
Sklo	13	1,3
	19	0,60
	25	0,13
Mramor	50	0,40
Betón	250	0,025

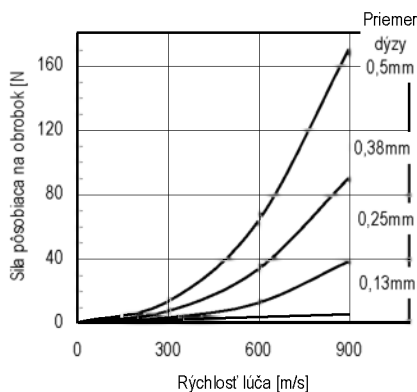
Informatívne hodnoty závislosti medzi tlakom vody a rýchlosťou vodného lúča sú graficky znázornené na obr.3.48. Lineárne stúpajúci vzťah medzi rýchlosťou lúča a jeho výkonom pre rôzne priemery otvorov dýzy ilustruje obr.3.49. Zvyšovanie tlaku vody zvyšuje aj silu pôsobiacu na materiál obrobku pri rezaní. Stúpanie hodnoty sily je tiež závislé na priemere otvoru dýzy podľa exponenciálnej závislosti na obr.3.50, pre čistý vodný lúč [28].



Obr.3.48 Závislosť rýchlosti lúča na tlaku vody v dýze pre čistý vodný lúč (spracované podľa [28])



Obr.3.49 Závislosť výkonu lúča na rýchlosti lúča pre rôzne priemery otvoru dýzy pre čistý vodný lúč (zdroj [28])



Obr.3.50 Závislosť sily pôsobiacej na obrobok na rýchlosti lúča pre rôzne priemery otvoru dýzy pre čistý vodný lúč (zdroj [28])

3.3.2.1 Model zóny rezania AWJ lúčom

Z tribologického hľadiska základným princípom rezania a oddeľovania materiálu vodným lúčom a abrazívnym vodným lúčom je spolupôsobenie dvoch médií, kde úber materiálu sa uskutočňuje ako výsledok opotrebenia procesom erózie. Jav erózie predstavuje proces opotrebenia, ktorý je spojený s nárazom pevnej častice na povrch pevného materiálu. Erózný proces závisí na uhle nárazu α_0 častice na povrch a na pevnostných vlastnostiach materiálu. Obr.3.51 ilustruje vplyv

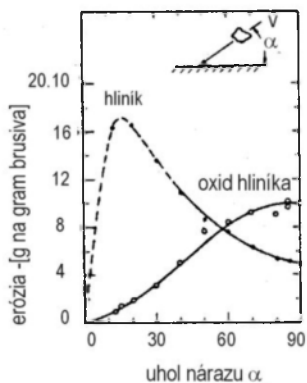
uhla dopadu samostatnej častice na povrch krehkého (keramika – oxid hliníka) a tvárneho materiálu (hliník), ktorý popísal **Finnie** et al. (1967) [3]. Tab. 3.9 popisuje tzv. „kritické“ uhly nárazu pre tvárny a krehký materiál a udáva prevládajúci mechanizmus erozívneho opotrebenia.

Tab.3.9 Reakcia materiálu na rôzne uhly dopadu uhla dopadu častice (zdroj: *Bhushan* [3])

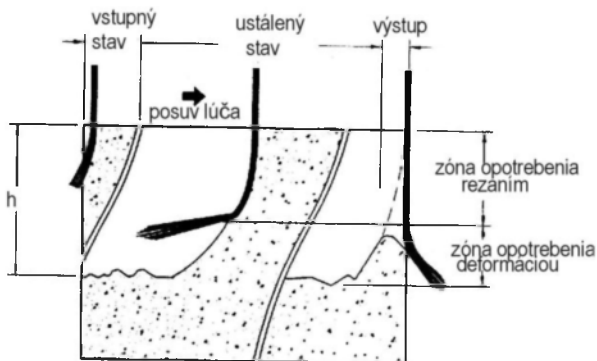
materiál	uhol nárazu α		
	$< 20^\circ$	45°	90°
tvárny	maximálne rezné opotrebenie	zmiešaný režim	maximálne deformáčné opotrebenie
krehký	veľmi malá erózia	stredná erózia	maximálna erózia

Hashish (1987) [5] na základe Finnieho modelu navrhol analytický model erózie častice, podľa ktorého zóna rezu, ktorá je ovplyvnená uhlom nárazu α častice lúča, sa delí na dve zóny podľa prevládajúceho mechanizmu oddeľovania materiálu, obr.3.52. Pre rezanie vodným lúčom je uhol nárazu určený medzi lúčom a rovinou obrobnku. Definuje sa ako uhol sklonu medzi vektorom rýchlosti lúča a normálou vektora pozdĺžnej rýchlosti posuvu [8].

Pre malý uhol nárazu častice (vodného lúča) bol použitý pojem zóna opotrebovania rezaním (*cutting wear zone*). V slovenskej odbornej terminológii sa používa aj pojem *rezné opotrebovanie*. Termín zdôrazňuje skutočnosť, že materiál je rezaný alebo mikrorezaný. V zóne vzniká tzv. *ploughing effect* – mikrorytie materiálu brúsnyimi časticami. Častica naráža na materiál, vyrýva v nej trajektóriu a odráža sa resp. vychádza zo záberu. V tomto prípade rezania je uhol nárazu menší alebo sa rovná kritickému uhlu α_0 . Ako uvádza **Bhushan** [3], erózný proces pre tvárne materiály nastáva pri uhle α_0 okolo $20 \div 30^\circ$, kým pre krehké materiály je maximálna erózia pri uhle dopadu častice 90° .



Obr.3.51 Typická erózna charakteristika tvárneho a krehkého materiálu podľa modelu, ktorý navrhol **Finnie** (1967) [3, 8] častica SiC; zrnitosť 120; rýchlosť 152m/s



Obr.3.52 Zóny rezania abrazívnym vodným lúčom podľa modelu, ktorý navrhol **Hashish** (1987) [8]

Zóna rezného opotrebenia sa vyskytuje do určitej hĺbky h_c , ktorá sa výpočtom určí podľa vzťahu [8]:

$$h_c = \frac{C \cdot d_j}{2,5} \cdot \left(\frac{14 \cdot m_a}{\pi \cdot \rho_a \cdot u \cdot d_j^2} \right)^{2/5} \cdot \frac{v_a}{v_c} \quad [\text{mm}] \quad (3.15)$$

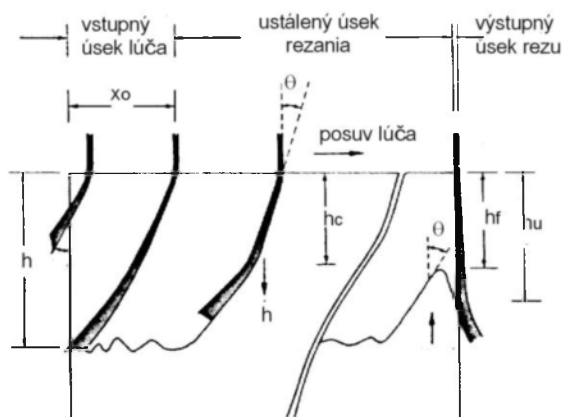
kde: v_a – rýchlosť pohybu abrazívnych častíc (m/s), v_c – charakteristická rýchlosť, C – experimentálne stanovená konštanta reprezentujúca časť lúča v reze, d_j – priemer lúča AWJ (mm), u – rýchlosť posuvu (mm/s), ρ_a – hustota abrazívneho materiálu.

Ak je uhol dopadu veľký zaviedol sa termín zóna opotrebenia deformáciou alebo deformačné opotrebenie (*deformation wear zone*), obr.3.52. V tejto oblasti nadmerná deformácia narážajúcej častice spôsobuje spevnenie materiálu a jeho následné štiepenie/vydrobovanie a/alebo vylamovanie (*chipping*) nárazom nasledujúcej častice. Pri krehkých materiáloch sa v tejto zóne tvoria trhliny, ktoré sa rýchlo šíria, čo má za následok vylamovanie čiastočiek materiálu a následne ich úber vyplavením. Hĺbka zóny deformačného opotrebenia h_d sa určí analyticky podľa vzťahu: [8]

$$h_d = \frac{1}{\frac{\pi \cdot d_j \cdot E_d \cdot u}{2(1-c)m_a \cdot (v_a - v_c)^2} + \frac{C_f}{d_j} \cdot \frac{v_a}{v_a - v_c}} \quad [\text{mm}] \quad (3.16)$$

kde: v_c je maximálna rýchlosť pohybu abrazívnych častíc, ktorá je len výsledkom elastickej deformácie, C_f – koeficient trenia, E_d – špecifická energia pre deformačné opotrebenie, je to energia potrebná pre úber jednotky objemu materiálu (používa sa hodnota medze sklzu materiálu [14]). Celková hĺbka rezu h je súčtom h_c a h_d a predstavuje hĺbku, do ktorej môže vodný alebo abrazívny vodný lúč preniknúť a rezať bez výraznej straty účinnosti rezania.

Podľa vyššie uvedeného modelu sa zóna rezania abrazívnym vodným lúčom delí na rôzne úseky, ilustrované na obr. 3.53. Počiatočný (vstupný) stav x_0 je po dobu, kým lúč dosiahne



Obr.3.53 Charakteristické úseky rezania abrazívnym vodným lúčom [8]

maximálnu hĺbku rezu h . Za vzdialenosťou x_0 rezanie postupuje cyklickým spôsobom. Ustálený stav je do hrúbky h_c v hornej časti rezu. Je to zóna opotrebovania rezaním, charakterizovaná ako zóna ustáleného procesu, kde rýchlosť úberu materiálu je rovná rýchlosti posuvu lúča.

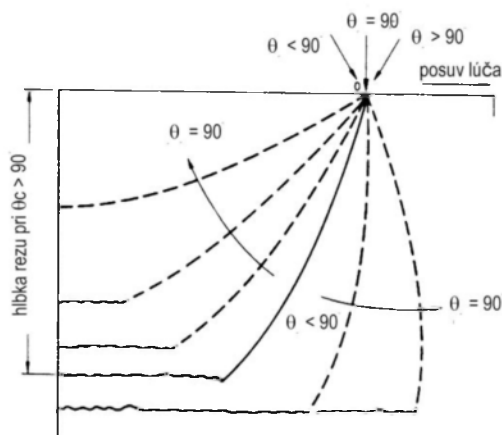
Pod hranicou h_c sa materiál odrezáva postupnými krokmi vplyvom nárazu, kým lúč nedosiahne hĺbku h . Zároveň sa pod hranicou h_c lúč postupnými krokmi zaoblňuje a mení smer, čím sa mení aj uhol dopadu častíc.

Pri vychádzaní lúča z rezu vzniká zóna neodrezaného materiálu v tvare trojuholníka, ktorá dokazuje, že rezný proces je ustálený iba počas určitej hĺbky h_c . Z toho vyplýva požiadavka pre delenie, rozrezávanie materiálu, aby hĺbka h_c bola väčšia ako hrúbka deleného materiálu. To sa dosiahne použitím vhodného uhla sklonu lúča θ , ktorý je označovaný ako uhol rezania.

Ak sa materiál AWJ lúčom nedelí, ale iba reže, vytvára sa rez s nepravidelnou hĺbkou následkom vychýľovania lúča a jeho nestability v dolnej časti rezu. Táto nepravidelnosť je citlivá na také parametre lúča ako uhol rezania, posuv lúča a vzdialenosť medzi lúčom a obrobkom [8].

Obr. 3.54 znázorňuje možné spôsoby zmeny uhla rezania a ich vplyv na zmenu hĺbky rezu. Uhol θ_0 je uhol medzi vektorom lúča a dotyčnicou k čiare rezu v bode 0, obr.3.54. Pomer hĺbok h_c/h sa mení od minimálnej hodnoty pri $\alpha = 80^\circ$ ku maximálnej hodnote pri $\alpha = 60^\circ$, z čoho **Hashish** [8] odvodzuje zmenu spôsobu erozívneho opotrebovania v jednotlivých zónach rezania.

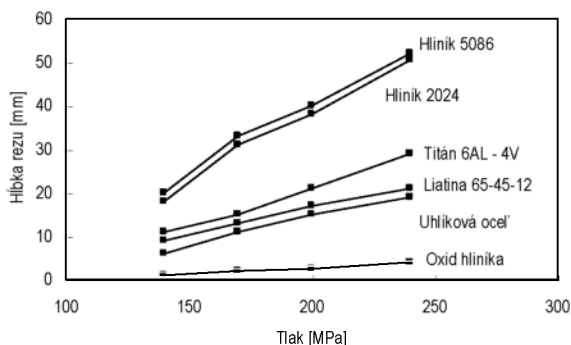
Existencia dvoch odlišných zón pri rezaní AWJ lúčom svedčí aj o tom, že vlastnosti materiálu určené predovšetkým jeho tvrdosťou (HV) nie je možné celkom zanedbať. Tvrdosť materiálu, ovplyvňuje prienik lúča do materiálu a tým aj hĺbku rezu.



Obr.3.54 Zmena hĺbky rezu vplyvom zmeny uhla rezania θ_0 .

Všetky krivky znázorňujúce rozhranie rezu sú identické pre rôzne uhly rotácie okolo nuly. (zdroj Hashish [8])

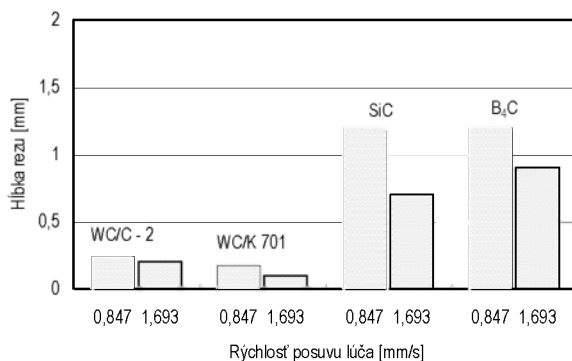
Niektoré výsledky, ktoré publikoval **Hashish** [10] pre materiály s odlišnými vlastnosťami znázorňuje obr.3.55. Ako vyplýva z grafu na obr. 3.55, vplyv tvrdosti materiálu na hĺbku rezu je rozdielny pre materiály s rozdielnou tvrdosťou, ako sú relatívne mäkký hliník a veľmi tvrdý oxid hliníka. V porovnaní s „klasickým“ rezaním nástrojom s definovanou geometriou reznej hrany je AWJ proces menej citlivý na tvrdosť materiálov. Na druhej strane svoj vplyv okrem tvrdosti materiálu zohráva aj jeho húževnatosť.



Obr.3.55 Hĺbka rezu pre rôzne materiály (zdroj: Hashish [10])
 hliník, $R_m = 331 \div 386 \text{ MPa}$, $E = 71 \div 73 \text{ GPa}$
 uhlíková oceľ, $R_m = 441 \text{ MPa}$
 titán, $R_m = 1035 \text{ MPa}$, $E = 113 \text{ GPa}$
 liatina, $R_m = 448 \text{ MPa}$, $E = 165 \text{ GPa}$

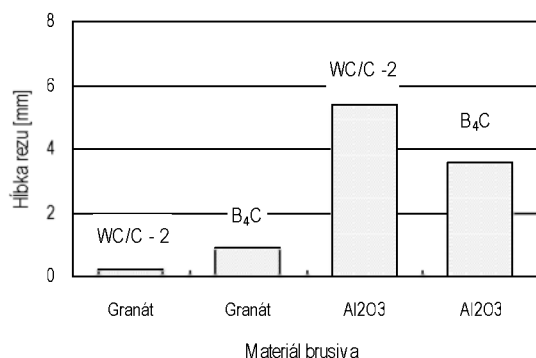
Podmienky rezania:
 $d_h = 0,508 \text{ mm}$, $d_m = 1,52 \text{ mm}$, $u = 2,54 \text{ m/s}$
 brusivo granát, zrnitosť 60

Hĺbka rezu a/alebo zárezu je čiastočne ovplyvnená mechanickými vlastnosťami materiálov, ich tvrdosťou a húževnatosťou. Pri rezaní materiálov s vysokou tvrdosťou, ako karbid kremíka (SiC) a karbid bóru (B_4C), sa dosahujú väčšie hĺbky rezu v porovnaní s materiálmi rovnako tvrdými, ale zároveň húževnatými, ako je karbid wolfrámu (WC). Karbid wolfrámu pri konštantných podmienkach rezania vykazuje až 4 krát menšiu hĺbku rezu, ako vyššie uvedené materiály SiC a B_4C , obr.3.56.



Obr.3.56 Hĺbka rezu pre materiály s odlišnou tvrdosťou a húževnatosťou (zdroj: Hashish [10])

Podmienky rezania:
 $d_h = 0,457 \text{ mm}$, $d_m = 1,14 \text{ mm}$, $l_m = 50 \text{ mm}$,
 $p = 311 \text{ MPa}$, $m_a = 12,7 \text{ g/s}$,
 brusivo granát zrnitosť 80



Obr.3.57 Porovnanie dosahovanej hĺbky rezu pre materiály obrobkov s odlišnou tvrdosťou a húževnatosťou pre odlišné druhy používaných brusív (zdroj: Hashish [10])

Podmienky rezania:
 $d_h = 0,457 \text{ mm}$, $d_m = 1,14 \text{ mm}$, $l_m = 50 \text{ mm}$, $p = 311 \text{ MPa}$,
 $m_a = 12,7 \text{ g/s}$, $u = 1,693 \text{ mm/s}$
 granát zrnitosť 80

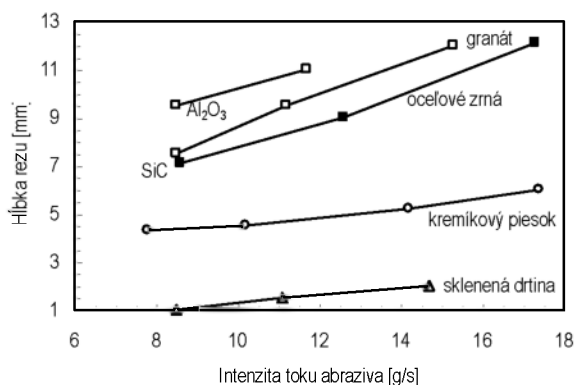
Samozrejme na hĺbku rezu má vplyv aj druh použitého brusiva a jeho tvrdosť, ako to znázorňuje závislosť na obr.3.57 [10], kde sú porovnané najčastejšie používané druhy brusív, relatívne mäkký granát a tvrdý oxid hliníka. Je zaujímavé, že karbid wolfrámu je pri rezaní s použitím granátového brusiva odolnejší, vykazuje menšiu hĺbku rezu asi o 2/3 ako tvrdý karbid bóru. Pri použití oxidu hliníka ako brusiva je tento trend opačný. To znamená, že ak sa prekročí určitá hranica pomeru tvrdosti medzi materiálom obrobku a použitým brusivom, ovplyvní to významne intenzitu úberu materiálu.

Pri výpočte hĺbky rezu h je potrebné uvažovať aj s vlastnosťami materiálov a potom hĺbku rezu je možné určiť podľa vzťahu [10]:

$$h = \frac{A}{\sqrt{HV}} + \frac{B}{E + C} \quad (3.17)$$

kde: A, B, C sú konštanty závislé na parametroch AWJ rezania a na rýchlosti posuvu lúča, E je modul pružnosti materiálu a HV je tvrdosť podľa Vickersa.

Vplyv rôznych druhov brusív na dosahovanú hĺbku rezu je názorne ukázaný na grafickej závislosti pre AWJ rezanie nízkolegovanej konštrukčnej ocele AISI 4340 na obr.3.60. Účinok týchto brusív závisí tiež na materiále, ktorý sa opracováva.



Obr.3.60 Účinok druhu brusiva na hĺbku rezu (zdroj Hashish [7])

Podmienky rezania:
 $d_n = 0,508$ mm, $d_m = 1,57$ mm;
 $p = 207$ MPa, $u = 4,1$ mm/s
 Oceľ AISI 4340 (DIN 35CrNiMo6)

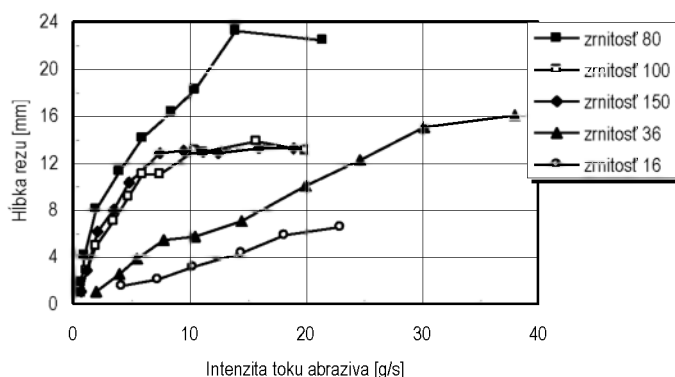
Voľbu druhu brusiva ovplyvňuje niekoľko faktorov [7], ktorých kvantifikácia závisí na druhu použitého priemyselného zariadenia:

- brusivá s nižšou účinnosťou sú lacnejšie, ale cena (náklady na brusivo) nie sú v lineárnom vzťahu k jeho prevádzkovým charakteristikám, napr. cena kremíkoveho piesku je asi o 20–40% nižšia ako granátu. Pri rezaní hliníka alebo skla však použitie kremíkoveho piesku namiesto granátu spomaľuje proces rezania iba o 20 ÷ 40%, teda v závislosti na ostatných parametroch procesu rezania, použitie kremíkoveho piesku je v tomto prípade ekonomickejšie;
- opotrebenie dýzy je nižšie, ak sa použije mäkkšie a tým aj lacnejšie brusivo ako je kremíkový piesok, než pri použití tvrdšieho a drahšieho granátu alebo oxidu hliníka;

- výber materiálu brusiva má vplyv na životné prostredie, technicky a ekonomicky vhodné materiály nie sú vždy priaznivé pre svoje okolie. Brusivá je potrebné voliť s ohľadom na bezpečnostné požiadavky a zdravotné požiadavky nezávadnosti brusív.
- recyklácia brusív, čo je požiadavka pre ekonomickú a environmentálnu výrobu, vyžaduje orientáciu na voľbu zvláštnych druhov brusných častíc, pri ktorých sa minimalizuje lom častice, klasické druhy brusív ako granát a kremičitý piesok sa v procese menia na prášok a sú nevhodné na recykláciu [6], na druhej strane oceľová drvina, oceľové broky ako alternatívne abrazívne materiály svojimi magnetickými vlastnosťami predurčujú aj spôsob separácie v prípade opracovania nekovových materiálov napr. betónu [6];

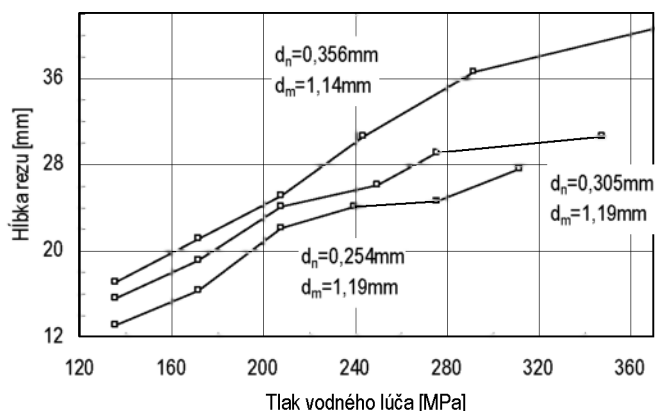
Veľkosť použitého brusiva určovaná jeho zrnitosťou (zrnitosť uvádzaná podľa ISO 525–75) je ovplyvnená vlastnosťami obrábaného materiálu a so stúpajúcou intenzitou toku brusiva zrnitosť mení hĺbku rezu. Závislosť účinku zrnitosti brusiva na hĺbke rezu dokumentuje obr.3.61 podľa [7]. Stredná veľkosť zrna (zrnitosť 60 podľa ISO) je oveľa účinnejšia pri delení ocele ako jemné zrná (zrnitosť 100 a 150) alebo hrubšie zrná (zrnitosť 36 a 16). *Hashish* podal kvantitatívne vysvetlenie pre tento jav svojím modelom erózie častíc.

Okrem vyššie uvedených parametrov (uhol dopadu lúča, vlastnosti materiálu obrobku atď.) na hĺbku rezu majú vplyv aj prevádzkové parametre procesu. Obr.3.62 znázorňuje účinok tlaku vody a priemeru lúča určeného veľkosťou priemeru štrbiny dýzy na hĺbku rezu [4]. Ako stúpa rýchlosť výtoku vody pre dané množstvo brusiva, intenzita zvyšovania hĺbky rezu klesá.



Obr. 3.61 Účinnosť veľkosti zrna brusiva na hĺbku rezu (zdroj *Hashish* [7])

Parametre rezania:
 $u=3,39\text{ mm/s}$, $d_n=0,457\text{ mm}$,
 $p=221\text{ MPa}$,
 brusivo: granát,
 obrobok: nehrdzavejúca oceľ
 AISI 304 (DINX5CrNi189)



Obr. 3.62 Účinnosť tlaku vody a priemeru lúča na hĺbku rezu (zdroj *Hashish* [7])

d_m – priemer zmiešavacej trubice
 d_n – priemer štrbiny dýzy (priemer lúča)
 Parametre rezania:
 $m_a=4,5\text{ g/s}$, $u=2,5\text{ mm/s}$
 granát, zrnitosť 80
 obrobok: hliník 6061–T6

Zvyšovanie tlaku vody nad určitý limit má nepriaznivé účinky na ekonomickú účinnosť rezania, vznikajú vyššie tlakové straty, vzniká vyšší hluk, čo nepriaznivo ovplyvňuje prostredie, vznikajú vyššie náklady na filtráciu a úpravu vody [4, 6, 18, 28].

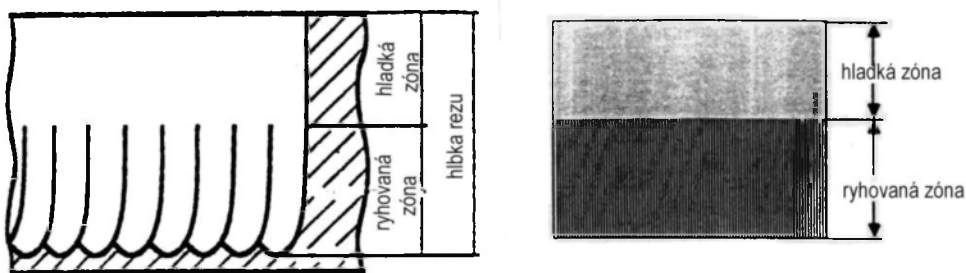
3.3.3 Vlastnosti opracovaného povrchu

Technológia abrazívneho vodného lúča dovoľuje rezať a deliť prakticky všetky konštrukčné materiály. Z hľadiska technológie rezania a jej vplyvu na opracovaný materiál je WJM a AWJ proces charakterizovaný kvalitatívnymi prednosťami ako [4, 18, 22]:

- studený rez, bez viditeľnej tepelne ovplyvnenej zóny, ktorý umožňuje rezať materiály s nedostatočným odvodom tepla ako sú plasty, sendvičové kompozitné materiály, materiály citlivé na oxidáciu ako titán, nikel, kobalt a ich zliatiny;
- proces je bezprašný a pri rezaní sa neuvoľňujú žiadne plyny ani iné látky z materiálu, ako napr. pri klasickej rezaní materiálov ako je azbest, sklotextil, sklo, ktoré uvoľňujú karcinogénne, jedovaté a prašné látky;
- nie sú pozorované tepelné zmeny v štruktúre materiálu, na reznej ploche sa nevyskytujú trhlinky;
- dobrá kvalita rezu, skoro bez straty materiálu v reze a odpadu, šírka reznej medzery 0,1 až 0,3 mm, čo je výhodné pre drahé materiály;
- rezná hrana bez otrepuv.

Topografia povrchu po rezaní AWJ lúčom je málo preskúmaná oblasť [10]. Ako všetky vysokoenergetické lúčové technológie aj AWJ lúč zanecháva viditeľné ryhovanie na obrobenej ploche. Toto výrazne ovplyvňuje rozmerovú presnosť obrobkov a kvalitu dokončeného povrchu.

Podľa doterajších poznatkov, povrch po rezaní pozostáva z dvoch rôznych oblastí: z hladkej zóny a z drsnej, ryhovanej zóny, ktorá začína v určitej hĺbke pod povrchom, obr.3.63 [4, 10, 11, 18, 24].



Obr.3.63 Dve zóny vznikajúce po rezaní AWJ lúčom

Ako je známe z teórie rezania abrazívnym vodným lúčom, ktorú podrobne popísal *Hashish* [3, 7, 10], keď lúč preniká do materiálu, stráca postupne svoju kinetickú energiu a vychýľuje sa, tým tvorí dve typické zóny, ktoré menia aj textúru povrchu na dve zreteľné oblasti pozdĺž steny rezu. Relatívne hladká oblasť, v hornej časti rezu, je výsledkom zóny rezného opotrebenia a druhá

ryhovaná oblasť v spodnej časti rezu vzniká ako dôsledok deformačného opotrebenia pri rezaní AWJ lúčom.

Z uvedeného vyplýva, že parametre, ktoré vplyvajú na úber materiálu, ovplyvňujú zároveň kvalitu rezu a to:

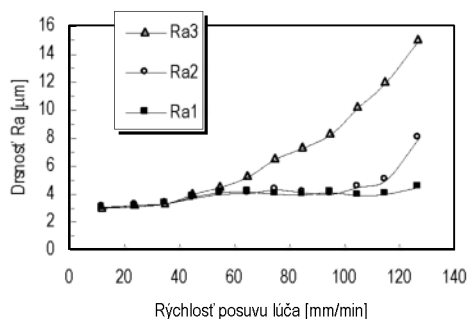
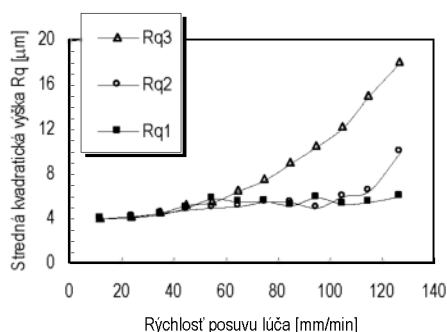
- priemer dýzy,
- tlak vody,
- rýchlosť prúdenia,
- vzdialenosť – *stand off*
- uhol sklonu lúča,
- aditíva vo vode,
- druh abraziva.

Väčšina výskumných prác [11, 13, 24] kvalifikuje stav povrchu cez parametre drsnosti v závislosti na rezných parametroch. Podľa týchto poznatkov sa drsnosť povrchu mení lineárne so zvyšovaním hĺbky rezu v oblasti hladkej zóny.

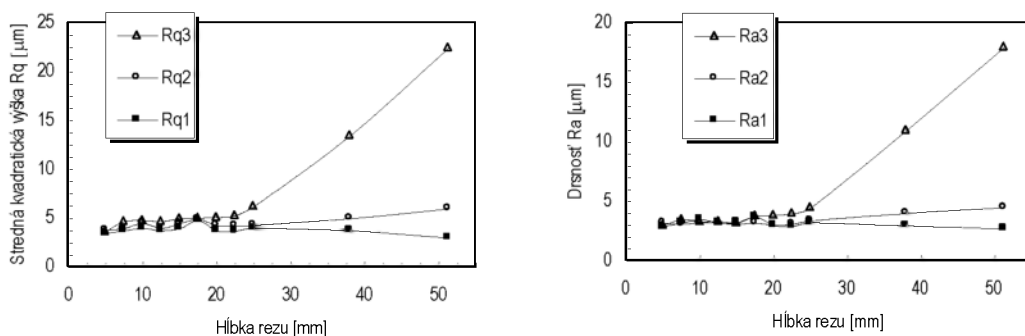
Podľa autorov *Chao, Zhou, Leu a Geskin* [11], hladká oblasť je charakterizovaná ako homogénna s náhodným profilom a s mierne izotropnou textúrou. Parametre drsnosti Ra a Rq vykazujú iba slabú závislosť na rezných rýchlostiach a sú takmer nezávislé na hĺbke rezu pre hladkú zónu. Pre oblasť ryhovanej zóny však charakteristiky drsnosti Ra a Rq prudko stúpajú s nárastom hĺbky rezu a rýchlosti posuvu lúča. Grafické znázornenie týchto zmien je na obr.3.64 a 3.65, kde hodnoty $Ra3$ a $Rq3$ predstavujú drsnosť zaznamenanú v zóne deformačného opotrebenia.

Z poznatkov vyplýva, že do určitej hĺbky rezu je opracovaný povrch hladký s nevýrazným ryhovaním resp. vlnitosťou, kým pod touto hĺbkou je ryhovanie povrchu výrazné a zóna rezu sa viditeľne delí na dve časti, hladkú a ryhovanú.

Podľa obr.3.66 účinok zrnitosti brusiva na drsnosť povrchu má lineárny priebeh, čo sa vysvetľuje mechanizmom tvorenia povrchu pri náraze abrazívnej častice [11]. Podobný mierne rastúci lineárny priebeh uvádza aj *Hashish* [7] pre rôznu zrnitosť brusiva., kde lúč, ktorý obsahuje hrubšie zrno (zrnitosť 60 podľa ISO) reže rýchlejšie, ale dosahovaná drsnosť Ra je horšia, obr.3.67.



Obr.3.64 Závislosť drsnosti povrchu na zmene rýchlosti posuvu lúča $Ra1$ a $Rq1$ pre hornú časť rezu $Ra2$ a $Rq2$ pre stred reznú plochu a $Ra3$ a $Rq3$ pre spodnú časť rezu (zdroj: *Chao et al.[11]*)
Podmienky rezania: tlak vody 317,4MPa, rezaná hrúbka 12,7mm, priemer dýzy 0,286mm, zrnitosť brusiva 80 granát, rýchlosť toku brusiva 199,5g/min, vzdialenosť stand off 1,5mm



Obr.3.65 Drsnosti povrchu v závislosti na hĺbke rezu (zdroj: Chao et al.[11])

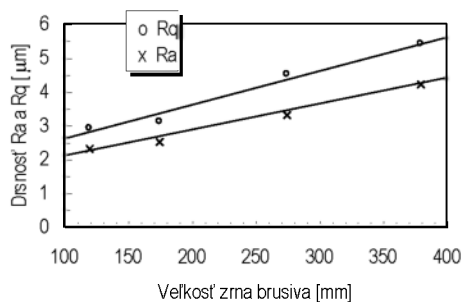
Význam hodnôt Ra a Rq je rovnaký ako na obr.3.64.

Podmienky rezania: tlak vody 317,4MPa, rýchlosť posuvu lúča 20,3mm/min, priemer zafirovej dýzy 0,286mm, zrnitosť brusiva 80 granát, rýchlosť toku brusiva 199,5g/min, vzdialenosť stand off 1,5mm

Podľa toho sa pre jemné opracovanie povrchu (pre jemné rezy) doporučuje malá zrnitosť, od 150 vyššie podľa ISO. Avšak lúč s malými časticami brusiva reže pomalšie, lebo stráca rýchlejšie svoju kinetickú energiu pri výtoku z dýzy, čo môže mať za následok zvýšenie vlnitosti rezaného povrchu a zníženie intenzity rezania.

Lineárny priebeh drsnosti povrchu je aj pri zmene tlaku vodného lúča, ako jedného z prevádzkových charakteristík procesu, obr.3.68. Zvyšovaním tlaku vody sa znižuje vlnitosť povrchu, ktorá je typická pre rezanie vodným lúčom. Vyššie tlaky vody vytvárajú hladšie povrchy a zároveň urýchľujú úber materiálu aj v oblasti deformačného opotrebenia [2, 7]

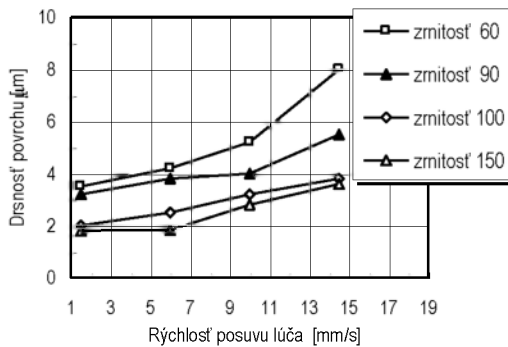
Vplyv rýchlosti prúdenia je v oblasti rezného opotrebenia nelineárna. So zvyšovaním rýchlosti prúdenia sa drsnosť Ra mierne znižuje. Svoju úlohu pri hodnotení akosti povrchu a jeho vlastností majú vibrácie lúča, ktoré sú výsledkom vzniku vibrácií v mechanických prvkoch, ktoré riadia pohyb lúča v AWJ rezacom systéme [8, 9]. Kovacevic [12] použil monitorovanie priebehu normálovej sily ako vhodný parameter pre sledovanie stavu povrchu v procese rezania AWJ.



Obr.3.66 Zmena charakteristík drsnosti povrchu v závislosti na veľkosti zrna brusiva (zdroj: Chao et al.[11])

WJM a AWJ procesy sa považujú za procesy studené, bez tepelného ovplyvňovania zóny rezu [17, 19, 21]. Toto tvrdenie je založené na poznaní, že pre väčšinu kovových a keramických materiálov zvýšenie teploty o niekoľko stupňov oproti teplote okolia alebo teplote ľudského tela nepredstavuje výrazné ovplyvnenie štruktúry a vlastností. Na druhej strane však, pozorovanie

iskier a odparovanie vody v zóne rezania, upozorňuje na prítomnosť zvýšenej teploty v bezprostrednej blízkosti lúča a identifikuje to lokálnu tepelne ovplyvnenú zónu pre určité druhy materiálov.



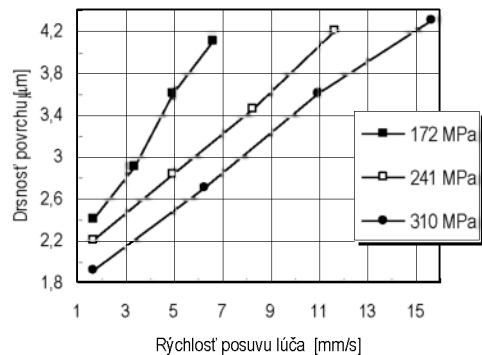
Obr. 3.67 Vplyv veľkosti častice brusiva na drsnosť povrchu. (zdroj Hashish [7])

Podmienky rezaia:

$m_a = 7,6 \text{ g/s}$; $d_n = 0,330 \text{ mm}$

$d_m = 1,17 \text{ mm}$; $p = 311 \text{ MPa}$

granát, obrobok: Inconel 718



Obr. 3.68 Drsnosť povrchu v závislosti od zmeny tlaku (zdroj Hashish [7])

Podmienky rezaia:

$m_a = 4,5 \text{ g/s}$; $d_n = 0,229 \text{ mm}$

$d_m = 0,762 \text{ mm}$; $l_m = 51 \text{ mm}$

granát zrnitosť 100, obrobok: Inconel 718

Tento tepelný účinok môže byť kritický pri rezaní mäkkých, tepelne citlivých materiálov ako polykarbonátové plasty, sklo, niektoré kompozitné materiály a biomateriály, pri ktorých zvýšenie teploty o niekoľko stupňov môže spôsobiť štrukturálne deformácie a tvorenie trhlín [13].

Okrem uvedených zistení, aj pre materiál samotnej dýzy zvýšenie teploty predstavuje nárast erozívneho opotrebenia a zvýšenie turbulencie zmiešavanej zmesi.

Vznik teploty v zóne rezania sa vysvetľuje nasledovne: AWJ rezanie je proces erozívneho mikrorezania a úber materiálu je vo forme triesok s mikroskopickým prierezom. V zóne rezania vzniká lokálna deformácia. Práca vynaložená na lokálny úber materiálu sa mení na tepelnú energiu, časť ktorej prechádza do obrobku a zostávajúca časť je odvádzaná abrazívnym vodným lúčom. Percentuálny podiel tepla odovzdaného obrobku nebol doposiaľ kvantifikovaný.

Ohadi et al. [20] poukázal na to, že zvýšenie teploty povrchu materiálu na konci rezania je asi o 20°C oproti teplote okolia. Uvedené nevýrazné zvýšenie je podkladom pre kategorizáciu AWJ rezania ako studeného rezania, bez tepelného ovplyvnenia povrchu. V porovnaní s inými vysokoenergetickými lúčovými metódami ako laser však takéto zvýšenie teploty rezania je naozaj bez významu.

3.3.4 Oblasti využívania vodného a abrazívneho vodného lúča

Vysokotlakový vodný a abrazívny vodný lúč nachádzajú stále širšie použitie v rôznych priemyselných odvetviach, od delenia plochých ale aj tvarových materiálov ako sklo, hliník, ocele, liatiny, titán, kompozitné a keramické materiály, až po využívanie vodného lúča ako rezného nástroja pre operácie sústruženia, frézovania, vŕtania a rezania závitov.

Skoro neobmedzené možnosti využitia WJM a AWJ metód ilustruje nasledujúci prehľad:

- chemický priemysel – delenie výbušných látok (dynamit, tuhé palivá do raketových motorov);
- potravinársky priemysel – delenie ovocia a zeleniny v surovom a zmrazenom stave (mäso, torty, čokoláda, syr a iné);
- elektrotechnický a elektronický – rezanie a delenie feritov, keramiky, skla, amorfných látok, permanentných magnetov, plošných spojov, dosiek plošných spojov, obr. 3.69;
- strojársky priemysel – delenie titánu, wolfrámu, tantalu, uránu, extrémne tvrdých a ťažko–obrábateľných materiálov, kompozitov, skiel, izolačných materiálov, výroba tvarovo zložitých súčiastok, lopatiek a dielov tryskových a raketových motorov, turbín a kompresorov, rezanie vlákňitých materiálov, široké uplatnenie v kozmickom, leteckom a lodiarskom odvetví;
- stavebný priemysel – delenie plastov ako polyuretán, polystyrén, čadičová vata, azbest, plastbetón, keramika, dlaždice;
- gumársky priemysel – rezanie gumy, plastov, vlákien KEVLAR;
- papierenský priemysel – papier, fólie, buničina (bezprašné pracoviská, bez nebezpečia elektrostatických výbojov);
- obuvnícky a galanterský – rezanie pravej a umelej kože, plastické hmoty;
- sklársky priemysel – rezanie, matovanie a delenie skla všetkých druhov až do hrúbky cca 200 mm, tvarové rezy, vŕtanie do skla;
- jadrový priemysel – dekontaminácia a odstraňovanie ochranných železobetónových vrstiev v zariadeniach pre jadrové elektrárne, čistenie a odstraňovanie usadenín.

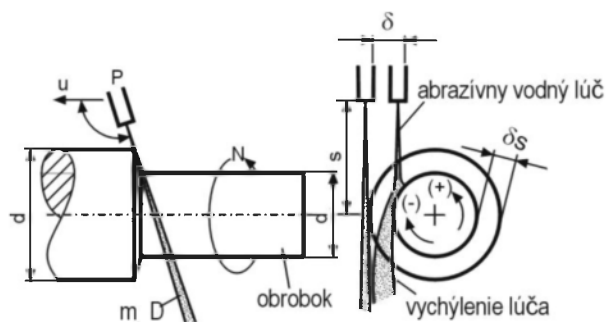


Obr.3.69 Príklad rezania dosky plošného spoja AWJ lúčom
(podľa [1, 19, 26])

3.3.4.1 Abrázivný vodný lúč pre operácie obrábania

Ako už bolo spomenuté, okrem tradičného delenia materiálov abrazívnym lúčom sa v poslednom čase vyvíja a začína používať AWJ lúč pre operácie obrábania ako je sústruženie, frézovanie, vŕtanie a rezanie závitov predovšetkým pre ťažkoobrábateľné materiály.

Pri sústružení obrobok rotuje a AWJ lúč sa posúva v smere osi obrobku. Úber materiálu je zabezpečený radiálnym posuvom lúča do požadovanej hĺbky rezu. Obr. 3.70 ukazuje základnú schému sústruženia AWJ lúčom, ako to uvádza *Momber* [14, 18].



Obr.3.70 Sústruženie abrazívnym vodným lúčom (zdroj [18])

Vŕtanie ťažkoobrobiteľných materiálov ako keramika, sklo, niklové zliatiny používané pre plynové turbíny, sa využitím AWJ lúča dostáva do popredia záujmu ako perspektívna technológia. V súčasnosti je vyvinutých niekoľko spôsobov vŕtania otvorov charakterizovaných vzájomným pohybom lúča a obrobku. Najčastejšie sa používa vŕtanie so stacionárnym lúčom a obrobkom, vŕtanie rotujúcim lúčom alebo vibrujúcim lúčom so stacionárnym obrobkom tzv. vyrezávaním stredu otvoru (tiež trepanácia) [13, 18]. Obr.3.71 znázorňuje niektoré metódy vŕtania.

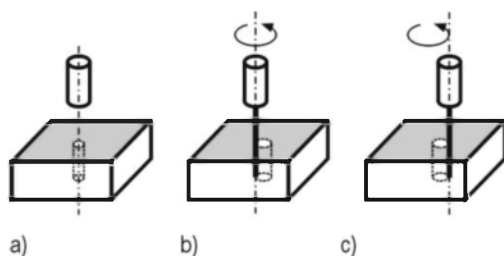
Pre obrábanie AWJ lúčom sa používa tvar dýzy podľa obr.3.73, ktorá produkuje vysoko rýchlostný koherentný abrazívny vodný lúč s typickou rýchlosťou okolo 300 až 600 m/s a prietokom brúsnej zmesi 10 g/s.

Frézovanie pomocou AWJ lúča sa využíva pre tvarovo zložitú obrobku, ako je to znázornené na obr. 3.72.. Pri frézovaní sa jedná o rezanie, ale nie delenie materiálu. Rezný cyklus frézovania znázorňuje obr. 3.74, so zreteľne viditeľnými reznými stupňami. Frézovanie AWJ lúčom je proces, pri ktorom lúč viackrát prechádza po obrábanej ploche a postupne tvorí tvar blízky konečnému tvaru (*near-net shape*).

Vhodnú aplikáciu nachádza AWJ frézovanie pri výrobe tvárniacich nástrojov.

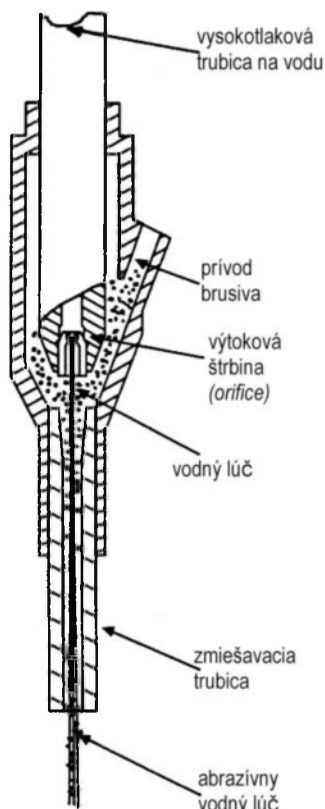
Ukazovateľmi efektívnosti procesu pri obrábaní abrazívnym vodným lúčom (či už je to sústruženie, vŕtanie alebo frézovanie) je úber materiálu a topografia povrchu, ktoré sú ovplyvňované posuvom lúča a vzdialenosťou medzi obrobkom a lúčom (*stand off*).

Obr.3.75 ukazuje zmenu tvaru výrezu v závislosti na posuve a vzdialenosti medzi obrobkom a dýzou (*stand off*), úber materiálu klesá so zvyšovaním vzdialenosti. Zvyšovanie rýchlosti posuvu lúča redukuje úber materiálu a hĺbku rezu.

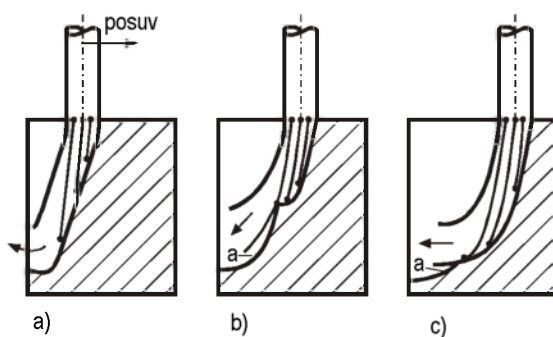


Obr.3.71 Spôsoby vŕtania pomocou AWJ (zdroj: Momber [18])

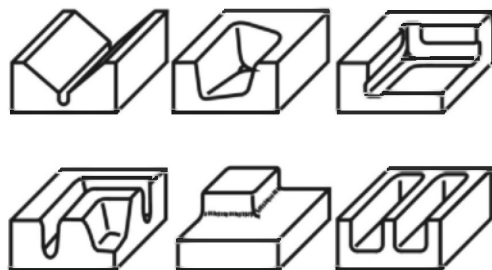
a) prevŕtávanie b) vyrezávanie c) frézovanie otvorov



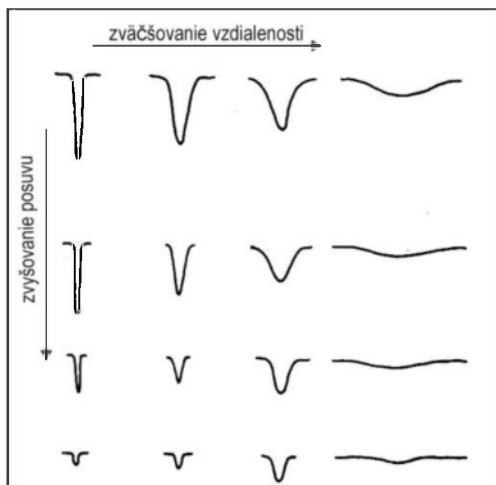
Obr.3.73 Koncept dýzy pre obrábanie AWJ lúčom (zdroj: Hashish [5])



Obr.3.74 Rezný cyklus pri frézovaní abrazívnym vodným lúčom (zdroj: Momber [18])
 a) začiatok tvorenia stopy rezu;
 b) stabilizovaná stopa rezu s viditeľnými stupňami posuvu lúča
 c) pokračujúci posuv lúča a vyrovnanie stupňovitosti rezu



Obr.3.72 Príklady frézovania rôznych geometrických tvarov AWJ lúčom (zdroj: Momber [18])



Obr.3.75 Ilustrácia závislosti tvaru výrezu na zmene vzdialenosti medzi obrobkom a dýzou, vodorovný smer, v závislosti na zvyšovaní rýchlosti posuvu lúča, zvislý smer (zdroj: Hashish [5])

Pre ekonomické a efektívne využitie AWJ lúča pri sústružení, frézovaní a vŕtaní je potrebné vhodne určiť technologické parametre. *Ansari a Hashish* [1, 5, 7] delia tieto parametre pre optimalizáciu procesu na:

- nezávislé, ktoré sa ďalej rozdeľujú na:
 - primárne parametre – charakterizujúce samotný AWJ proces :
 - hydraulické parametre, ktoré určujú hydraulický výkon AWJ – tlak vody (p), výtokový koeficient (C_d), priemer štrbiny (d_n), a rýchlosť prúdenia (u);
 - abrazívne parametre určujúce vlastnosti brusiva závislé na vlastnostiach obrábaného materiálu ako tvrdosť, modul pružnosti, pevnosť, hustota, veľkosť abrazívnych častíc, materiál abraziva, stav abraziva (suché, suspenzia), rýchlosť prúdenia abraziva (m_a); abrazívne parametre sa môžu voliť nezávisle na hydraulických parametroch;
 - zmiešavacie parametre – priemer zmiešavacej trubice (d_m), dĺžka zmiešavacej trubice (l_m)
 - sekundárne parametre – týkajú sa priamo procesu rezania sústružením, vŕtaním
 - posuv lúča
 - počet prechodov lúča
 - vzdialenosť – *stand off* (s)
 - rýchlosť rotácie – pri sústružení
 - vedľajší prídavok posuvu pri frézovaní
- závislé, ktoré sú dané výsledkami obrábania a sú spoločné pre všetky operácie:
 - kvantitatívne parametre – VRR (*volume removal rate*) – objemový úber materiálu, topografia povrchu
 - kvalitatívne parametre – tepelne ovplyvnená zóna, spevnenie povrchu, tieto parametre sú pre AWJ obrábanie kovových materiálov nevýznamné

Vplyv hydraulických a abrazívnych parametrov na úber materiálu a akosť opracovaného povrchu je uvedený v kapitolách 3.2.2 a 3.2.3.

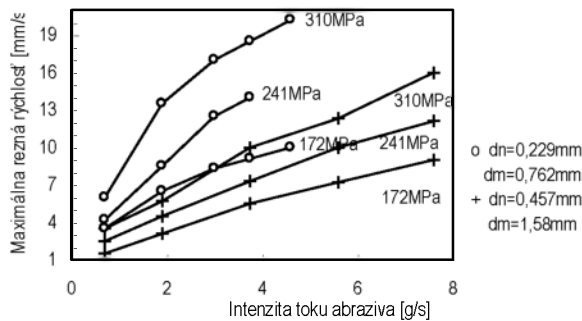
Pri obrábaní AWJ lúčom je potrebné venovať pozornosť predovšetkým opotrebeniu zmiešavacej trubice. Priemer zmiešavacej trubice d_m a priemer štrbiny d_n vo veľkej miere ovplyvňujú maximálnu reznú rýchlosť a zároveň majú vplyv na účinnosť procesu. Rýchlosť rezania je okrem toho ovplyvnená aj tlakom abrazívnej zmesi ako to ilustruje graf na obr.3.76.

Zvyšovaním hydraulického tlaku zmesi sa zvyšuje aj opotrebenie zmiešavacej trubice. Opotrebenie je určované zmenou výsledného priemeru výstupu lúča z trubice, obr. 3.77.

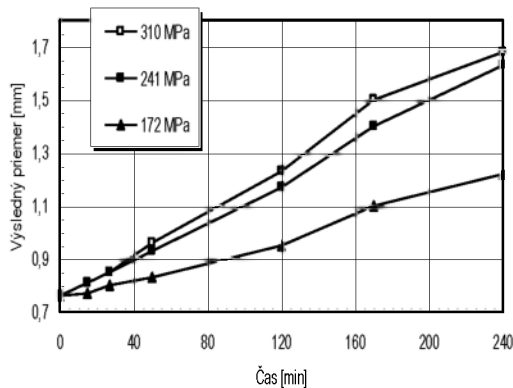
Náklady spojené s opotrebením zmiešavacej trubice majú výrazný vplyv na prevádzkovanie AWJ rezacieho systému, najmä z hľadiska údržby. *Labus* [15] uvádza priemerné prevádzkové náklady, vrátane nákladov na údržbu pre AWJ proces, v rozsahu 9,98 až 29,9 USD/hodinu, kým pre čistý vodný lúč sú tieto náklady asi 10 násobne menšie okolo 0,90 až 2,74 USD/ hodinu.

Prevádzkové náklady pri AWJ sú ovplyvnené:

- druhom a množstvom brusiva
- životnosťou dýzy a zmiešavacej trubice.



Obr.3.76 Účinnosť tlaku lúča na reznú rýchlosť pre rozdielne tlaky lúča pri obrábaní Inconelu (zdroj: Hashish [9])



Obr.3.77 Účinnosť tlaku abrazívnej zmesi na opotrebenie zmiešavacej trubice pri obrábaní Inconelu (zdroj: Hashish [9])

Podmienky rezania:
 $m_a = 3,78 \text{ g/s}$; $d_h = 0,299 \text{ mm}$;
 brusivo : granát; zrnitosť 100;
 materiál trubice WC/C2

Minimalizácia množstva spotrebovaného brusiva a zvýšenie životnosti zmiešavacej trubice má podstatný význam pre ekonomickú účinnosť procesu.

Významnosť účinku prevádzkových charakteristík zariadenia na parametre AWJ procesu uvádza tab. 3.10. Relatívna významnosť AWJ parametrov na výsledky obrábania je kvalitatívne zhodnotená v tab 3.11 podľa údajov [7].

Kvalitatívnym ukazovateľom účinnosti AWJ obrábania je, ako u väčšiny progresívnych technológií, intenzita objemového úberu materiálu (*volume removal rate – VRR*), ktorá je závislá:

- na tlaku vodného lúča,
- rýchlosti prúdenia abrazívneho lúča.

VRR sa mení približne lineárne v pracovnom rozsahu tlaku vodného lúča a rýchlosti prúdenia abraziva, pre konštantné podmienky lúča existuje optimálna hodnota rýchlosti prúdenia abraziva a zvýšenie rýchlosti neovplyvňuje zvýšenie úberu.

Tab.3.10 Hodnotenie vplyvu prevádzkových charakteristík zariadenia na parametre AWJ [7]

Prevádzkové charakteristiky	AWJ parametre						
	Tlak vodného lúča p	Priemer štrbiny d _n	Dĺžka zmiešavacej trubice l _m	Priemer zmiešavacej trubice d _m	Rýchlosť prúdenia abrazíva m _a	Priemer častice abrazíva d _p	Materiál abrazíva
Hydraulická účinnosť	●	●●	○	○	○	○	○
Výtokový koeficient	●	●●	○	○	○	○	○
Rozptyl vodného lúča	●	●●	○	○	○	○	○
AWJ koherencia	○	○	●	○	●	○	○
Fragmentácia častíc	●●	●	●	●	●	●	●●●
Opotrebenie zmiešavacej trubice	●	●●	●	●●	●●	●●	●●●
Cena zariadenia	●●	●	○	○	○	○	○
Enviromentálne faktory	●	●	○	○	○	○	●●
Komponenty pre vysoký tlak	●●	●	○	○	○	○	○
Konštrukcia a montáž dýzy	●	●●	○	○	●	●	○
Pracovná spoľahlivosť	●●	●	○	○	○	●	○
Účinnosť zmiešavania	●	●●	●	●●	●●	●	○

○ – nevýznamný; ● – málo významný ●● – významný; ●●● – veľmi významný

Tab.3.11 Významnosť AWJ parametrov na výsledky obrábania [7]

Výsledky obrábania	AWJ parametre						
	Tlak vodného lúča p	Priemer štrbiny d _n	Dĺžka zmiešavacej trubice l _m	Priemer zmiešavacej trubice d _m	Rýchlosť prúdenia abrazíva m _a	Priemer častice abrazíva d _p	Materiál
Objemový úber materiálu	●●●	●●●	●	●●	●●●	●●	●●
Hĺbka rezu	●●●	●●●	○	●●	●●●	●●	●●
Šírka zárezu	●	○	○	●●●	●	○	○
Vlnitosť povrchu	●●	●●	●	●	●●	●	●
Drsnosť povrchu	●●	●●	○	○	●	●●●	●●
Prevádzkové náklady na rezanie	●	●	●	●	●●	○	○

○ – nevýznamný; ● – málo významný ●● – významný, ●●● – veľmi významný

3.3.5 Prednosti technológie vodného lúča a perspektívy využitia

Prednosti technológie vodného a abrazívneho vodného lúča v porovnaní s ostatnými netradičnými technológiami, ktoré predurčujú rozsah jeho použitia, sa môže zhrnúť nasledovne [17, 21, 22]:

- energetická účinnosť cca 80% (8 x viac ako laser),
- relatívne studený rez, ktorý umožňuje rezat' materiály citlivé na teplotu,
- rezné hrany nevykazujú tepelnú a mechanickú deformáciu,
- v reze nevznikajú zvyškové napätia a mikrotrhliny,

- vlastný proces rezania je bezprašný a nevznikajú pri ňom žiadne plyny a pary, ako napr. pri mechanickom spôsobe rezania,
- malé straty materiálu v reze, ktoré sú výsledkom priemeru ústia výtokovej štrbiny v dýze – vodný lúč 0,1 – 0,25 mm, abrazívny lúč 0,8 – 2 mm,
- jedným vysokotlakovým čerpadlom je možné napájať až 70 súčasne pracujúcich dýz vodného lúča alebo 8 dýz abrazívneho lúča,
- životnosť kvapalinových dýz je cca 100 hod., životnosť abrazívnych dýz je cca 50 hodín,
- možnosť rezania aj pod hladinou vody,
- rezať je možné bez obmedzenia vo všetkých smeroch, obrysoch, tvaroch a úkosoch,
- mimoriadna prevádzková spoľahlivosť a jednoduchosť obsluhy,
- zmenou tlaku je možné v priebehu niekoľkých sekúnd materiál oplachovať, otryskávať, čistiť a rezať,
- možnosť rezať vlnité materiály, malá citlivosť na vzdialenosť dýzy od materiálu (napr. rezanie a delenie strešných krytín)
- rezanie problémových materiálov, ako sú sietované materiály, vata a iné,
- vysoká flexibilita dokonca aj pri zložitej geometrii výrezu (výstrižku),
- vŕtanie aj rezanie jedným nástrojom,
- hospodárnosť odpadu materiálu cez úzku štrbinu rezu,
- presné leštenie a čistenie povrchov ťažkoobrobiteľných materiálov, ako napr. keramika,
- ideálne pre automatizáciu riadenia pohybu lúča,
- nie je potrebné pevné upínanie obrobkov.

Ďalšie porovnanie technológie abrazívneho vodného lúča s ostatnými netradičnými technológiami, ktoré podáva *Hashish* [5], je uvedené v tab.3.12. Sú porovnávané hodnoty intenzity objemového úberu materiálu, dosahovanej kvality povrchu vyjadrenej cez drsnosť *Ra* a popisne uvádzané základné požiadavky na výkon zariadenia. Porovnanie vychádza z predpokladu, že sa obrába trojrozmerná drážka (rozmery nešpecifikované).

Technologické možnosti opracovania vodným a abrazívnym vodným lúčom zďaleka nie sú preskúmané a využité. Množstvo publikovaných prác poukazuje na perspektívy predovšetkým AWJ lúča ako technológie pre XXI. storočie.

Základná vedecko–výskumná orientácia v poslednej dekáde XX. storočia bola v oblasti AWJM orientovaná na:

- popis mechanizmu úberu, mechanizmu opotrebenia a erózie, identifikáciu energetických strát a charakter vznikajúceho povrchu (*Hashish, Kovacevic, Ansari*)
- prevádzku systémov pre vŕtanie, sústruženie, rezanie závitov a 3D obrábanie (*Hashish, Labus, Chung, Geskin, Momber*)
- sledovanie, monitorovanie a riadenie procesu (*Kovacevic, Mohan, Zang*)
- vývoj nových aplikácií pre širšie využitie technológie so zameraním na tzv. kryogénne technológie alebo obrábanie prúdom ľadových kryštálikov (IJM *Ice Jet Machining*) [13].

Opracovanie prúdom zmesi ľadových kryštálikov a vody (z angl. skratka **IJM**) je technológia vyvinutá v Institute of Technology New Jersey – USA, kde sa namiesto jemného brusiva rozptýleného vo vode, použili častice ľadu. Účinnosť procesu rezania IJM lúčom je nižšia ako AWJ, keďže tvrdosť ľadových častíc je oveľa menšia ako brusných častíc.

Na druhej strane prednosti technológie sú predstavené na báze:

- zníženia nákladov na proces (náklady na brusivo predstavujú pri AWJ percentuálne najvyššiu položku)
- ochrany životného prostredia (eliminácia hluku a kontaminácie produktov a odpadu).

Tieto prednosti predurčujú technológiu IJM pre zvýšené uplatnenie v potravinárskom priemysle a elektronike.

Doterajšie poznatky ukazujú, že technológia vodného lúča, ale predovšetkým technológia abrazívneho vodného lúča predstavuje v priemyselnej výrobe vysoko flexibilné prostredie.

Tab.3.12 Porovnanie technológie abrazívneho vodného lúča (AWJ) a ostatných netradičných metód obrábanie podľa typických charakteristík procesov ako je intenzita úberu materiálu a kvalita povrchu (spracované podľa [5])

PROCES	INTENZITA ÚBERU MATERIÁLU (VRR)	POŽIADAVKY NA VÝKON	DOSAHOVANÁ DRSNOSŤ PОВRCHU Ra [μm]
ECM elektrochemické obrábanie	33 mm ³ /s na 1000A (pre ocele)	jednosmerné napätie do 30 V prúd do 10 000A	0,4÷6,3
CHM chemické obrábanie	okolo 0,30 mm ³ /s pre ocele v závislosti od plochy	<i>bez údajov</i>	<i>bez údajov</i>
EDM elektroiskrové obrábanie	okolo 7 mm ³ /s	prúd do 20A, napätie do 400V	3÷12
LBM obrábanie laserom	<i>nejednotné údaje bez údajov</i>	4000V, 3000 J za ms	0,8÷6,3
PAM obrábanie plazmou	okolo 1000 mm ³ /s	200kW	<i>bez údajov</i>
EBM obrábanie elektrónovým lúčom	do 5 mm ³ /s	130V, 5000mA	0,8÷6,3
AJM obrábanie prúdom abraziva	do 1 mm ³ /s	typický výkon 2 ÷5 kW	<i>bez údajov</i>
USM obrábanie ultrazvukom	4 ÷ 60 mm ³ /s	<i>bez údajov</i>	0,3÷0,8
AWJ obrábanie vodným lúčom	50÷ 200 mm ³ /s	10÷50kW	1÷10

Literatúra ku kapitole 3.3:

1. Ansari, A. I.; Hashish, M.: Effect of Abrasive Waterjet parameters on Volume Removal Trends in Turning, *ASME J. of Engineering for Industry*, Vol 117, Nov. (1995) pp. 475–484
2. ASM– Metals Handbook– Machining, Vol. 6, ASM International, March, (1997), 9.ed.
3. Bhushan, B.; Gupta, B.K.: Handbook of Tribology (part 2.2 Wear). McGraw–Hill, Inc. New York 1991, 1.ed.
4. Dadvandipour, S.: Water Jet Cutting, Interné materiály Bay–Zoltán Foundation for Applied Research, Miskolc– Egyetemváros, 1996

5. Hashish, M.: An Investigation of Milling with Abrasive –Waterjet, *ASME J. of Engineering for Industry*, Vol 111, May. (1989) pp. 158–166
6. Hashish, M.; Echert, D.C.: Abrasive Waterjet Deep Kerfing and Waterjet Surface Cleaning for Nuclear Facilities, *ASME J. of Engineering for Industry*, Vol 111, Aug. (1998) pp. 269–281
7. Hashish, M.: Optimisation Factors in Abrasive Waterjet Machining, *ASME J. of Engineering for Industry*, Vol 113, Feb. (1991) pp. 29–37
8. Hashish, M.: The Effect of Beam Angle in Abrasive–Waterjet Machining, *ASME J. of Engineering for Industry*, Vol 115, Aug. (1993) pp. 51–56
9. Hashish, M.: Comparative Evaluation of Abrasive Liquid Jet Machining Systems, *ASME J. of Engineering for Industry*, Vol 115, Feb. (1993) pp. 44–50
10. Hashish, M.: Material properties in Abrasive Waterjet Machining, *ASME J. of Engineering for Industry*, Vol 117, Nov. (1995) pp. 5578– 583
11. Chao, J.; Zhou, G.; Leu, M.C.; Geskin, E.: Characteristics of Abrasive Waterjet Generated Surfaces and Effects of Cutting parameters and Structure Vibration. *ASME J. of Engineering for Industry*, Vol 117, Nov. (1995) pp. 516–525
12. Kovacevic, R.; Mohan, R.; Zhang, Y. M.: Cutting Force Dynamics as a Tool for Surface profile Monitoring in AWJ *ASME J. of Engineering for Industry*, Vol 117, Aug. (1995) pp. 340 –350
13. Kovacevic, R.; Hashish, M.; Mohan, R.; Ramulu, M.; Kim, T. J.; Geskin, E. S.: State of the Art of Research and Development in Abrasive Waterjet Machining *ASME J. of Manufacturing Science and Engineering*, Vol 119, Nov. (1997) pp. 776 –784
14. Krajný, Z.: Vodný lúč v praxi – WJM, epos, ISBN 80–8057–091–4 Bratislava, 1998
15. Labus, T.J.; Neusen, K.F.; Alberts, G.D.; Gores, T.J.: Factors Influencing the Particle Size Distribution in an Abrasive Waterjet. *ASME J. of Engineering for Industry*, Vol 113, Nov. (1991) pp. 402 –410
16. Lipták, J.; Modrák, V.: Rezanie vodným lúčom. Technická práca ,1988.
17. van Luttervelt, C.A.: On the Selection of Manufacturing Methods Illustrated by an Overview of Separation Techniques for Sheet Materials, *Annals of the CIRP* Vol.39/2 (1989), pp.587 –607
18. Momber, A.: Aktuelle Probleme der Abrasiv–Wasserstrahl–Bearbeitung, *wt Werkstattstechnik* 81, (1991) s. 437–441
19. McGeough, J. A.: Advanced Methods of Machining, Chapman and Hall, London, (1988), 1.ed
20. Ohadi, M. M.; Ansari, A.; Hashish, M.: Thermal Energy Distribution in the Workpiece during Cutting with AWJ, *ASME J. of Engineering for Industry*, Vol 114, Feb. (1992) pp. 67–73
21. Snoeys, R.; Staelens, F.; Dekkyser, W.: Current Trends in Non–Conventional Material Removal Processes, *Annals of the CIRP* Vol.35/2/ (1986), pp.467 –480
22. Schwarz, J.; Liška, J.: Řezání materiálu vysokotlakým kapalinovým paprskem, *Strojírenská výroba*, dec.1990 s.4–8
23. Vasilko, K. a kol.: Nové materiály a technológie ich spracovania. Alfa Bratislava 1990 1.vyd.
24. Warnecke, H. J.; Przyklenk, K.; Schaltter, M.: Eintgraten durch Hochdruckwasserstrahlen, *wt – z ind.Fertig.* 75, (1985), s. 425–429
25. Wilkins, R. J.; Graham, E. E.: An Erosion Model of Waterjet Cutting, *ASME J. of Engineering for Industry*, Vol 115, Feb. (1993) pp. 57–61
26. Firemné materiály AWAC spol.s r. o.
27. Firemné materiály Flow Systems, Inc.
28. Tool and Manufacturing Engineers Handbook, Vol.1 Machining, SME, Dearborne, 1983