

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**



TECHNOLOGIE I
TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 3. část

**Interaktivní multimediální text
pro bakalářský a magisterský
studijní program**

Doc. Ing. Anton Humár, CSc.



2005

OBSAH

<u>1. Abrazivní metody obrábění</u>	3
<u>1.1. Broušení</u>	3
<u>1.1.1. Kinematika broušení</u>	5
<u>1.1.2. Ekvivalentní tloušťka broušení</u>	6
<u>1.1.3. Řezné síly</u>	7
<u>1.1.4. Jednotkový strojní čas</u>	8
<u>1.1.5. Základní metody broušení</u>	9
<u>1.1.5.1. Obvodové broušení vnějších ploch do kulata</u>	10
<u>1.1.5.2. Obvodové broušení vnitřních ploch do kulata</u>	12
<u>1.1.5.3. Rovinné broušení</u>	14
<u>1.1.5.4. Tvarové broušení</u>	15
<u>1.1.6. Brousící nástroje</u>	15
<u>1.1.6.1. Standardní brousící kotouče</u>	15
<u>1.1.6.2. Brousící kotouče ze supertvrdých materiálů</u>	19
<u>1.1.7. Brousící stroje - brusky</u>	21
<u>1.2. Honování</u>	22
<u>1.3. Lapování</u>	25
<u>1.4. Superfinišování</u>	27
<u>2. Beztřískové metody dokončování obrobených ploch</u>	28
<u>2.1. Otryskávání, kuličkování, balotínování</u>	29
<u>2.2. Válečkování</u>	29
<u>2.3. Hlazení</u>	31
<u>3. Nekonvenční metody obrábění</u>	32
<u>3.1. Elektroerozivní obrábění</u>	34
<u>3.1.1. Elektrojiskrové obrábění</u>	35
<u>3.1.1.1. Elektrojiskrové hloubení</u>	35
<u>3.1.1.2. Elektrojiskrové řezání</u>	36
<u>3.1.2. Elektrokontaktní obrábění</u>	37
<u>3.1.3. Anodomechanické obrábění</u>	37
<u>3.2. Obrábění paprskem plazmy</u>	38
<u>3.3. Obrábění laserem</u>	39
<u>3.4. Obrábění paprskem elektronů</u>	42
<u>3.5. Elektrochemické obrábění</u>	42
<u>3.5.1. Elektrochemické obrábění v proudícím elektrolytu</u>	43
<u>3.5.2. Elektrochemické obrábění rotující elektrodou</u>	44
<u>3.5.3. Elektrochemické leštění</u>	44
<u>3.5.4. Elektrochemické odstraňování ostřin</u>	44
<u>3.6. Chemické obrábění</u>	45
<u>3.7. Obrábění ultrazvukem</u>	46
<u>3.8. Obrábění vodním paprskem</u>	47
<u>4. Literatura</u>	51

1. ABRAZIVNÍ METODY OBRÁBĚNÍ

Abrazivní metody obrábění jsou charakterizovány použitím nástrojů s nedefinovanou geometrií břitu a představují nejvíce využívané aplikace při obrábění strojírenských součástí, u kterých jsou kladeny vysoké požadavky na přesnost tvaru a rozměrů a drsnost povrchu obroběných ploch - dosahované parametry jsou uvedeny v tabulce 1.1. K abrazivním metodám obrábění patří zejména *broušení*, *honování*, *lapování* a *superfinašování*.

Tab.1.1 Dosahované parametry obroběných ploch pro abrazivní metody obrábění

Obráběné plochy	Metoda obrábění		Přesnost rozměrů IT		Drsnost povrchu Ra [μm]	
			střední	rozsah	střední	rozsah
vnější rotační	Broušení	hrubovací	10	9 ÷ 11	2,40	0,80 ÷ 3,20
		dokončovací	5	5 ÷ 6	0,40	0,20 ÷ 0,60
		jemné	4	3 ÷ 5	0,20	0,05 ÷ 0,40
	Lapování	dokončovací	4	3 ÷ 4	0,10	0,05 ÷ 0,20
		jemné	2	1 ÷ 2	0,03	0,012 ÷ 0,050
	Superfinašování	dokončovací	4	3 ÷ 5	0,20	0,05 ÷ 0,40
jemné		3	2 ÷ 4	0,06	0,025 ÷ 0,100	
vnitřní rotační	Broušení	hrubovací	10	9 ÷ 11	2,40	1,60 ÷ 3,20
		dokončovací	6	5 ÷ 7	0,80	0,40 ÷ 1,60
		jemné	5	3 ÷ 6	0,20	0,05 ÷ 0,40
	Honování	hrubovací	7	6 ÷ 8	0,40	0,20 ÷ 0,80
		dokončovací	6	5 ÷ 7	0,15	0,10 ÷ 0,20
		jemné	4	3 ÷ 5	0,07	0,05 ÷ 0,10
Lapování	dokončovací	4	3 ÷ 5	0,20	0,01 ÷ 0,40	
	jemné	2	1 ÷ 3	0,03	0,012 ÷ 0,050	
rovinné	Broušení	hrubovací	10	9 ÷ 11	2,40	1,60 ÷ 3,20
		dokončovací	6	5 ÷ 7	0,80	0,40 ÷ 1,60
		jemné	5	3 ÷ 6	0,20	0,05 ÷ 0,40
	Lapování	dokončovací	4	3 ÷ 5	0,20	0,10 ÷ 0,40
		jemné	2	1 ÷ 3	0,03	0,012 ÷ 0,050

1.1. BROUŠENÍ

Broušení lze charakterizovat jako obrábění mnohobřítým nástrojem vytvořeným ze zrn brusiva, která jsou spojena pojivem. Historicky patří mezi nejstarší metody obrábění materiálů, které člověk využíval již v prehistorických dobách k výrobě nebo úpravě životně důležitých pomůcek, především k ostření pracovních nástrojů a zbraní.

V současné době je broušení využíváno jako hlavní metoda dokončovacího obrábění ve strojírenské výrobě, např. v automobilové výrobě, tvoří brusky a další dokončovací obráběcí stroje 25 % a ve výrobě valivých ložisek až 60 % všech obráběcích strojů.

S vývojem výkonných broušících nástrojů a brusek se význam broušení rozšiřuje z původní oblasti dokončování i na hrubovací operace a je zřejmé, že z hlediska produktivity i výrobních nákladů může konkurovat ostatním metodám obrábění. K hlavním charakteristickým znakům broušení patří:

- Nepravidelný úběr třísky jednotlivými zrn brusiva v důsledku různé geometrické formy zrn a nepravidelnosti jejich rozmístění v brousicím nástroji. Tato skutečnost (spolu s délkovou roztažností obrobku) se projevuje např. při tzv. „vyjiskřování“, kdy brousicí kotouč při opakovaném posuvu obrobku odebírá malé množství třísek přesto, že hodnota pracovního záběru ostří a_e zůstává nezměněna.
- Nestejné, ale vesměs velké záporné úhly čela jednotlivých zrn brusiva (ovlivnění oblasti primární plastické deformace a podmínek tření).
- Poměrně slabé upevnění zrna v pojjivu brousicího kotouče - zrna jsou schopna přenášet pouze malé řezné síly, při broušení dochází k samovolnému uvolňování jednotlivých zrn nebo jejich částí (tzv. „samoostření“ brousicího kotouče).
- Malé průřezy třísek (řádově 10^{-3} mm²), přerušovaný řez s proměnným průřezem třísek (podobně jako u frézování). V důsledku velkých plastických deformací a vnějšího i vnitřního tření se některé třísky ohřejí natolik, že se roztaví a vytvoří kapky kovu nebo shoří (jiskření).
- Velké měrné řezné síly (odpory), řádově až několik desítek tisíc MPa (souvisí s malým průřezem třísek).
- Vysoké hodnoty řezné rychlosti (30 až 100 m s⁻¹) a z nich vyplývající krátká doba záběru zrn brusiva s obrobkem.
- Velké množství vzniklého tepla a z toho vyplývající nutnost vydatného chlazení obrobku. Tepelné zatížení má za následek vznik nepříznivých tahových zbytkových napětí v povrchové vrstvě obrobené plochy (negativní vliv na spolehlivost a životnost součástí při funkci).
- Zanášení pórů nástroje třískami, což spolu s otupováním ostří jednotlivých zrn brusiva vede ke ztrátě řezivosti nástroje. Řezivost brousicích kotoučů (i jejich původní tvar) lze obnovit pomocí různých typů orovnávačů (jednokamenové orovnávače firmy Urdiamant, více kamenové orovnávače firmy Urdiamant, více kamenové orovnávače firmy Norton, ploché orovnávače firmy Engis, tvarové orovnávače firmy Engis).

Brousicí proces se uskutečňuje různými metodami, které jsou definovány podle různých kritérií. Podle tvaru obrobeného povrchu a způsobu jeho vytváření se rozlišuje:

- **rovinné broušení** (výsledkem je rovinná plocha),
- **broušení do kulata** (výsledkem je rotační povrch),
- **broušení na otáčivém stole** (broušení s rotačním posuvem),
- **tvarové broušení** (broušení závitů, ozubených kol apod.),
- **kopírovací broušení** (broušení s řízenou změnou posuvu, NC a CNC stroje),
- **broušení tvarovými brousicími kotouči** (profil brousicího kotouče určuje konečný profil obrobku).

Podle aktivní části brousicího kotouče se specifikuje :

- **obvodové broušení** (broušení obvodem kotouče),
- **čelní broušení** (broušení čelem kotouče, kolmým k jeho ose).

Podle vzájemné polohy brousicího kotouče a obrobku se charakterizuje :

- **vnější broušení** (broušení vnějšího povrchu obrobku),
- **vnitřní broušení** (broušení vnitřního povrchu obrobku).

Podle hlavního pohybu posuvu stolu vzhledem k brousicímu kotouči (termínem „stůl“ se označuje pohyblivá část brousicího stroje vzhledem k jeho základu, na stůl brusky se upevňuje obrobek nebo brousicí vřeteník) se definuje :

- **axiální broušení** (hlavní posuv stolu je rovnoběžný s osou kotouče),

- **tangenciální broušení** (hlavní posuv stolu je rovnoběžný s vektorem obvodové rychlosti kotouče ve zvoleném bodě **D**),
- **radiální broušení** (hlavní posuv stolu ve zvoleném bodě **D** je radiální vzhledem k broušícímu kotouči),
- **obvodové zapichovací broušení** (posuv stolu je plynulý radiální),
- **čelní zapichovací broušení** (posuv stolu je plynulý axiální).

1.1.1. Kinematika broušení

Pohyby a rychlosti pohybů při broušení jsou definovány na základě charakteristik jednotlivých způsobů broušení - např. pro obvodové vnější broušení do kulata [radiálním](#) nebo [axiálním](#) způsobem.

Řezná rychlost v_c se vyjádří vztahem

$$v_c = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{60 \cdot 1000} \quad [\text{m s}^{-1}], \quad (1.1)$$

kde: d_s [mm] je průměr broušícího kotouče,
 n_s [min^{-1}] je frekvence otáčení broušícího kotouče.

Řezná rychlost při běžném broušení dosahuje hodnot 30 až 35 m s^{-1} . Při rychlostním broušení je nutná aplikace kotouče se speciálním druhem pojiva a řezná rychlost zpravidla přesahuje 80 m s^{-1} , ve zvláštních případech až 180 m s^{-1} .

Obvodová rychlost obrobku v_w při broušení do kulata se vyjádří vztahem

$$v_w = \frac{\pi \cdot d_w \cdot n_w}{1000} \quad [\text{m min}^{-1}], \quad (1.2)$$

kde: d_w [mm] je průměr obrobku,
 n_w [min^{-1}] je frekvence otáčení obrobku.

Stykový oblouk broušícího kotouče a obrobku lze kvantifikovat jako geometrickou délku styku l_g , kinematickou délku styku l_k nebo skutečnou délku styku l_e . Pro běžné podmínky obvodového broušení je [geometrická délka styku](#) dána vztahem

$$l_g = \sqrt{2 \cdot f_r \cdot r_{eq}} \quad [\text{mm}], \quad (1.3)$$

kde: f_r [mm] je radiální posuv stolu brusky,
 r_{eq} [mm] je ekvivalent poloměru broušícího kotouče.

Kinematická délka styku se vyjádří vztahem

$$l_k = l_g \cdot \left(1 + \frac{1}{q} \right) \quad [\text{mm}], \quad (1.4)$$

kde: q [-] je poměr rychlosti, který se pro broušení do kulata stanoví podle vztahu

$$q = \frac{60 \cdot v_c}{w_w} \quad [-] \quad (1.5)$$

a pro rovinné broušení podle vztahu

$$q = \frac{60 \cdot v_c}{w_{ft}} \quad [-], \quad (1.6)$$

kde: v_c [$m s^{-1}$] je řezná rychlost,
 v_w [$m min^{-1}$] je obvodová rychlost obrobku,
 v_{ft} [$m min^{-1}$] je tangenciální rychlost posuvu stolu brusky.

Ekvivalent poloměru broušícího kotouče r_{eq} je poloměr fiktivního broušícího kotouče, který má v záběru s obrobkem stejnou délku geometrického styku l_g jako broušící kotouč s poloměrem r_s , v záběru s obrobkem o poloměru r_w při obvodovém broušení. Hodnota r_{eq} se vyjádří pomocí vztahu

$$r_{eq} = \frac{r_w \cdot r_s}{r_w \pm r_s} \quad [mm]. \quad (1.7)$$

Ve vztahu (1.7) se pro vnější broušení do kulata použije znaménko plus a pro vnitřní broušení do kulata znaménko minus.

1.1.2. Ekvivalentní tloušťka broušení

Vzhledem k omezené platnosti a složitosti vztahů pro výpočet parametrů třísky ubírané jednotlivými zrny broušícího nástroje je pro výpočty při broušení využívána teoretická hodnota ekvivalentní tloušťky broušení h_{eq} . Při jejím odvození se vychází z kontinuity materiálu, který na jedné straně do oblasti řezání vstupuje a na druhé straně z ní vychází. Vrstva odebíraného materiálu o tloušťce např. f_r (vnější obvodové tangenciální broušení do kulata), f_a (vnější obvodové axiální broušení do kulata) nebo a_e (rovinné obvodové tangenciální broušení) vstupuje do oblasti řezání rychlostí v_w , v_{ft} , apod. (opět závisí na způsobu broušení). Množství vytvořených třísek pak lze teoreticky spojit v jedinou plynulou vrstvu o tloušťce h_{eq} , která odchází z řezné oblasti rychlostí v_c .

Teoretické rozbory i experimentální výzkum prokázaly, že pomocí hodnoty h_{eq} lze stanovit např. řezné síly a odpory, měrné řezné síly a odpory, měrnou práci, výkon a měrný výkon a tím s dostatečnou přesností charakterizovat proces broušení, i jeho výsledky z hlediska dosažených parametrů obrobenej plochy (tvar, rozměry, drsnost povrchu).

Hodnota ekvivalentní tloušťky broušení se pro vnější obvodové tangenciální broušení [do kulata](#) vyjádří podle vztahu

$$h_{eq} = \frac{v_w}{60 \cdot v_c} \cdot f_r \quad [mm], \quad (1.8)$$

kde: f_r [mm] je radiální posuv stolu brusky,

pro vnější obvodové axiální broušení do kulata bude mít příslušná závislost tvar

$$h_{eq} = \frac{v_w}{60 \cdot v_c} \cdot f_a = \frac{v_w}{60 \cdot v_c} \cdot \frac{10^3 \cdot v_{fa}}{n_w} = \frac{10^2 \cdot v_w \cdot v_{fa}}{6 \cdot v_c \cdot n_w} \quad [mm], \quad (1.9)$$

kde: f_a [mm] je axiální posuv stolu brusky na jednu otáčku obrobku,

v_c [$m s^{-1}$] je řezná rychlost,

v_w [$m min^{-1}$] je obvodová rychlost obrobku,

n_w [min^{-1}] je frekvence otáčení obrobku,

v_{fa} [$m min^{-1}$] je axiální rychlost posuvu stolu brusky.

Pro [rovinné](#) obvodové tangenciální broušení s přímočarým pohybem stolu se h_{eq} vyjádří pomocí vztahu

$$h_{eq} = \frac{v_{ft}}{60 \cdot v_c} \cdot a_e \quad [\text{mm}], \quad (1.10)$$

kde: a_e [mm] je pracovní (radiální) záběr,
 v_c [m s^{-1}] je řezná rychlost,
 v_{ft} [m min^{-1}] je tangenciální rychlost posuvu stolu brusky.

1.1.3. Řezné síly

Celková řezná síla F působí v obecném směru mezi brousicím kotoučem a obrobkem a rozkládá se do tří na sebe kolmých směrů. Ve směru řezné rychlosti leží řezná síla F_c , pasivní síla F_p je kolmá k broušené ploše a posuvová síla F_f působí ve směru podélného posuvu, tzn. kolmo na rovinu otáčení kotouče (obvykle platí, že $F_p > F_c > F_f$ a poměr sil F_p/F_c dosahuje hodnot 1,2 až 3,0). U broušení obvodem kotouče se hodnoty sil F_p , F_c a F_f mohou též někdy vyjadřovat v přepočtu na jednotku šířky brousicího kotouče (nejčastěji 1 mm).

Velikost řezných sil závisí zejména na obráběném materiálu, způsobu broušení, řezných podmínkách (velký vliv má zejména průřez třísky), dále na zrnitosti brusiva, druhu a tvrdosti pojiva a struktuře brousicího kotouče. S narůstajícím otupováním brousicího kotouče se řezná síla zvětšuje, v konečném důsledku až na několiknásobek své počáteční hodnoty.

Orientačně je možné řeznou sílu F_c určit z experimentálně získaných vztahů. Pro obvodové axiální broušení vnějších rotačních ploch platí

$$F_c = 25 \cdot v_w^{0,6} \cdot f_a^{0,6} \cdot a_e^{0,5} \quad [\text{N}], \quad (1.11)$$

kde: v_w [m min^{-1}] je obvodová rychlost obrobku,
 f_a [mm] je axiální posuv stolu brusky na jednu otáčku obrobku,
 a_e [mm] je pracovní (radiální) záběr.

Pro obvodové axiální broušení vnitřních rotačních ploch se hodnota F_c určí podle empirického vztahu

$$F_c = 2,5 \cdot v_w^{0,5} \cdot f_a^{0,4} \cdot a_e^{0,4} \cdot d_w^{0,3} \quad [\text{N}], \quad (1.12)$$

kde: v_w [m min^{-1}] je obvodová rychlost obrobku,
 f_a [mm] je axiální posuv stolu brusky na jednu otáčku obrobku,
 a_e [mm] je pracovní (radiální) záběr,
 d_w [mm] je průměr obrobku.

Pro obvodové tangenciální broušení rovinných ploch se hodnota F_c určí podle empirického vztahu

$$F_c = 6 \cdot v_c^{0,8} \cdot f_a^{0,8} \cdot a_e^{0,8} \quad [\text{N}], \quad (1.13)$$

kde: v_c [m s^{-1}] je řezná rychlost,
 f_a [mm] je axiální posuv stolu brusky na jeden zdvih,
 a_e [mm] je pracovní (radiální) záběr.

Hodnotu řezné síly F_c lze také vypočítat na základě vztahu

$$F_c = k_c \cdot A_D \quad [\text{N}], \quad (1.14)$$

kde: k_c [MPa] je měrná řezná síla,
 A_D [mm^2] je průřez třísky.

Měrná řezná síla dosahuje hodnot $k_c=10000$ až 35000 MPa (pro oceli) a $k_c=4000$ až 12000 MPa (pro litiny), vyšší hodnoty platí pro broušení na čisto a jemné broušení.

Průřez třísky A_D závisí na způsobu broušení. Pro vnější obvodové axiální broušení do kulata platí

$$A_D = f_a \cdot h_{eq} = \frac{10^3 \cdot v_{fa} \cdot h_{eq}}{n_w} \quad [\text{mm}^2], \quad (1.15)$$

kde: f_a [mm] je axiální posuv stolu brusky na jednu otáčku obrobku,
 h_{eq} [mm] je ekvivalentní tloušťka broušení,
 v_{fa} [m min^{-1}] je axiální rychlost posuvu stolu brusky,
 n_w [min^{-1}] je frekvence otáčení obrobku.

Při rovinném obvodovém tangenciálním broušení s přímočarým pohybem stolu se hodnota průřezu třísky stanoví podle vztahu

$$A_D = b_D \cdot h_{eq} \quad [\text{mm}^2], \quad (1.16)$$

kde: b_D [mm] je šířka aktivní části broušícího kotouče,
 h_{eq} [mm] je ekvivalentní tloušťka broušení.

1.1.4. Jednotkový strojní čas

Výpočet hodnoty jednotkového strojního času závisí na způsobu broušení. Pro vnější obvodové axiální broušení [do kulata](#), s radiálním posuvem stolu o hodnotu f_r na každý zdvih stolu (tedy v každé jeho úvrati), bez vyjiskřování, se jednotkový strojní čas stanoví podle vztahu

$$t_{AS} = \frac{l_a}{f_a \cdot n_w} \cdot \frac{p}{2 \cdot f_r} = \frac{l_a \cdot p}{2 \cdot 10^3 \cdot v_{fa} \cdot f_r} \quad [\text{min}], \quad (1.17)$$

kde: $l_a = l_{na} + l_w + l_{pa}$ [mm] je dráha pohybu stolu brusky v axiálním směru,
 $l_{na} = 3 \text{ mm}$ je délka náběhu v axiálním směru,
 $l_{pa} = l_{na} + b_s/2$ [mm] je délka přeběhu v axiálním směru,
 b_s [mm] je šířka broušícího kotouče,
 l_w [mm] je délka obrobku,
 f_a [mm] je axiální posuv stolu brusky na jednu otáčku obrobku,
 n_w [min^{-1}] je frekvence otáčení obrobku,
 p [mm] je přídavek na broušení (vztažený na průměr),
 f_r [mm] je radiální posuv stolu brusky na jeden axiální zdvih stolu,
 v_{fa} [m min^{-1}] je axiální rychlost posuvu stolu brusky.

Pro vnější obvodové axiální broušení do kulata, s radiálním posuvem stolu o hodnotu f_r na každý dvojdvih zdvih stolu, bez vyjiskřování, se jednotkový strojní čas stanoví podle vztahu

$$t_{AS} = 2 \cdot \frac{l_a}{f_a \cdot n_w} \cdot \frac{p}{2 \cdot f_r} = \frac{l_a \cdot p}{10^3 \cdot v_{fa} \cdot f_r} \quad [\text{min}], \quad (1.18)$$

kde: f_r [mm] je radiální posuv stolu brusky na jeden axiální dvojdvih stolu, ostatní veličiny jako u vztahu 1.17.

Pro vnější obvodové axiální broušení do kulata, s radiálním posuvem stolu o hodnotu f_r na každý dvojdvih zdvih stolu, se třemi vyjiskřovacími dvojdvihi, se jednotkový strojní čas stanoví podle vztahu

$$t_{AS} = 2 \cdot \frac{l_a}{f_a \cdot n_v} \cdot \left(\frac{p}{2 \cdot f_r} + n_v \right) = \frac{l_a}{10^3 \cdot v_{fa}} \cdot \left(\frac{p}{f_r} + 2 \cdot n_v \right) \quad [\text{min}], \quad (1.19)$$

kde: f_r [mm] je příčný posuv stolu brusky na jeden axiální dvojjzdvih stolu,
 $n_v=3$ je počet vyjiskřovacích dvojjzdvihů, ostatní veličiny jako u vztahu 1.17.

Pro **rovinné** obvodové tangenciální broušení s přímočarým pohybem stolu, při axiálním posuvu stolu o hodnotu f_a na každý zdvih stolu (tedy v každé jeho úvrati), bez vyjiskřování, se jednotkový strojní čas stanoví podle vztahu

$$t_{AS} = \frac{l_t}{10^3 \cdot v_{ft}} \cdot \frac{l_a}{f_a} \cdot \frac{p}{a_e} \quad [\text{min}], \quad (1.20)$$

kde: $l_t = l_{nt} + l_w + l_{pt}$ [mm] je dráha pohybu stolu brusky v tangenciálním směru,

$l_{nt} = \sqrt{3 \cdot d_s + 9}$ [mm] je délka náběhu v tangenciálním směru,

d_s [mm] je průměr broušícího kotouče,

$l_{pt} = l_{nt}$ [mm] je délka přeběhu v tangenciálním směru,

l_w [mm] je délka obrobku,

v_{ft} [m min^{-1}] je tangenciální rychlost posuvu stolu brusky,

$l_a = l_{na} + b_w + l_{pa}$ [mm] je dráha pohybu stolu brusky v axiálním směru,

$l_{na} = b_s/2$ [mm] je délka náběhu v axiálním směru,

b_w [mm] je šířka broušené plochy,

$l_{pa} = l_{na}$ [mm] je délka přeběhu v axiálním směru,

f_a [mm] je axiální posuv stolu brusky na jeden zdvih v tangenciálním směru,

p [mm] je přídavek na broušení,

a_e [mm] je pracovní (radiální) záběr.

Pro rovinné obvodové tangenciální broušení s přímočarým pohybem stolu, při axiálním posuvu stolu o hodnotu f_a na každý dvojjzdvih stolu, bez vyjiskřování, se jednotkový strojní čas stanoví podle vztahu

$$t_{AS} = 2 \cdot \frac{l_t}{10^3 \cdot v_{ft}} \cdot \frac{l_a}{f_a} \cdot \frac{p}{a_e} \quad [\text{min}], \quad (1.21)$$

kde: f_a [mm] je axiální posuv stolu brusky na jeden dvojjzdvih v tangenciálním směru, všechny veličiny jako u vztahu 1.20.

Pro rovinné obvodové tangenciální broušení s přímočarým pohybem stolu, při axiálním posuvu stolu o hodnotu f_a na každý dvojjzdvih stolu, se třemi vyjiskřovacími dvojjzdvihi, se jednotkový strojní čas stanoví podle vztahu

$$t_{AS} = 2 \cdot \frac{l_t}{10^3 \cdot v_{ft}} \cdot \left(\frac{l_a}{f_a} + n_v \right) \cdot \frac{p}{a_e} \quad [\text{min}], \quad (1.22)$$

kde: f_a [mm] je axiální posuv stolu brusky na jeden dvojjzdvih v tangenciálním směru,

$n_v=3$ je počet vyjiskřovacích dvojjzdvihů, všechny ostatní veličiny jako u vztahu 1.20.

1.1.5. Základní metody broušení

Ve strojírenské výrobě se používá řada metod broušení rovinných a rotačních ploch na standardních i číslicově řízených bruskách. Nejčastěji využívané metody broušení jsou popsány v následujícím textu.

1.1.5.1. Obvodové broušení vnějších ploch do kulata

Axiální broušení

Broušení s podélným (axiálním) posuvem se používá zejména při broušení dlouhých rotačních součástek válcového nebo kuželového tvaru, dlouhé a štíhlé součástky jsou podepírány lunetou. Obrobek se otáčí mezi hroty (\mathbf{n}_w) a současně koná posuvový pohyb rovnoběžný s osou obrobku (\mathbf{v}_{fa}), popř. obrobek koná jen pohyb otáčivý (\mathbf{n}_w) a posuvový podél osy obrobku (\mathbf{v}_{fa}) koná nástroj. Úběr obráběného materiálu je zajištěn radiálním posuvem (\mathbf{f}_r) kotouče nebo obrobku o hodnotu pracovního záběru ($\mathbf{a}_e = \mathbf{f}_r$) na každý zdvih stolu (v každé jeho úvratí, po přejetí celé délky součásti) nebo každý dvojjdvh stolu.

Orientační hodnoty řezných podmínek pro broušení vnějších ploch do kulata:

Řezná rychlost v_c (obvodová rychlost brousícího kotouče v_s):

- pro broušení ocelí: $25 \div 35 \text{ m s}^{-1}$,
- pro broušení litin: 25 m s^{-1} .

Obvodová rychlost obrobku v_w :

- pro broušení ocelí: $15 \div 20 \text{ m min}^{-1}$ (na hrubo), $8 \div 15 \text{ m min}^{-1}$ (na čisto),
- pro broušení litin: $15 \div 22 \text{ m min}^{-1}$ (na hrubo), $12 \div 16 \text{ m min}^{-1}$ (na čisto),
- pro broušení hliníku a jeho slitin: $20 \div 30 \text{ m min}^{-1}$.

Axiální posuv stolu brusky \mathbf{f}_a [mm] na jednu otáčku obrobku (vyjádřeno pomocí šířky brousícího kotouče \mathbf{b}_s [mm]):

- pro broušení ocelí: $(0,6 \div 0,8)\mathbf{b}_s$ (na hrubo), $(0,2 \div 0,4)\mathbf{b}_s$ (na čisto),
- pro broušení litin: $(0,75 \div 0,85)\mathbf{b}_s$ (na hrubo), $(0,3 \div 0,5)\mathbf{b}_s$ (na čisto),
- pro zvlášť jemné broušení: $(0,1 \div 0,2) \mathbf{b}_s$.

Pracovní (radiální) záběr: $\mathbf{a}_e = 0,001 \div 0,008 \text{ mm}$.

Hloubkové broušení

Tento způsob se používá při malých přídavcích na dokončovací obrábění a patří k nejpřírodnějších metodám broušení do kulata. Jedná se o broušení kotoučem nastaveným na konečný rozměr obrobku, kdy se celý přídavek \mathbf{p} (vztažen na průměr obrobku) obrousí na jeden podélný zdvih stolu při malé axiální rychlosti posuvu \mathbf{v}_{fa} , s konstantním pracovním záběrem $\mathbf{e}_e = 0,1 \div 0,4 \text{ mm}$ ($\mathbf{a}_e = \mathbf{p}/2$).

K výhodám této metody patří zejména skutečnost, že pouze malé množství brousících zrn odřezává obráběný materiál, ostatní zrna vyjiskřují. Výkon při hloubkovém broušení je o 25% až 75% vyšší než při axiálním broušení.

Pro zlepšení podmínek hrubovacích zrn se na brousícím kotouči vytvoří kuželové zkosení, při velkých přídavcích se kotouč vytvaruje stupňovitě. Řezná rychlost v_c a obvodová rychlost otáčení obrobku v_w dosahují stejných hodnot jako při axiálním broušení.

Radiální broušení

Podmínkou aplikace radiálního (zapichovacího) broušení je tuhý obrobek, zpravidla do maximální délky $\mathbf{l}_w = 350 \text{ mm}$ (šířka brousícího kotouče \mathbf{b}_s musí být větší než je délka obrobku $\mathbf{b}_s > \mathbf{l}_w$). Při hrubém broušení se volí radiální posuv stolu (nebo kotouče) na jednu otáčku obrobku $\mathbf{f}_r = 0,0025$ až $0,0075 \text{ mm}$, při broušení na čisto $\mathbf{f}_r = 0,001$ až $0,005 \text{ mm}$. Při současném broušení více ploch lze použít i šikmý posuv brousícího kotouče (\mathbf{f}_{ra}).

Řezná rychlost v_c a obvodová rychlost otáčení obrobku v_w dosahují stejných hodnot jako při axiálním broušení. Výkon broušení je o 40% až 80% vyšší než u axiálního broušení.

Při axiálním, hloubkovém a radiálním broušení do kulata se obrobky upínají mezi hroty ([obr.1](#), [obr.2](#), [obr.3](#), u obrobků malých průměrů se použijí seříznuté hroty), na válcový nebo kuželový trn, případně do skličidla. Pro broušení tenkostěnných pouzder se uplatňují rozpínací nebo odpovídajícím způsobem uspořádané válcové trny.

Bezhruté broušení

Bezhruté broušení umožňuje vysokou produktivitu práce při průběžném (průchozím) i zapichovacím způsobu broušení a s úspěchem se používá zejména v hromadné a velkosériové výrobě. Za typickou aplikaci lze považovat např. broušení součástí valivých ložisek (základní průměry a oběžné dráhy vnějších a vnitřních kroužků radiálních ložisek, povrchy valivých tělísek - válečků, kuželíků, soudečků).

Bezhruté broušení průběžné se používá pro broušení hladkých válcových součástí, které se vkládají mezi dva kotouče, z nichž jeden je broušící a druhý podávací (broušící kotouč má obvykle větší průměr než podávací, v některých případech až dvojnásobný). Obrobek se při broušení otáčí obvodovou rychlostí podávacího kotouče a jeho osa je asi 5 až 30 mm nad osami obou kotoučů, přičemž je veden na kalené vodící liště, která prochází podélně mezi oběma kotouči.

Natočením podávacího kotouče se jeho obvodová rychlost (v_{pk}) [rozkládá](#) na dvě složky, z nichž vodorovná (v_{fa}) uděluje obrobku axiální posuvový pohyb a svislá (v_w) jím otáčí příslušnou obvodovou rychlostí. Rychlost posuvu se dá řídit zvětšováním nebo zmenšováním úhlu α a její hodnota se pohybuje v rozmezí 1500 až 4500 mm min⁻¹. Doporučené hodnoty dalších pracovních podmínek:

- obvodová rychlost broušícího kotouče $v_c = 30$ až 35 m s⁻¹,
- obvodová rychlost obrobku $v_w = 18$ až 45 m min⁻¹,
- pracovní (radiální záběr) $a_e = 0,005 \div 0,300$ mm.

Bezhruté broušení zapichovací se používá u součástí, které mají [nákrůžek](#), [kuželové](#) nebo tvarové plochy, případně více souosých [válcových ploch](#) a nemají středící důlky. Součásti se vkládají axiálně shora k dorazu mezi broušící a podávací kotouč, jejichž osy jsou rovnoběžné. Zpravidla se brousí na dva úběry s přídavkem pro druhý úběr 0,03 až 0,05 mm.

Tab.1.2 Doporučené pracovní podmínky pro průběžné bezhruté broušení

Druh práce	d_w [mm]	$p=2a_e$ [mm]	α [°]	v_{pk} [m min ⁻¹]
Hrubování	do 10	0,04 ÷ 0,06	3 ÷ 4	150 ÷ 80
	10 ÷ 25	0,06 ÷ 0,10	2,5 ÷ 3,5	120 ÷ 50
	25 ÷ 75	0,1 ÷ 0,3	2,0 ÷ 3,5	50 ÷ 10
	75 ÷ 150	0,2 ÷ 0,4	1,0 ÷ 2,5	25 ÷ 8
Broušení na čisto	---	0,005 ÷ 0,020	1,5 ÷ 2,0	120 ÷ 50

d_w - průměr broušené součásti, p - přídavek na průměr, a_e - pracovní (radiální) záběr, α - úhel sklonu podávacího kotouče, v_{pk} - obvodová rychlost podávacího kotouče

Tab.1.3 Doporučené pracovní podmínky pro zapichovací bezhruté broušení

Druh práce	f_r [mm]	v_{pk} [m min ⁻¹]
Hrubování	0,005 ÷ 0,020	10 ÷ 25
Broušení na čisto	0,003 ÷ 0,010	10 ÷ 35

f_r - radiální posuv na jednu otáčku obrobku, v_{pk} - obvodová rychlost podávacího kotouče

1.1.5.2. Obvodové broušení vnitřních ploch do kulata

Axiální broušení

Tato metoda se používá obvykle v případech, kdy je délka obrobku l_w [mm] větší než je šířka broušícího kotouče b_s [mm]. Kotouč se otáčí uvnitř broušené díry s frekvencí odpovídající požadované řezné rychlosti v_c [$m\ s^{-1}$] a posouvá ve směru její osy axiální rychlostí v_{fa} [$m\ min^{-1}$]. Obrobek se otáčí s frekvencí otáčení n_w [min^{-1}], která mu uděluje obvodovou rychlost v_w [$m\ min^{-1}$] (vztaženo na průměr broušené díry). Odbroušení přídatku je zabezpečeno vzájemným posunutím obráběné součásti a broušícího kotouče o hodnotu radiálního záběru a_e (ve směru kolmém na broušený povrch). Odpružení kotouče v radiálním směru je v průběhu každého axiálního zdvihu proměnlivé, následkem menších pružných deformací se proto kotouč v oblasti přeběhu (v obou úvratích zdvihu) zařezává do obrobku hlouběji.

Proces vnitřního broušení ovlivňují zejména geometrické rozměry součásti, především průměr broušené díry. Průměr broušícího kotouče d_s může dosáhnout maximálně 0,7 až 0,9 násobku průměru broušené díry d_w , což při obrábění malých děr vyžaduje použití kotouče velmi malých průměrů. Podmínky broušení jsou nepříznivé, protože broušící zrna, která vstupují do aktivního procesu oddělování třísky, jsou velmi namáhána. Vnitřní broušení se používá hlavně v těch případech, kdy pro výrobu přesné díry nelze použít jiných, efektivnějších metod obrábění, jako je např. vystružování, vyvrtávání, honování apod.

Broušící kotouč malého průměru musí mít vysoké otáčky, což lze zajistit jen velmi stěží, protože např. při $d_s = 10\ mm$ a $v_c = 35\ m\ s^{-1}$ by se musel otáčet s frekvencí $n_s = 66845\ min^{-1}$. Protože zajištění tak vysokých otáček včetně je poměrně obtížné, brouší se malé díry nízkými řeznými rychlostmi, což má za následek zhoršení jakosti broušeného povrchu a snížení výrobnosti. Navíc se kotouč rychle opotřebovává, zanáší, ztrácí řeznou schopnost i geometrický tvar a proto musí být často ovrňován.

Při broušení kotoučem malého průměru je malý i průměr broušícího vřetena, což při velkém vyložení snižuje jeho tuhost. Čím menší je tuhost technologického systému, tím větší je možnost překopírování chyb geometrického tvaru předpracované díry. Aby byl zabezpečen požadovaný geometrický tvar broušené díry, je třeba udržet nízké hodnoty pasivní síly F_p (v krajních polohách při začátku přeběhu řeže kotouč jen částí svého povrchu, hodnota F_p se proporcionálně zmenšuje). Proto broušící operace děr, v porovnání s vnějším broušením, probíhají při nižších řezných parametrech.

Při volbě obvodové rychlosti v_w je třeba brát v úvahu, že při jejím zvýšení se zlepšuje odvod tepla a klesá možnost tvorby opalů na broušeném povrchu. Parametry drsnosti obroběné plochy se však v důsledku kratší doby doteku součásti s kotoučem zhoršují. Se zvyšováním frekvence otáčení součásti kvadraticky narůstají odstředivé síly a zvětšuje se kmitání. Zhoršují se i některé technologické podmínky stroje (zvětšuje se rozstřík řezné kapaliny).

Poměr rychlostí $v_w/60.v_c$ se má pohybovat v rozsahu 1/60 až 1/100. Při volbě obvodové rychlosti obrobku v_w se mají brát v úvahu následující technologické faktory:

- *materiál a druh tepelného zpracování* - čím vyšší je tvrdost obráběné součásti a její sklon k tvorbě opalů a trhlin, tím vyšší má být obvodová rychlost obrobku,
- *řezné parametry* - čím vyšší jsou ostatní řezné parametry, tím vyšší má být obvodová rychlost obrobku,
- *druh broušícího kotouče* - se zvyšováním tvrdosti kotouče je třeba obvodovou rychlost obrobku zvýšit, při vyšších požadavcích na drsnost povrchu naopak snížit.

Doporučené hodnoty pracovních podmínek pro vnitřní axiální broušení jsou uvedeny v tabulce 1.4. Při broušení kalených ocelí je možné obvodovou rychlost obrobku v_w zvýšit zhruba o 10%.

Tab.1.4. Doporučené pracovní podmínky pro axiální broušení

Druh práce		f_a [mm]	a_e [mm]	v_w [m min ⁻¹]
Jednoduché brusky	hrubování	$(0,4 \div 0,7) \cdot b_s$	$0,005 \div 0,020$	20 ÷ 40
	na čisto	$(0,25 \div 0,40) \cdot b_s$	$0,0025 \div 0,0100$	
Poloautomatické brusky	hrubování	$(0,40 \div 0,75) \cdot b_s$	$0,0025 \div 0,0050$	50 ÷ 150
	na čisto	$(0,25 \div 0,40) \cdot b_s$	$0,0015 \div 0,0025$	
f_a - axiální posuv na jednu otáčku obrobku, a_e - pracovní (radiální) záběr, v_w - obvodová rychlost obrobku				

Při volbě posuvové rychlosti v_{fa} je třeba respektovat skutečnost, že při jejím zvyšování se zlepšuje odvod tepla, zmenšuje se nebezpečí tvorby opalů na broušeném povrchu, zvyšuje se počet dvojzdvihů za minutu, ale zároveň se zvětšují setrvačné síly při změně chodu stolu (vřetena) i silové zatížení vřetena a broušícího kotouče. Následkem narůstání setrvačných sil v úvratí přímočarého pohybu se zhoršuje makrogeometrie broušeného povrchu.

Hodnota axiálního posuvu f_a [mm], vztažena na jednu otáčku obrobku ($f_a = 10^3 \cdot v_{fa} / n_w$), se orientačně volí v rozsahu $f_a = (0,2 \div 0,8) \cdot b_s$ a nemusí být v průběhu jednoho pracovního cyklu stejná. Při broušení s proměnlivou hodnotou f_a v průběhu pracovního cyklu broušení jedné součásti je možné zvýšit přesnost, kvalitu a výrobnost broušení.

Kvůli částečné kompenzaci geometrických chyb pracují broušící kotouče s [překrytím](#) nebo s [průsvitem](#) (bez překrytí). Přeběh C na obě strany součásti by měl být stejný, aby se při broušení tvořily stejné symetrické chyby (nepatrná kuželovitost). Hodnota přeběhu (doporučený rozsah $(1/3 \div 1/2) \cdot b_s$), ale také šířka kotouče a délka zdvihu se volí podle délky broušené součásti. Při broušení krátkých děr se z ekonomického hlediska doporučuje volit šířku kotouče b_s stejnou jako je délka součásti l_w .

Bezhruté broušení

Bezhruté broušení se podobá axiálnímu broušení - všechny základní pohyby broušícího kotouče a obrobku jsou zachovány, rozdíl je v upínání součástky - součást se vkládá mezi [tři kotouče](#). Podávací kotouč 2 zabezpečuje otáčení součásti, opěrný kotouč 3 určuje polohu součásti a upínací kotouč 4 ji přitlačuje ke kotoučům 2 a 3 a tím ji během broušení upíná. Tento způsob broušení se může použít jen u součástí, které mají válcový vnější povrch souosý s broušeným vnitřním povrchem. Geometrické úchylny vnějšího povrchu součásti (kruhovitost, válcovitost) vyvolávají nepřesnosti při otáčení, protože se součást ustavuje od vnějšího povrchu. Bezhruté vnitřní broušení zabezpečuje větší přesnost v porovnání s axiálním vnitřním broušením, protože při tomto způsobu řezné síly nedeformují broušenou součást.

Planetové broušení

Při broušení děr ve větších součástech, které nelze upnout na brusce na díry do sklíčidla nebo čelistí, se používá [planetové broušení](#) na planetových bruskách. Obrobek se upne pevně na stole brusky a vřeteno s broušícím kotoučem se otáčí kolem vlastní osy obvodovou rychlostí v_e , obíhá kolem osy broušené díry rychlostí v_v a současně se pohybuje ve směru osy díry axiální rychlostí v_{fa} (axiální pohyb může alternativně vykonávat obrobek). Přesnost planetových brusek je menší, protože vřeteno má delší vyložení a je proto méně tuhé.

1.1.5.3. Rovinné broušení

Rovinné broušení se obvykle používá jako operace na čisto po předcházejícím frézování nebo hoblování, často se používá i místo frézování pro obrábění velmi tvrdých materiálů nebo materiálů s tvrdou kůrou. Rovinné plochy se brousí obvodem nebo čelem brousicího kotouče, doporučené pracovní podmínky jsou uvedeny v tabulce č.1.5.

Tab.1.5. Doporučené pracovní podmínky pro rovinné broušení

Druh práce		f_r [mm]	f_a [mm]	v_{ft} [m min ⁻¹]	
Obvodové	přímočarý pohyb stolu	hrubování	0,01 ÷ 0,04	(0,4÷0,7). b_s	8 ÷ 30
		na čisto	0,005 ÷ 0,010	(0,2÷0,3). b_s	15 ÷ 20
	otáčivý pohyb stolu	hrubování	0,005 ÷ 0,015	(0,3÷0,6). b_s	20 ÷ 60
		na čisto	0,005 ÷ 0,010	(0,20÷0,25). b_s	40 ÷ 60
Čelní	přímočarý pohyb stolu	hrubování	0,015 ÷ 0,040	---	4 ÷ 12
		na čisto	0,005 ÷ 0,010	---	2 ÷ 3
	otáčivý pohyb stolu	hrubování	0,015 ÷ 0,030	---	10 ÷ 40
		na čisto	0,005	---	

f_r - radiální posuv, f_a - axiální posuv, v_{ft} - tangenciální rychlost posuvu,
 b_s - šířka brousicího kotouče

Obvodové broušení

Broušení obvodem kotouče je nejpřesnější způsob broušení rovinných ploch, protože se pracuje s relativně úzkým kotoučem a obrobek se vlivem tepla vzniklého při broušení deformuje jen nepatrně. Tento způsob se používá zejména při broušení přesných rovinných ploch a dále při výrobě nástrojů, měřidel, přípravků atd., případně lze takto brousit i různé tvarové plochy.

Otáčky brousicího kotouče (n_s) odpovídají požadované řezné rychlosti v_c , obrobek vykonává pohyb otáčivý nebo přímočarý (častější varianta). V případě přímočarého pohybu vykonává obrobek podélný vratný pohyb tangenciální posuvovou rychlostí v_{ft} . V jedné nebo obou úvratích podélného zdvihu se stůl brusky (nebo brousicí kotouč) posune příčně (axiálně) vzhledem k obrobku o hodnotu f_a a po obroušení celé plochy se pomocí radiálního posuvu kotouče (f_r) opakovaně nastaví hloubka broušení, až do odebrání celkového přírůstku na broušení p .

Na bruskách s otáčivým pohybem součásti se obrábějí přesné čelní plochy, jako např. čela kotoučových fréz, okružních pil atd. Kromě toho se na nich dají brousit i plochy mírně kuželovité, např. čela u kotoučových fréz, jejichž šířka se směrem ke středu zmenšuje.

Čelní broušení

Broušení čelem kotouče není sice tak přesné jako broušení obvodem kotouče, je však mnohem výkonnější. Obrobek, podobně jako o obvodového broušení, může vykonávat pohyb otáčivý nebo přímočarý. Při přímočarém pohybu stolu se v sériové a hromadné výrobě brousí zejména menší součásti, např. čelní plochy ozubených kol, pístní kroužky, čela kroužků kuličkových ložisek atd.

Výkonné čelní broušení zajišťují speciální brusky se dvěma protilehlými brousicími kotouči. Německá firma Diskus vyrábí brusky s nuceným otáčivým pohybem obrobku, které mají dva protilehlé svíslé vřeteníky a jsou určeny pro současné oboustranné broušení součástí

se dvěma protilehlými rovnoběžnými rovinnými plochami ([tangenciální](#) broušení, [radiální](#) broušení, radiální broušení s [řízenou](#) rotací obrobků). Norská firma Lidköping vyrábí brusky se dvěma protilehlými [vodorovnými](#) vřeteny, které jsou určeny např. pro broušení kroužků a tělísek (válečků a jehel) valivých ložisek, písních čepů, komponentů převodových skříní, ozubených kol pro čerpadla a domácí spotřebiče, apod.

Při broušení čelem kotouče se pro větší průměry nejčastěji používají [segmentové hlavy](#). Mají několik předností - zejména vyšší využití brousícího materiálu, lepší odstraňování třísek, řezná kapalina má lepší přístup do místa broušení, styčné plochy nástroje s obrobkem jsou menší a broušená součást se méně zahřívá.

U rovinných brusek pracujících s celistvými kotouči se někdy vřetenem skloní k obráběné ploše o několik stupňů (max. o 4°), aby se zmenšila styčná plocha nástroje a součásti. Tím se zlepší řezné podmínky, ulehčí se odstraňování třísky a chlazení ale obrobená plocha vykazuje horší rovinnost.

1.1.5.4. Tvarové broušení

Mimo jednoduchých rovinných, válcových a kuželových ploch je nutné často brousit i tvarové povrchy, někdy i značně složitěho tvaru, např. u kotoučových nožů, [stopkových fréz](#), vrtáků ([obrázek-a](#), [obrázek-b](#)), šablon, nebo různých tvarových kalibrů. Takové tvary se brousí v podstatě dvěma způsoby:

- profilovými kotouči,
- kotouči s obvyklým tvarem, přičemž kopírovací pohyb vykonává pomocí šablony brousící kotouč nebo součást, příp. je tvar definován číslíkově v programových blocích a realizován pomocí [číslíkového řízení](#) (CNC brusky).

Pro tvarové broušení se používají jednoduché nebo speciálně upravené (kopirovací) hrotové brusky, dále brusky bezhroté, rovinné brusky s vodorovným vřetenem, speciální brusky a brusky řízené číslíkově. Obecné tvary na obvodu kotouče se pro přesné práce profilují orovnáváním pomocí [diamantu](#) upnutého v přípravku, jehož kopírovací palec se pohybuje po šabloně. Při méně přesných pracích se vytlačuje profil v brousícím kotouči ocelovými [kladkami](#). Přesné profily, tvořené kruhovými oblouky, se tvarují diamantem upevněným v otočných přípravcích (brusičských [kolébkách](#)).

1.1.6. Brousící nástroje

[Brousící nástroje](#) jsou tvořeny zrny [tvrdých materiálů](#) (brusiva - Al_2O_3 , SiC, diamant, [kubický nitrid boru](#)) pevně vázanými v tuhých či pružných tělesech různých velikostí a tvarů, jako jsou brousící, drážkovací a [řezací](#) kotouče, brousící tělíska ([Carborundum](#), [Cheil](#)), [segmenty](#) a pilníky, brousící a orovnávací [kameny](#), nebo jsou nanášena a zakotvena na brousících [pásech](#), plátnech a papírech. Z uvedených typů nástrojů jsou pro brousící operace nejčastěji používány brousící kotouče.

1.1.6.1. Standardní brousící kotouče

Nejčastěji užívanými materiály pro výrobu standardních brousících kotoučů jsou oxid hlinitý - Al_2O_3 (umělý korund, elektrit) a karbid křemíku - SiC (karborundum). Označování a identifikace vlastností těchto kotoučů jsou shodné - typ (tvar, 1), rozměry (2), materiál (3) a velikost brousících zrn (4), tvrdost (5) a sloh (6), pojivo (7), maximální obvodová rychlost (8) podle ČSN ISO 525 (22 4503):

1	2	3	4	5	6	7	8
1	300 x 50 x 76	A	36	L	5	V	35 m s⁻¹
Rozměry (2): vnější průměr - 300 mm, šířka - 50 mm, průměr upínací díry - 76 mm							

Tab.1.6. Specifikace označování standardních brousících kotoučů

Charakteristika	Vyjádření	Označení	
		ČSN 22 4501	ČSN ISO 525 (22 4503)
3 - Materiál brousících zrn	SiC černý	C 48	C
	SiC zelený	C 49	
	Al ₂ O ₃ bílý	A 99 B	A
	Al ₂ O ₃ barvený	A 99	
	Al ₂ O ₃ růžový	A 94	
	Al ₂ O ₃ manganový	A 98 M	
	Al ₂ O ₃ hnědý	A 96	
	Al ₂ O ₃ zirkonový	A 97 E	
	Al ₂ O ₃ mikrokrytalický	A 97 M	
	Al ₂ O ₃ polokřehký	A 97 P	
4 - Zrnitost	velmi hrubá	250, 200, 160	<i>není</i>
	hrubá	125, 100, 80, 63	4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 14, 16, 20, 22, 24
	střední	50, 40, 32, 25	30, 36, 40, 46, 54, 60
	jemná	20, 16, 12, 10	70, 80, 90, 100, 120, 150, 180
	velmi jemná	8, 6, 5	220, 240, 280, 320, 360, 400, 500, 600, 800, 1000, 1200
	zvlášť jemná	4, 3, M32, M22, M15	<i>není</i>
5 - Tvrdost	velmi měkký	G, H	<i>není</i>
	měkký	I, J, K	A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K
	střední	L, M, N, O	L, M, N, O, P, Q
	tvrdý	P, Q, R, S	R, S, T, U, V, W, X, Y
	velmi tvrdý	T, U	<i>není</i>
	zvlášť tvrdý	V, W, Z	
6 - Sloh (struktura)	velmi hutný	1, 2	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, atd.
	hutný	3, 4	
	polohutný	5, 6	
	pórovitý	7, 8	
	velmi pórovitý	9, 10	
	zvlášť pórovitý	11, 12, 13	
7 - Pojivo	keramické	V	V
	silikátové	S	<i>není</i>
	pryžové	R	R
	pryžové s výztuží	RF	RF
	umělá pryskyřice	B	B
	umělá pryskyřice s výztuží	BF, BF-Flex	BF
	šelakové	E	E
	magnezitové	Mg	Mg
	polyuretanové	U	<i>není</i>

Rozbor jednotlivých symbolů označování a základní doporučení pro použití standardních brousicích kotoučů:

1+2. **Typ (tvar) a rozměry kotouče** - viz vybrané příklady v tabulce č.1.7.

3. **Materiál brousicích zrn:** Volí se v závislosti na vlastnostech materiálu obrobku. Umělý korund je vhodný pro oceli, oceli na odlitky, temperované litiny a tvrdé bronzy. Karbid křemíku je vhodný pro šedé litiny, mosazi, měď, lehké kovy a jejich slitiny, slinuté karbidy, sklo a keramiku.

4. **Zrnitost brusiva:** Volí se podle předepsané drsnosti povrchu broušené součásti a materiálu, ze kterého je vyrobena. Čím menší je požadovaná drsnost povrchu obrobené plochy, tím je zrnitost jemnější. Pro větší úběry a při broušení měkkých a houževnatých materiálů (měď, mosazi, hliník) se volí hrubší zrnitost.

Označení zrnitosti koresponduje se světlostí ok třídících sít (udává se v počtu ok na jeden anglický palec = 25,4 mm). Čím větší je údaj zrnitosti, tím je kontrolní síto - a také zrno - jemnější. To je podstatná změna oproti označení podle ČSN 22 4501, kde byla zrnitost vyjadřována rozměrem brousicích zrn (číslo zrnitosti x 10 = střední rozměr zrna v μm).

5. **Tvrдость kotouče:** Tento údaj nelze chápat jako skutečnou tvrdost kotouče, vyjadřuje pouze míru houževnatosti a pružnosti pojivových můstků mezi jednotlivými zrny brusiva (soudržnost brousicího nástroje). Souvisí s tím uvolňování otupených brousicích zrn - u měkkých kotoučů je snadnější než u kotoučů tvrdých. **Tvrдость** se volí podle pravidla „čím tvrdší materiál obrobku, tím měkčí brousicí nástroj“.

6. **Struktura (sloh) kotouče:** Vyjadřuje vzdálenost mezi brousicími zrny, nebo také hutnost brousicího nástroje. Čím vyšší je číslo, tím je vzdálenost mezi zrny větší. Hutné brousicí materiály se volí na broušení tvrdých a křehkých materiálů. Na broušení houževnatých materiálů jsou vhodné kotouče pórovité. Zvláště pórovité kotouče slouží k broušení součástí, které se nesmí broušením příliš zahřívát.

7. **Pojivo kotouče:** Vytváří můstky mezi brousicími zrny a jeho vlastnosti významně ovlivňují tzv. „samoostření“ nástroje. Brousicí nástroje s keramickým pojivem mají univerzální použití, jsou ale křehké a citlivé vůči nárazům a bočnímu tlaku. Řezná kapalina jim neškodí a při dobrém skladování se jejich vlastnosti nemění.

Pevnost magnezitového pojiva se skladováním snižuje, škodí mu vlhko, kyselé i zásadité prostředí. Kotouče s tímto pojivem jsou křehké, používají se pro jemný vý brus bez tepelného ovlivnění součásti.

Nástroje s pojivem z umělé pryskyřice jsou méně citlivé vůči nárazům a bočním tlakům, zvláště kotouče se sklotextilní výztuží. Slouží k hrubování, broušení vnějších i vnitřních válcových ploch, rovinných ploch, řezání kovů, kamene a keramiky.

Kotouče s **pryžovým pojivem** se používají na jemné ostření nástrojů, broušení vnějších válcových ploch, jako tenké řezací kotouče, podávací kotouče u bezhrotého broušení a zvláště elastické nástroje pro čištění a leštění.

Nástroje s polyuretanovým pojivem jsou určeny pro jemné broušení a leštění. Kotouče s šelakovým pojivem se používají pro leštění kamene.

Upínání a vyvažování, bezpečnost práce

Standardní brousicí kotouče větších průměrů se na vřetenou brusku upínají pomocí upínacích **přírub**, ve kterých jsou nejčastěji upevněny mechanickým sevřením (případně jsou k přírubě přilepeny speciálním tmelem). Průměr obou přírub musí být stejný a má dosahovat nejméně 1/3 průměru brousicího kotouče. Mezi příruby a kotouč se z obou stran vkládají pružné podložky z pryže, kůže nebo papíru. Brousicí kotouče malých průměrů mají válcovou upínací stopku (**Carborundum**, **FAG**, **Cheil**), nebo jsou upínány **za díru**.

Tab.1.7. Označování tvaru a rozměrů standardních brousicích kotoučů

Typ	Vyobrazení	Název, základní rozměry
1		<p>Kotouče ploché D x T x H (Carborundum, FAG)</p>
2		<p>Kotouče prstencové D x T x W</p>
3		<p>Kotouče kuželové D/J x T/U x H</p>
4		<p>Kotouče oboustranně kuželové D/J x T/U x H</p>
5		<p>Kotouče s jednostranným vybráním D x T x H - P, F</p>
6		<p>Kotouče hrncovité D x T x H - W, E</p>
11		<p>Kotouče miskovité D/J x T x H - W, E</p>

Při vyšších nárocích na klidný chod vřetene brusky je třeba broušící kotouč vyvažovat. Odstředivé síly nevyváženého kotouče jsou zdrojem vynucených kmitů, které mají za následek zhoršení jakosti broušené plochy. Statické vyvažování broušícího kotouče se provádí na vyvažovacím [stojánku](#) přestavováním vyvažovacích tělísek v drážkách upínacích přírub.

Pro přesné broušení a pro větší obvodové rychlosti než $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ je třeba broušící kotouče se šířkou větší než 30 mm vyvažovat také dynamicky, na speciálním vyvažovacím zařízení, kde se eliminuje vliv momentových dvojic nevyvážených hmot. Některé brusky jsou již od výrobce vybaveny přídavným zařízením, kterým lze vyvážit kotouče za chodu brusky, přímo na vřetenu a to automaticky nebo poloautomaticky.

Aby bylo možné dosáhnout požadované vysoké hodnoty řezné rychlosti v_c , musí být frekvence otáčení (n_s) standardních broušících kotoučů rovněž vysoká. Při vysokých hodnotách n_s vznikají velké odstředivé síly, což může způsobit roztržení kotouče - jeho úlomky mají velkou kinetickou energii a mohou proto ohrozit, případně velmi vážně zranit obsluhujícího pracovníka. Z hlediska bezpečnosti a ochrany zdraví při práci je proto třeba při broušících operacích dodržovat tato základní pravidla:

1. Pracovní obvodová rychlost kotouče nesmí překročit povolenou hodnotu. U stojanových brusek při nestejně velkých kotoučích se počet otáček řídí podle kotouče většího průměru.
2. K upínání broušících kotoučů lze používat jen předepsaných přírub a podložek. Obě příruby musí mít stejný průměr.
3. Před upnutím se musí kotouč pečlivě prohlédnout, zda nemá trhlinky. Jasný zvuk při lehkém poklepu je důkazem, že kotouč nebyl dopravou poškozen. Hodí se zvláště pro kotouče s keramickým pojivem.
4. Broušící kotouč musí jít nasunout volně na hřídel - bez násilí.
5. Šrouby nebo matice upínacích přírub se musí přitahovat rovnoměrně, bez násilí.
6. Broušící stroje musí být opatřeny ochranným krytem, [stolní](#) a stojanové brusky též stavitelnou podpěrkou.
7. Vůle mezi podpěrkou a broušícím kotoučem se musí rovnat nejvíce polovině šířky broušeného materiálu, maximálně však 3 mm.
8. Před broušením je nutné nově upnutý kotouč vyzkoušet při chodu naprázdno, při pracovních otáčkách (nejméně po dobu 5 minut). Ochranný kryt i pracovní prostor brusky musí být přítom uzavřeny. Při této zkoušce musí obsluhující pracovník stát mimo rovinu rotace kotouče.
9. Broušící kotouče je dovoleno orovnávat jen zvláště k tomu určenými orovnávacími nástroji.
10. Při broušení i orovnávání broušících kotoučů je nutné používat ochranných brýlí.

1.1.6.2. Broušící kotouče ze supertvrdých materiálů

Základní tělesa broušících kotoučů ze supertvrdých materiálů (diamant, kubický nitrid boru) jsou vyrobeny z oceli, nebo častěji (z důvodu snížení hmotnosti) z hliníkové slitiny. Vlastní funkční vrstva má obvykle pouze malou tloušťku a podle typu kotouče je vytvořena na jeho obvodu, čele, ([Urdiamant](#), Norton - [obr.1](#), [obr.2](#)), nebo jiné [funkční ploše](#). Jednotlivá broušící zrna jsou ve funkční vrstvě vázána pojivem, které může být kovové (většinou bronz, někdy litina, případně [galvanicky](#) vytvořená tenká vrstva kovu) nebo pryskyřičné.

K nejdůležitějším charakteristikám těchto broušících kotoučů patří tvar kotouče a jeho základní rozměry, typ pojiva, druh a velikost zrn brusiva a jeho koncentrace ve funkční vrstvě nástroje. Značení není u jednotlivých výrobců zcela shodné, většinou ale obsahuje všechny výše uvedené údaje. Český výrobce, Urdiamant s.r.o., Šumperk, používá následující značení:

1	2	3	4	5	6	7
1 - 150 - 10/2	B - VIII	D 107	K 100	10000/min		

Rozbor jednotlivých symbolů označování a základní doporučení pro použití brousících kotoučů ze supertvrdých materiálů:

- Typ (tvar) kotouče:** 1 - [hrncovitý](#) (více variant), 2 - [plochý](#) (více variant), 3 - [čelní plochý](#), 4 - [obvodově čelní](#), 6 - [miskovitý](#) (více variant), 7 - [talířovitý](#), 8 - [kuželový](#) (mnoho různých variant), 11 - [miskovitý hluboký](#) (více variant), 12 - [hrncovitý obvodový](#), atd.
- Rozměry kotouče:** D-W/X (hrncovitý, čelní plochý, miskovitý, talířovitý, kuželový, miskovitý hluboký), D-T/X (plochý), D-W/U (obvodově čelní), D-X/U (hrncovitý obvodový).
- Pojivo:**

Pryskyřičné: (B-I až B-XVII, čím je číslo vyšší, tím vyšší je tvrdost pojiva): Je nejpoužívanějším pojivem, protože se vyznačuje vysokou produktivitou broušení, nízkým vývinem tepla a dobrými samoostřicími vlastnostmi. Používá se s chlazením, za určitých podmínek lze kotouče s tímto pojivem použít i bez chlazení (úzká brousící vrstva, nižší obvodová rychlost, přítlak, posuv, krátký strojní čas, nižší koncentrace, apod.).

Bronzové: (BZ-1 až BZ-8, vyšší číslo = vyšší tvrdost pojiva) - pro broušení slinutých karbidů; BZ-S pro broušení keramiky, skla a porcelánu; EB-V pro elektrolytické broušení.

Kovové: SKM - velmi tvrdé pojivo pro broušení děr (nízké hodnoty řezné rychlosti v_c jsou eliminovány vysokou tvrdostí pojiva a koncentrací brusiva).

Galvanické: Ni - používá se všude tam, kde nelze použít klasické technologie výroby brousících kotoučů (většinou se jedná o tvarově složitě nástroje). Brusivo v jedné vrstvě je ukotveno k ocelovému tělesu galvanicky nanášeným povlakem niklu. K výhodám kotoučů s galvanickým pojivem patří vysoký brousící výkon, nízké pořizovací náklady, vysoká stálost tvaru a nízký vývin tepla. Nevýhodou je malá životnost daná pouze jednou tenkou vrstvou brusiva.
- Druh brusiva:** D - funkční vrstva kotouče obsahuje diamantová zrna, B - funkční vrstva kotouče obsahuje zrna kubického nitridu boru.

Diamant ([General Electric](#), [Nářadí Praha](#)) je kubickou modifikací uhlíku, má nízkou měrnou hmotnost ($3,52 \text{ g cm}^{-3}$) vysokou tvrdost (nejtvrdší známý materiál), dobrou tepelnou vodivost, ale poměrně nízkou tepelnou odolnost (do 860 °C), za normální teploty je odolný vůči všem chemickým vlivům. Z důvodů afinity k železu (za vysokých teplot) není vhodný pro obrábění ocelí, velmi úspěšně se však využívá při broušení tvrdých a křehkých materiálů jako jsou slinuté karbidy, keramika, sklo, kámen apod.

Kubický nitrid boru je syntetický materiál (nevyskytuje se, na rozdíl od diamantu, v přírodní formě), který se vyrábí za vysokých tlaků a teplot z hexagonálního nitridu boru. Má obdobné vlastnosti jako diamant (o něco nižší tvrdost, vyšší chemickou stálost a tepelnou odolnost - $1100 \text{ až } 1200 \text{ °C}$, měrná hmotnost je $3,48 \text{ g cm}^{-3}$). Používá se hlavně pro broušení zušlechťených kalených ocelí, včetně nástrojových ocelí.
- Zrnitost brusiva:** Je uváděna podle normy ISO 6106, číslo udává střední velikost zrn v μm . Podle dříve používané normy ČSN 22 4015 byla zrnitost udávána ve formě zlomku, např. 250/200 (odpovídá hodnotě 251 podle ISO 6106), kde v čitateli je horní a ve jmenovateli dolní mezní rozměr zrna v μm . Zrnitost mikrometrových diamantových prášků je uvedena v tabulce číslo 1.8.
- Koncentrace brusiva:** Je vyjádřena hmotnostním podílem zrn brusiva v 1 cm^3 funkční vrstvy kotouče. Označuje se čísly 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200, se kterými korespondují hodnoty koncentrace 0,22; 0,44; 0,66; 0,88; 1,10; 1,32; 1,54; $1,76 \text{ g cm}^{-3}$. Nízká koncentrace (používá se pro zvláštní operace) zaručuje dobré samoostřicí vlastnosti kotouče, zvyšuje výkon broušení, snižuje vývin tepla, snižuje životnost kotouče, zhoršuje stálost tvaru, zvyšuje drsnost povrchu. Střední koncentrace se používá ve většině brousi-

cích operací. *Vysoká koncentrace* (typická pro úzké funkční vrstvy, používá se pro broušení děr a tvarových ploch) zvyšuje životnost kotouče, zlepšuje stálost tvaru, snižuje drsnost povrchu, snižuje výkon broušení, zhoršuje samoostřicí vlastnosti kotouče, zvyšuje vývin tepla.

7. **Maximální otáčky** broušicího kotouče.

Tab.1.8. Zrnitost mikrometrových diamantových prášků

Ozn.	D27	D20	D15	D10	D7	D6	D3	D2	D1	D0,7
μm	28÷40	20÷28	14÷20	10÷14	7÷10	5÷7	3÷5	2÷3	1÷2	0÷1

1.1.7. Broušící troje - brusky

Hrotové brusky se využívají k broušení rotačních ploch na obrobkách upnutých mezi hroty. Nejrozšířenějším provedením jsou univerzální hrotové brusky, používané pro broušení válcových, kuželových a čelních ploch a případně pro broušení děr ([2UD](#), [Cetos BU25H](#), [Studer - S20, S30, S31, S32, S33, S36, S40](#), [Tacchella ASI 16-20 CNC](#), [obr.1](#)). Na zadní části stojanu je otočně uložen broušící vřeteník, což umožňuje broušení strmých kuželů. Proti vřeteníku je na stojanu umístěno lože, po jehož vedení se v podélném směru pohybuje stůl s pracovním vřeteníkem a koníkem. Horní část stolu je možno natáčet, což se využívá při broušení táhlých kuželů. Pomocí [speciálního vřetena](#) je možno brousit také díry v obrobkách upnutých ve sklíčidle.

Bezhruté brusky nevyžadují žádná zařízení pro upínání obrobku. Jsou konstruovány nejčastěji pro vnější broušení, ale také v menším rozsahu pro vnitřní broušení rotačních ploch. Bezhruté brusky pro broušení vnějších ploch ([Bocca & Malandrone Sunebo R50/e CF I](#), [Lidköping CL660](#), [Loeser RP+S 377 Heavy Duty](#)) umožňují zápichové a průběžné broušení. Mají dva vřeteníky - broušící vřeteník, na jehož vřetenu je [broušící kotouč](#) a vřeteník podávacího kotouče (má menší průměr - [obr.1](#), [obr.2](#)).

Každý vřeteník má vlastní náhon, broušící vřeteno má konstantní otáčky, vřeteno podávacího kotouče má otáčky měnitelné. Podávací vřeteník lze přestavovat po vedení lože a nastavit tak požadovaný průměr broušení. Natáčením podávacího vřeteníku se nastavuje mimořádnost os obou kotoučů pro vyvození axiálního pohybu obrobku při průběžném broušení. Bezhruté brusky se obvykle využívají v sériové výrobě, kde mohou pracovat v automatickém pracovním cyklu.

Brusky na díry jsou vyráběny a dodávány jako sklíčidlové, planetové a bezhruté. Významným představitelem těchto strojů je sklíčidlová bruska na díry. Obrobek se upíná do sklíčidla pracovního vřeteníku uloženého na příčných saních, které umožňují nastavení obrobku proti broušícímu kotouči na požadovaný průměr. Broušící vřeteno má vlastní elektromotor a vykonává axiální posuvový pohyb. U větších brusek je pracovní vřeteník umístěn na podélném stole, který umožňuje axiální posuv obrobku vzhledem k broušícímu kotouči. Broušící vřeteník je v tomto případě uložen na příčných saních a vykonává pohyb v radiálním směru. Zvláštní variantu konstrukce s vysokou automatizací pracovního cyklu představují brusky na vnitřní oběžné dráhy kroužků valivých ložisek.

Vodorovné rovinné brusky jsou určeny pro broušení rovinných ploch a jsou charakterizovány vodorovnou osou broušícího vřetena. Obrobky se nejčastěji upínají na elektromagnetickou [desku](#) umístěnou na pracovním stole. Pracovní stůl vykonává přímočarý vratný nebo otáčivý pohyb. Nejrozšířenějším představitelem rovinných brusek jsou brusky s přímočarým vratným pohybem ([Cetos BPH300](#), [Okamoto](#), [Rosa RTRC 4000](#), [aba z&b Twinmaster](#)).

Používají se v kusové a malosériové výrobě s vyššími požadavky na přesnost broušených ploch. Broušící vřeteník je svisle přestavitelný. Na stojanu stroje je vedení pro příčné saně, na nichž se v podélném směru pohybuje stůl, jehož rychlost je možné plynule měnit. Velikost stroje je charakterizována [šířkou](#) pracovního stolu.

Svislé rovinné brusky jsou charakterizovány svislou osou broušícího vřetená a vysokými výkony broušení, avšak horšími parametry přesnosti a drsnosti obrobené plochy (ve srovnání s vodorovnými rovinnými bruskami). Vyrábějí se i brusky s [otáčivým](#) stolem, typickým představitelem těchto strojů je však bruska s [přímočarým](#) vratným pohybem stolu.

Broušící vřeteník je posuvný po stojanu. Pracovní stůl uskutečňuje pouze přímočarý vratný pohyb, takže průměr broušícího kotouče musí být větší než je šířka broušené plochy. Broušící kotouč se zpravidla skládá z jednotlivých [segmentů](#) (umožňuje větší úběry než prstencový kotouč). Obrobky se podobně jako u vodorovných brusek obvykle upínají na magnetickou desku, umístěnou na pracovním stole.

Speciální brusky Do této skupiny se zařazují brusky se speciálním technologickým zaměřením. Patří sem brusky na ostření [nástrojů](#) (Rollmatic - [CNC148P4](#), [Microgrind 2000X](#), 620XS - [obr.1](#), [obr.2](#)), brusky pro broušení závitů, brusky na broušení ozubení (Gleason - [400 GX CNC](#), [P600G](#) [P800G](#), [P800G](#) [P2800G](#), [Maag](#), [Reishauer](#)), brusky pro broušení [klikových hřídelí](#), brusky na broušení [vačkových hřídelí](#), souřadnicové brusky ([Hauser S40-CNC314](#)), apod.

1.2. HONOVÁNÍ

Honování je dokončovací metoda obrábění, při které se obráběný materiál odebírá abrazivním účinkem brusiva honovacích kamenů a lišt ([Cheil](#), [Gehring](#)) nebo [kartáčků](#), upevněných v honovací hlavě, případně [tělísek](#) nebo vláken (Osborn - [obr.1](#), [obr.2](#), [obr.3](#), [obr.4](#)), nesených tenkou válcovou stopkou (může být vytvořena jako pružná, ze stočených drátů). Honování se nejčastěji používá pro dokončování vnitřních válcových ploch, méně často se honují vnější válcové plochy. Honovat lze válcové díry průchozí i neprůchozí, s drážkami různých tvarů a velikostí v rozsahu průměrů 1 až 750 mm a délek až 24 m a s přídatným zařízením i kuželové díry.

Honováním se dokončují hydraulické, pneumatické a brzdové válce, válce spalovacích motorů ([obr.1](#), [obr.2](#), [obr.3](#)), [kliková ložiska](#) motorových bloků a ojnic ([video](#), [detail](#)), bubny, pouzdra, ložiska vřeten, ozubená kola ([Gleason ZH 200](#)), apod. Honovat lze kalené i nekalené oceli, litiny, hliníkové slitiny, neželezné kovy, slinuté karbidy, tvrdé povlaky a další materiály. Podle požadované přesnosti honovaného povrchu se rozlišuje honování:

- **jednostupňové** (jeden nástroj pro hrubovací i dokončovací honování, pro dokončování se buď sníží tlak p_k nebo se zmenší úhel 2α),
- **dvoustupňové** (použije se jeden nástroj s hrubší zrnitostí pro hrubování a jeden jemnozrný pro dokončování).

Pro zvýšení úběru lze využít **elektrolytické honování**, při kterém se místo řezné kapaliny používá vhodný elektrolyt. Příklad na honování je až z 90% odebírán elektrolytickým rozpouštěním, zbytek je odstraňován abrazivním účinkem honovacích kamenů.

Vibrační honování probíhá za podmínek, kdy se na posuvový nebo rotační pohyb nástroje superponuje kmitavý pohyb o amplitudě 1 až 10 mm a frekvenci až 1500 Hz. Tento způsob honování zaručuje vyšší jakost obrobeného povrchu.

Firma Gehring uvádí na své internetové stránce i netradiční metodu **honování pomocí laserového paprsku** ([obrázek](#), [video](#)).

Princip honování spočívá v broušení jemným brusivem při malých řezných rychlostech, s intenzivním využitím řezných kapalin. Při vnitřním honování vykonávají honovací kameny v díře složený šroubovitý pohyb, který je tvořen kombinací rotačního pohybu honovací hlavy obvodovou rychlostí v_c a jejího přímočarého vratného pohybu ve směru osy honované díry posuvovou rychlostí v_f . Dráhy zrn brusiva se přitom překrývají a na honovaném povrchu se objevují charakteristické křížové stopy, které svírají úhel 2α . Hodnota úhlu α (doporučený rozsah 20° až 55°) závisí na posuvové rychlosti v_f a řezné rychlosti v_c , přičemž platí: $\tan \alpha = v_f/v_c$. Při větších úhlech je výsledná drsnost povrchu obrobené plochy nižší.

Řezné podmínky honování (tab.1.9) jsou ovlivňovány především obráběným materiálem, výchozími a požadovanými parametry přesnosti tvaru a drsnosti povrchu, použitým brusivem, průměrem díry a přídavkem na honování (tab.1.10).

Honování zajišťuje velmi vysokou jakost povrchu obrobené plochy (tab.1.11) - nízké hodnoty amplitudových parametrů drsnosti (R_a , R_q , R_z , atd.), vysoké hodnoty nosného podílu (až 90%), i vysokou přesnost geometrického tvaru (kruhovitost, válcovitost, kuželovitost). Pro dosažení přesného tvaru je důležité, aby byla správně nastavena velikost náběhu a přeběhu honovacích kamenů (1/4 až 1/3 délky kamene) přes okraje obráběné díry. Malý (velký) přeběh má za následek vznik vypouklého (vydutého) soudkovitého tvaru, při nestejném náběhu a přeběhu vznikne díra kuželovitá. Při honování slepých děr je třeba upravit kinematiku honovací hlavy, nebo použít honovací kameny, které mají v okrajové části vyšší tvrdost.

Tab.1.9. Doporučené hodnoty řezných podmínek pro honování

Materiál	Operace	Brusivo					
		diamant, KNB			Al ₂ O ₃ , SiC		
		v_c [m min ⁻¹]	v_f [m min ⁻¹]	P_k [MPa]	v_c [m min ⁻¹]	v_f [m min ⁻¹]	P_k [MPa]
Nekalené oceli	hrubování	25 ÷ 35	6 ÷ 12	0,4 ÷ 0,6	15 ÷ 30	8 ÷ 12	0,4 ÷ 0,8
	dokončování		3 ÷ 8	0,2 ÷ 0,4	10 ÷ 30	5 ÷ 7	0,2 ÷ 0,4
Kalené oceli	hrubování	40 ÷ 50	5 ÷ 8	0,8 ÷ 1,4	20 ÷ 40	5 ÷ 8	1,0 ÷ 1,5
	dokončování	40 ÷ 55	4 ÷ 6	0,4 ÷ 0,8	20 ÷ 30	4 ÷ 7	0,6 ÷ 1,0
Šedé litiny	hrubování	50 ÷ 80	15 ÷ 18	0,8 ÷ 1,2	40 ÷ 80	17 ÷ 22	0,8 ÷ 1,0
	dokončování	40 ÷ 70	8 ÷ 12	0,4 ÷ 0,6	30 ÷ 50	8 ÷ 15	0,3 ÷ 0,5
Kalené šedé litiny	hrubování	50 ÷ 80	16 ÷ 18	1,3 ÷ 1,5	50 ÷ 80	15 ÷ 20	0,8 ÷ 1,4
	jemné hon.	45 ÷ 70			50 ÷ 60	12 ÷ 16	0,8 ÷ 1,2
	dokončování	40 ÷ 50	12 ÷ 16	0,5 ÷ 0,9	40 ÷ 50	8 ÷ 12	0,6 ÷ 0,8
Bronzy	dokončování	---			40 ÷ 70	4 ÷ 8	0,3 ÷ 0,5
Al slitiny s tvrdými povlaky	dokončování	20 ÷ 25	10 ÷ 12	0,3 ÷ 0,4	---		

Tab.1.10 Přídavky na honování

Průměr díry [mm]	Velikost přídavku na průměr [mm]	
	oceli	litiny
20 ÷ 50	0,01 ÷ 0,02	0,02 ÷ 0,04
50 ÷ 100	0,015 ÷ 0,030	0,02 ÷ 0,06
100 ÷ 200	0,02 ÷ 0,05	0,04 ÷ 0,08
200 ÷ 300	0,025 ÷ 0,080	0,06 ÷ 0,16
300 ÷ 500	0,04 ÷ 0,12	0,12 ÷ 0,25

Tab.1.11. Dosahovaná přesnost honování vnitřních rotačních ploch

Honování	Přesnost rozměrů IT		Drsnost povrchu Ra [μm]	
	střední	rozsah	střední	rozsah
hrubovací	7	6 ÷ 8	0,4	0,2 ÷ 0,8
jemné	6	5 ÷ 7	0,2	0,1 ÷ 0,2
dokončovací	4	3 ÷ 5	0,1	0,05 ÷ 0,10

Řezné (procesní) kapaliny mají při honování významný vliv nejen na produktivitu procesu ale i na dosahovanou jakost obrobené plochy. Odebírají vzniklé teplo, snižují řezné síly a odpory, ale především vyplachují oblast řezání a odvádějí částičky třísky, brusiva i pojiva z pórů honovacích kamenů, čímž udržují jejich řezivost. Pro dosažení vysokého úběru při honování kalených ocelí se volí kapaliny s menší viskozitou, kapaliny s větší viskozitou zaručují lepší drsnost povrchu obrobené plochy. Pro jednotlivé obráběné materiály jsou doporučovány tyto řezné kapaliny:

- petrolej nebo petrolej s přídavkem 10% až 20% strojního oleje - pro litiny a kalené oceli,
- petrolej nebo petrolej s přídavkem 2% až 25% oleinu (olejové kyseliny) nebo vřetenového oleje - pro měkké oceli,
- voda nebo pěti- až desetiprocentní emulze - pro bronzy,
- organické oleje - hliníkové slitiny.

Honovací nástroje

Standardní honovací hlava ([schéma](#), Gehring - [obr.1](#), [obr.2](#)) má sadu radiálně stavitelných honovacích kamenů, které jsou v rovnoměrných roztečích ustaveny po jejím obvodu (do průměru hlavy $D=50$ mm 2 až 3 kameny, $D=100\div 300$ mm 6 až 10 kamenů, $D>300$ mm 12 kamenů), celková šířka všech kamenů dosahuje 0,15 až 0,35 obvodu hlavy. Pro honování děr s drážkami musí šířka honovacích kamenů větší než je šířka dvou drážek. Kameny jsou k povrchu honované díry přitlačovány určitým tlakem p_k [MPa], který tvoří součást řezných podmínek. Mechanismus honovací hlavy umožňuje malý radiální posuv kamenů a regulaci tlaku p_k mezi kameny a honovaným povrchem na mechanickém, hydraulickém nebo pneumatickém principu.

Honovací kameny jsou vyráběny z Al_2O_3 (pro obrábění kalených ocelí) nebo z SiC (pro obrábění měkkých ocelí, litin, slitin Al a slitin Cu). Pojivo honovacích kamenů je obvykle keramické, pro velmi jemné honování pryskyřičné (bakelitové). Pro vysoké požadavky na kvalitu honovaných děr se používají kameny ze syntetického diamantu a kubického nitridu boru ([Gehring](#)). Pojivo diamantových kamenů bývá nejčastěji kovové.

Honovací stroje

Honovací stroje se vyrábějí v širokém rozsahu provedení a rozměrů, podle velikosti a počtu honovaných součástí. Podle polohy vřeten se rozlišují stroje *svislé* ([Belden H5000](#)) a *vodorovné* (Gehring HH - [obr.1](#), [obr.2](#), [obr.3](#), [video](#)), podle počtu vřeten jsou to stroje *jednovřetenové* ([Sunnens CV-616](#)) a *vícévřetenové* (Gehring - [P2-200](#), [typ Z](#), [typ P-\[obr.1\]\(#\)](#), [typ P-\[obr.2\]\(#\)](#), [2xP3-350](#), [P4-350-\[obr.1\]\(#\)](#), [P4-350-\[obr.2\]\(#\)](#), [M4-40-12](#)), nejčastěji používané jsou svislé jednovřetenové stroje. Vykazují různý stupeň automatizace pracovního cyklu, při automatickém řízení pracovního cyklu je stroj vybaven systémem aktivní kontroly.

Ustavení obrobku a honovací hlavy musí zabezpečit částečnou nebo plnou vzájemnou vazbu polohy obráběného povrchu a aktivního povrchu kamenů hlavy. Toho lze dosáhnout dvěma nebo čtyřmi stupni volnosti upnutí obrobku nebo nástroje. Pokud je hlava pevně upnutá ve vřetenu stroje, musí mít obrobek dva stupně volnosti (volný pohyb v rovině kolmé na

osu díry a rovinně kolmé na osu vřetena), přičemž ustavovací plocha obrobku musí být rovněž kolmá k ose obráběné díry.

Při honování děr v těžkých a rozměrných součástech, u nichž nelze realizovat volný pohyb (např. bloky válců spalovacích motorů), je honovací hlava vedena obráběnou dírou a krouticí moment se na ni přenáší z vřetene stroje hnacím hřídelí s jedním (při nesouososti díry a vřetena menší než 0,03 až 0,05 mm), nebo dvěma klouby (při větší nesouososti).

1.3. LAPOVÁNÍ

Lapování je dokončovací metoda obrábění, kterou se dosahuje nejvyšší rozměrové přesnosti a nejmenší drsnosti povrchu obrobené plochy (tab.1.12). Používá se pro dokončování vnějších i vnitřních rovinných, válcových a tvarových ploch. Lapují se funkční plochy měřidel (např. koncové měrky, kalibry), důležitá závitová spojení, ozubení, součásti motorů automobilů apod. Lapováním lze dokončovat měkké i tvrdé materiály, ručně v kusové výrobě (s použitím lapovacích past) nebo strojně v sériové a hromadné výrobě.

Tab.1.12. Dosahovaná přesnost lapování rovinných a vnitřních rotačních ploch

Lapování	Přesnost rozměrů IT		Drsnost povrchu Ra [μm]	
	střední	rozsah	střední	rozsah
hrubovací	4	3 ÷ 5	0,2	0,16 ÷ 0,40
jemné	2	1 ÷ 3	0,1	0,08 ÷ 0,16
velmi jemné			0,03	0,01 ÷ 0,04

Tab.1.13 Brusivo pro lapování

Lapovaný materiál	Brusivo
Oceli	umělý korund - Al_2O_3
Litiny, keramika, sklo	karbid křemíku - SiC
Zvláště tvrdé materiály (SK, RO)	karbid boru - B_4C , kubický nitrid boru, diamant
Měkké materiály	oxid železitý - Fe_2O_3 oxid chromitý - Cr_2O_3 vídeňské vápno - CaMgCO_3 hydroxid železitý - $\text{Fe}(\text{OH})_3$

Tab.1.14. Složení lapovacích past

Druh brusiva		Al_2O_3		SiC	Cr_2O_3		
Zrnitost		1200 - 70	150 - 36	180 - 150	36	100	220
Obsah složek [%]	brusivo	70	50 ÷ 70	60	81	76	74
	kyselina olejová	20	20 ÷ 27				2
	kyselina stearová	8	8 ÷ 17		10		
	tuhá kyselina křemičitá				2		1,8
	zmýdelněný tuk			38	5	10	
	bikarbonát sodný						0,2
	petrolej	2	2 ÷ 6		2		

Tab.1.15. Řezné podmínky pro lapování

Typ plochy a lapovaný materiál	Ope- race	Brusivo		Přídavek	Tlak	Řezná rychlost
		Druh	Zrnitost	[μm]	p_k [MPa]	v_c [m min^{-1}]
Rovinné plochy, kalené oceli	1	Al_2O_3	25	30 ÷ 60	0,13 ÷ 0,15	30 ÷ 60
	2		8	10 ÷ 15	0,12 ÷ 0,15	15 ÷ 30
	3		4	5 ÷ 7	0,10 ÷ 0,12	10 ÷ 15
			3	1 ÷ 3	0,08 ÷ 0,10	7 ÷ 10
Vnější válcové plo- chy, bronzы	1	Cr_2O_3	40	20 ÷ 30	0,02 ÷ 0,03	20 ÷ 30
	2		8	10 ÷ 15	0,010 ÷ 0,015	10 ÷ 15
	3		4	3 ÷ 5	0,010 ÷ 0,015	
1 - hrubovací lapování, 2 - jemné lapování, 3 - velmi jemné lapování						

Lapování je zvláštní druh velmi jemného broušení, při němž k úběru materiálu dochází [volným brusivem](#), které se přivádí mezi vzájemně se pohybující lapovací nástroj a obrobek (u měkkých lapovacích nástrojů mohou být zrna brusiva zamačkána nebo jinak upevněna v lapovacím nástroji).

Z technologického hlediska se lapování rozděluje na hrubovací, jemné a velmi jemné. Při hrubovacím lapování dochází k odřezávání nerovností a výstupků obráběného povrchu velkým počtem zrn brusiva. Při velmi jemném lapování dochází k plastické deformaci povrchové vrstvy lapované plochy. Doporučená brusiva, složení lapovacích past a řezné podmínky jsou pro vybrané případy uvedeny v tabulkách 1.13, 1.14 a 1.15.

Nevýhodou lapování je velká pracnost, malá produktivita a vysoké náklady na jednotku plochy v porovnání s ostatními dokončovacími metodami obrábění. Proto se lapování nahrazuje (kde to je možné z hlediska požadované přesnosti a drsnosti povrchu) honováním nebo superfinišováním.

Lapovací nástroje

Lapovací nástroje mají negativní tvar lapovaných ploch, nosným médiem pro brusivo je buď kapalina (nejčastěji petrolej s přísadou oleje a 3÷5% oleinu) nebo pasta (tab. 1.14). Vyrábějí se z jemnozrné perlitické nebo feritické litiny, z mědi, měkké oceli, olova, plastických hmot apod. Pro velmi jemné lapování se používají také nástroje z kalené oceli nebo tvrdě chromované nástroje. Při ručním lapování se používají lapovací desky pro lapování rovinných ploch, lapovací trny pro lapování děr a lapovací prstence pro lapování vnějších válcových ploch.

Pro strojní lapování se pro rovinné plochy používají litinové [lapovací kotouče](#) nebo brousící kotouče s brusivem vázaným keramickým pojivem. Pro vnější rotační plochy se používá bezhrotý zapichovací nebo průběžný způsob, kdy nástrojem je kotouč s brusivem v keramické vazbě.

Lapovací stroje

Lapovací stroje (Peter Wolters microLine - [obr.1](#), [obr.2](#), [Stahli DLM 705](#), [Somos](#), [Lapmaster](#)) jsou buď **univerzální**, pro lapování rovinných i válcových ploch, nebo **speciální**, pro lapování určitého druhu ploch - boky zubů kol, čepy klikových hřídelí, valivá tělíska valivých ložisek apod. Pro lapování vnějších válcových a rovinných ploch se používají dvoukotoučové lapovací stroje se svislými osami lapovacích kotoučů. U typického představitele těchto strojů jsou otáčky obou kotoučů různé. Hnací kotouč je výkyvný, takže jeho funkční plocha se může ustavit do roviny rovnoběžné s plochou dolního kotouče. Mezi oběma kotouči jsou

vloženy unášecí desky s otvory přizpůsobenými tvaru lapovaných součástí ([schéma](#), [obr.1](#), [obr.2](#), [obr.3](#), [obr.4](#), [obr.5](#)). Unášecí desky jsou poháněny, aby se lapované součásti pohybovaly po takových drahách, které pokrývají celý povrch lapovacího kotouče (kvůli rovnoměrnému opotřebenému kotouče). Pro lapování děr se používají stroje se svislým pracovním vřetenem, pro dlouhé otvory stroje s pracovním vřetenem vodorovným.

1.4. SUPERFINIŠOVÁNÍ

Superfinašování je vysoce produktivní metoda dokončovacího obrábění vnějších a vnitřních rotačních, tvarových a rovinných ploch s vysokou přesností a nízkou drsností povrchu (tab.1.16, [obrázek](#)). Nejčastěji se uplatňuje při dokončování valivých ložisek a součástí v automobilovém průmyslu. Superfinašovat lze součásti z kalených i nekalených ocelí, slitin těžkých kovů, litin a plastů.

Tab.1.16. Dosahovaná přesnost superfinašování vnějších rotačních ploch

Superfinašování	Přesnost rozměrů IT		Drsnost povrchu Ra [μm]	
	střední	rozsah	střední	rozsah
dokončovací	4	3 ÷ 5	0,2	0,05 ÷ 0,40
jemné	3	2 ÷ 4	0,05	0,025 ÷ 0,100

Superfinašování je zvláštní druh broušení, při němž se z dokončovaného povrchu odřezávají vrcholky nerovností abrazivním účinkem velmi jemných zrn superfinašovacích kamenů. Superfinašování je charakterizováno malými řeznými rychlostmi a kmitavým (oscilačním) pohybem superfinašovacího nástroje, přitlačovaného silou F na obráběnou plochu (síla vytváří požadovaný tlak p_k). [Řezný pohyb](#) při superfinašování vzniká superpozicí rotačního pohybu součásti s obvodovou rychlostí $v_c=10\div 80$ m min⁻¹ a kmitavého přímočarého posuvového pohybu superfinašovacího nástroje (je zpravidla kolmý na směr rotačního pohybu součásti) s frekvencí $\omega_k=500\div 3000$ min⁻¹. Amplituda zdvihu nástroje H se pohybuje v rozsahu 0,1÷10 mm. Rychlost posuvového pohybu v_f se určí podle vztahu $v_f = H \cdot \omega_k / 1000$ a volí se v rozsahu 2÷15 m min⁻¹. Superfinašovací kameny (1až 4) jsou na obráběnou plochu přitlačovány tlakem $p_k=0,1\div 0,4$ MPa, který během superfinašování neustále klesá (v důsledku zvyšování hodnoty nosného podílu povrchu obrobené plochy) tak, že kameny začnou „plavat“ na vrstvě procesní kapaliny a řezný proces se tak v určitém okamžiku automaticky zastaví, přestože pracovní pohyby neustanou. Pokud by v této fázi nedosáhl obrobený povrch požadovaných parametrů, může superfinašovací proces pokračovat, je ale nutné zvýšit přitlačnou sílu F , aby se tlak p_k znovu zvýšil hodnotu, při které jsou zrna brusiva schopna odebírat třísky z obráběného materiálu.

Největšího úběru se dosáhne při $\alpha=40\div 60^\circ$, ale obrobený povrch je matný. Při úhlech $\alpha < 40^\circ$ se snižuje řezivost kamenů a povrch získá vysoký lesk. Jako procesní kapalina se nejčastěji používá petrolej, směs petroleje s 10 až 15 % minerálního oleje nebo různé oleje s aditivy. Pro jemné superfinašování (dosažení vysokého lesku) a měkkí materiály jsou vhodné kapaliny s vyšší viskozitou (oleje), pro větší úběry kapaliny s nižší viskozitou (např. petrolej).

Průběh superfinašování ovlivňuje především rychlost posuvového pohybu (v_f), obvodová rychlost obrobku (v_c), velikost tlaku (p_k) a viskozita procesní kapaliny. Superfinašování má hrubovací a lešticí fázi, pro které je důležitý poměr rychlosti kmitavého pohybu nástroje a obvodové rychlosti obrobku, který určuje úhel křížení drah zrn brusiva 2α (podobně jako u honování platí $\text{tg } \alpha = v_f/v_c$).

Operaci superfinišování obvykle předchází broušení, případně jemné soustružení nebo vyvrtávání. Výchozí parametry plochy, která má být obráběna superfinišováním, jsou rozhodující pro volbu rezných podmínek (tab.1.17).

Tab.1.17. Řezné podmínky a přídavky pro superfinišování

Drsnost povrchu R_a [μm]		Přídavek [μm]	Operace	Úhel křížení stop 2α [$^\circ$]	Poměr v_w/v_k
požadovaná	výchozí				
0,16	1,6	10 ÷ 12	1	80 ÷ 110	0,8 ÷ 1,2
0,08	0,8	5 ÷ 8	2	40 ÷ 70	1,5 ÷ 2,5
0,04	0,4	4 ÷ 5	3	20 ÷ 40	3 ÷ 12
0,02	0,2	2 ÷ 3	4	< 20	12 ÷ 28

1,2 - hrubovací fáze superfinišování, 3,4 - jemné superfinišování (volí se podle výchozí drsnosti)

Superfinišovací nástroje

Superfinišovací kameny ([FAG](#), [Cheil](#)) jsou vyráběny z Al_2O_3 , s keramickou, nebo bakelitovou vazbou (pro obrábění ocelí), nebo z SiC , pro obrábění litin a ocelí nižších pevností, korozivzdorných ocelí, nezelezných kovů a slitin. Pro obrábění vysoce legovaných ocelí se používají kameny z kubického nitridu boru s keramickým pojivem, pro obrábění slinutých karbidů kameny ze syntetického diamantu, s organickým pojivem. Kameny všech typů jsou v superfinišovacích hlavách upevňovány mechanicky, nebo se lepí na ocelové podložky.

Superfinišovací stroje

Stroje pro superfinišování se vyrábějí jako jednovřetenové ([FAG](#)) nebo vícevřetenové, nejčastěji pro obrábění vnějších a vnitřních rotačních ploch. Jsou určeny především pro dokončování součástí valivých ložisek (kroužky, válečky), pístních čepů, dříků ventilů a jiných součástí hromadné výroby. V kusové a malosériové výrobě se velmi často používají speciální [přídavná zařízení](#) se samostatným, nezávislým pohonem pro přímočarý oscilační pohyb nástroje, která se upínají na suporty hrotových soustruhů, nebo na hrotové brusky.

2. BEZTRÍSKOVÉ METODY DOKONČOVÁNÍ OBROBENÝCH PLOCH

Beztrískové metody dokončování (úpravy) obrobených (případně tepelně zpracovaných) ploch spočívají v plastické deformaci povrchové vrstvy obrobku, u některých metod (otryskávání, kuličkování, balotínování) je významný i jejich čistící účinek. Plastická deformace probíhá do hloubky několika setin až desetin milimetru, čímž dochází ke zlepšení parametrů struktury povrchu a ke zvýšení pevnosti a tvrdosti. V povrchové vrstvě vzniknou příznivá tlaková zbytková napětí a proto se u upravované strojní součásti zvýší mez únavy, odolnost proti opotřebení a odolnost proti korozi, což příznivě ovlivní její funkční spolehlivost a životnost.

K beztrískovým metodám dokončování povrchů vyrobených jinými technologickými metodami patří otryskávání (vrhání abrazivních částic proti povrchu obrobku), kuličkování (vrhání kovových nebo keramických kuliček proti povrchu obrobku), balotínování (vrhání skleněných kuliček proti povrchu obrobku), válečkování (úprava povrchu obrobku rotujícím prvkem - kuličkou, válečkem nebo soudečkem při valivém tření) a hlazení (úprava povrchu obrobku pevným diamantovým hrotem při kluzném tření).

2.1. OTRYSKÁVÁNÍ, KULIČKOVÁNÍ, BALOTINOVÁNÍ

Tyto metody beztrískové úpravy ploch jsou založeny na principu vrhání aktivních částic ([abrazní zrna](#), kovové, skleněné a někdy i keramické [kuličky](#)) proti povrchu upravovaného předmětu pomocí proudu stlačeného vzduchu nebo [kapaliny](#) (tzv. hydrofiniš). Výsledná jakost povrchu a čas potřebný na jeho úpravu závisí na rozměrech, tvaru, hmotnosti a materiálu částic, z pracovních podmínek má největší vliv rychlost částic a směr dopadu na upravovaný povrch. Abrazní zrna pro otryskávání mohou být vyrobena z různých organických nebo minerálních [materiálů](#), pro kuličkování se nejčastěji používají litinové nebo [ocelové kuličky](#) (z měkkých, kalených i korozivzdorných ocelí) o průměru 0,3 až 3 mm, pro balotínování skleněné kuličky o průměru 0,03 až 0,8 mm.

K výhodám kovových kuliček patří jejich vyšší pevnost (při nárazu na upravovanou součást se tolik nepoškozují), nevýhodou je skutečnost, že na upravovaném povrchu zanechávají stopy otěru, které u součástí z neželezných kovů a slitin mohou způsobit jejich následnou korozi. Pokud jsou aktivními částicemi kovové kuličky, bývá tato metoda úpravy povrchu často označována jako „brokování“. Keramické a skleněné kuličky nezanechávají na povrchu součásti žádný otěr, vzhledem k vysoké křehkosti se však při nárazu do značné míry poškozují. Poškozené aktivní částice všech typů a ostatní odpad (větší úlomky a prach z aktivních částic a otryskávaného předmětu) mají nižší hmotnost a proto se dají z pracovního procesu odstranit pomocí [recyklačního zařízení](#). V důsledku stálého podtlaku je proud vzduchu s aktivními částicemi a odpadem nasáván do cyklónového odlučovače. Filtr cyklónu (může být doplněn prstencovým magnetem, pokud se v systému nacházejí magnetické částice) zachycuje odpad a do cirkulujícího proudu vzduchu se vracejí pouze nepoškozené aktivní částice. Poškozené aktivní částice a odpad dále procházejí filtrační komorou, kde jsou shromažďovány v zásobníku, umístěném v dolní části komory.

Proud aktivních částic odstraňuje z povrchu upravovaného předmětu nežádoucí povlaky, [produkty koroze](#), nečistoty, oleje a tuky, atd., dosahovaná drsnost povrchu se pohybuje v rozmezí $Ra = 0,8$ až $1,6 \mu\text{m}$. Částice narážejí na předmět rychlostí až 150 m s^{-1} (závisí na typu zařízení a druhu částic) a v důsledku své vysoké kinetické energie vytvářejí na jeho povrchu [důlky a prohlubně](#), abrazní částice mohou navíc působit jako zrna brusiva a oddělovat z materiálu předmětu malé částičky třísky.

Pro otryskávání, kuličkování i balotínování se používají speciální komory ([obr.1](#), [obr.2](#), [obr.3](#)), ve kterých probíhá celý cyklus s ručním naváděním trysky, nebo speciální zařízení s automatizovaným pohybem trysky nebo upravované součásti, často i s CNC řízením (Progressive Technologies RLD-500 - [obrázek](#), [video](#)). Uvedenými metodami lze upravovat jednoduché i tvarově složité povrchy velkého počtu rozmanitých strojních součástí - ozubených kol ([Progressive Technologies](#)), podvozkových náprav, spojovacích a hnacích hřídelí, spojovacích tyčí, klikových ([Progressive Technologies](#)) a vačkových hřídelí ([Progressive Technologies](#)), pístů, motorových bloků, ventilů, turbínových disků, lopatek ([Progressive Technologies](#)) a hřídelí, hlav válců ([Progressive Technologies](#)), atd.

2.2. VÁLEČKOVÁNÍ

Válečkováním se dokončují vnější i vnitřní, před touto úpravou obrobené plochy (většinou rotační, někdy i rovinné, [obr.1](#), [obr.2](#), [obr.3](#)) metodou tváření za studena. Působící plastická deformace zhlazuje nerovnosti po předchozím obrábění ([obrázek](#), [animace](#)) a vyvolává zpevnění povrchových vrstev (zvyšuje tvrdost, pevnost a mez únavy, mění nepříznivá tahová

zbytková napětí z předchozího obrábění na [tlaková](#)), které má příznivý vliv na funkční vlastnosti součástí, zejména při dynamickém namáhání.

Válečkování se realizuje rotujícími tvářecími prvky (válečky nebo kuličky, někdy i soudečky), které jsou k upravovanému povrchu přitlačovány konstantní silou (statické válečkování), nebo na upravovaný povrch působí dynamickými rázy (dynamické válečkování). Vnější rotační plochy lze válečkovat na soustruzích ([obr.1](#), Kempf - [obr.1](#), [obr.2](#), Kovosvit MT 70/3000 CNC Roller - [obrázek](#), [video](#)) rotační plochy a rovinné plochy na obráběcích strojích s hlavním pohybem rotačním (frézky, frézovací centra, vyvrtávačky, atd.).

Statické válečkování

V případě statického válečkování jsou tvářecí prvky k upravovanému povrchu přitlačovány konstantní silou, v místě styku jsou vytvořeny podmínky pro valivé tření.

Tab.2.1. Pracovní podmínky válečkování⁶³

Válečkový průměr [mm]	Vnější válečkování		Vnitřní válečkování	
	Otáčky [min ⁻¹]	Posuv na otáčku [mm]	Otáčky [min ⁻¹]	Posuv na otáčku [mm]
5	1500	0,12	1000	0,15
12	1000	0,32	700	0,3
40	600	1,3	400	1,0
65	300	1,5	250	1,8
95	250	1,8	200	2,7
165	200	3,4		

Doporučené otáčky lze v případě speciálních požadavků snížit nebo zvýšit o 50%, posuv na otáčku zvýšit o 30%.

Tab.2.2. Přidavky na válečkování a drsnost povrchu válečkových ploch⁶³

Válečkováná součást		Vnitřní povrchy			Vnější povrchy					
Materiál	Průměr D [mm]	Přídavek [mm]	Ra [μm]		Přídavek [mm]	Ra [μm]				
			Obrobený	Válečkový		Obrobený	Válečkový			
Materiály s vysokou houževnatostí, A > 18%, tvrdost < 25 HRC, žháné oceli, tvárné litiny, slitiny Al, bronz, mosazi	3÷12	0,010	2,0	0,2	0,010	2,0	0,2			
		0,017	3,1		0,015	2,5				
	12÷25	0,017	1,5		0,012	2,0				
		0,040	3,1		0,025	4,5				
	25÷50	0,025	1,5		0,017	2,5				
		0,050	3,1		0,025	4,5				
	50÷165	0,040	1,5		0,025	3,1				
		0,075	5,0		0,050	10,1				
	Materiály s nízkou houževnatostí, A < 18%, tvrdost < 40 HRC, zušlechťené oceli, šedé litiny, slitiny Mg, tvrdé slitiny Cu	3÷12	0,010		2,0	0,4		0,008	1,5	0,4
			0,017		2,5			0,012	2,3	
		12÷25	0,017		2,2			0,012	2,5	
			0,025		3,1			0,018	3,5	
25÷50		0,025	3,1	0,012	2,5					
		0,040	4,5	0,025	4,5					
50÷165		0,040	3,0	0,020	3,1					
		0,050	5,0	0,035	5,0					

Válečky se většinou používají pro úpravu vnějších a vnitřních válcových a kuželových ploch a vnějších rovinných ploch. Výsledný efekt závisí na průměru válečků - menší průměry zvyšují hloubku zpevnění, při větších průměrech vykazuje válečkovaný povrch nižší drsnost. Tímto způsobem se dokončují součásti vyrobené z tvárných materiálů s pevností $R_m < 1250$ MPa, minimální tažností $A = 8\%$ a drsností povrchu obrobených ploch $R_a < 3,2$ μm . Velikost přitlačné síly závisí na materiálu součásti a pohybuje se v rozsahu od 500 do 5000 N, obvodová rychlost při válečkování dosahuje hodnot 20 až 100 m min^{-1} - tab.2.1. Posuv válečkovacího nástroje (Baublies - [konstrukce](#), typy - [obr.1](#), [obr.2](#)) na jednu otáčku dokončované součásti nemá být stejný jako posuv při předchozím obrábění a volí se v rozsahu 0,2 až 1,0 mm ($0,12 \div 3,40$ mm)⁶³. Jako pracovní prostředí je vhodný vřetenový olej, lze použít i olejové emulze. Válečkováním se změní rozměr součásti o 0,01 až 0,03 mm, hodnoty rozměrové přesnosti se pohybují v rozsahu IT6 až IT8, [drsnost povrchu](#) v rozsahu $R_a = 0,05 \div 0,40$ μm .

Pokud jsou tvářecími prvky kuličky, jsou v nástroji uloženy pomocí držáků nebo kroužků tak, aby se plynule odvalovaly po povrchu dokončované součásti. Tímto způsobem se dokončují vnější a vnitřní rotační plochy, tvarové rotační plochy a rovinné plochy u součástí z tvárných materiálů s pevností $R_m < 1000$ MPa a tažností minimálně $A = 12\%$. Vzhledem k menší stykové ploše kuličky s dokončovaným povrchem je přitlačná síla menší, nevýhodou je kopírování nerovností povrchu po předchozím obrábění. Na jednoduché operace se používají držáky s [jednou kuličkou](#), větších výkonů lze dosáhnout pomocí držáků s více kuličkami. Pro vnitřní válcové plochy se používají stavitelné rotační trny, umožňující dokončovat díry v určitém rozsahu průměrů. Obvodová rychlost je 40 až 150 m min^{-1} , posuv na otáčku obrobku 0,1 až 0,4 mm, jako mazivo se používají řezné a minerální oleje, popř. olejové emulze. Dosahovaná rozměrová přesnost a výsledná [drsnost povrchu](#) jsou stejné jako v předchozím případě.

Dynamické válečkování

Při dynamickém válečkování je povrch dokončované součásti deformován silovými impulzy tvářecích prvků, vyvozenými [rotujícím trnem](#) nebo kroužkem s vačkovými plochami. Technologické podmínky, zejména posuv, je nutno u tohoto typu válečkování ověřit experimentálně. Předností dynamického válečkování je vyšší jakost zpevněné povrchové vrstvy, nedostatkem horší dosažená drsnost povrchu - $R_a = 0,2 \div 0,8$ μm .

2.3. HLAZENÍ

Pro beztrískové dokončování povrchu součástí vyrobených z tepelně zpracovaných ocelí se používá vyhlazování pomocí diamantu s kuželovou špičkou, která má definovaný poloměr zaoblení a je konstantní silou přitlačována k povrchu součásti. Na rozdíl od válečkování nedochází u této metody v místě styku nástroje a dokončované součásti k odvalování, čímž jsou zde vytvořeny podmínky pro kluzné tření. Nejvyššího účinku se dosahuje u tepelně zpracovaných ocelí s tvrdostí 50 až 55 HRC. Drsnost vyhlazené plochy závisí na materiálu součásti a pracovních podmínkách a může po jednom až třech průchodech nástroje (MECH-INDIA - [obr.1](#), [obr.2](#)) dosáhnout hodnot kolem $R_a = 0,2$ μm .

3. NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ

U těchto metod se nepoužívá standardní řezný nástroj, u kterého je možné definovat pracovní část (čelo, hřbet, břit, ostří, atd.) nebo nástrojové úhly. Při obrábění se netvoří tříska (ve smyslu definice podle standardních metod, např. soustružení, frézování, atd.), protože k úběru obráběného materiálu dochází převážně účinky tepelnými, chemickými, případně i mechanickými (převážně abrazivními) - nebo jejich vzájemnou kombinací. Rostoucí rozsah aplikace nekonvenčních metod obrábění je odezvou na vývoj a používání nových konstrukčních materiálů s vysokou pevností, tvrdostí a houževnatostí, materiálů odolných proti opotřebení apod., které nelze standardními metodami hospodárně obrábět (titanové slitiny, superslitiny, slinuté karbidy, keramika, apod.).

Nekonvenční metody obrábění jsou charakterizovány širokým rozsahem parametrů, jak z hlediska technologických podmínek, tak i z hlediska výstupů příslušných procesů (viz též tabulky 3.1, 3.2 a 3.3), k základním charakteristikám patří:

- rychlost, možnosti a výkonnost obrábění nezávisí na mechanických vlastnostech obráběného materiálu,
- materiál nástroje (pokud jej příslušná metoda využívá) nemusí být tvrdší než obráběný materiál - zvláště tvrdé materiály se dají obrábět nástroji z měkkých materiálů,
- možnost provádění složitých technologických operací, jako je výroba děr se zakřivenou osou, obrábění děr složitých tvarů a tvarových dutin v materiálech s vysokými hodnotami mechanických vlastností,
- možnost zavedení plné mechanizace a automatizace \Rightarrow jednoduché včlenění dané operace do výrobní linky,
- možnost zvýšení technologičnosti konstrukce a sériovosti výroby se současným omezením výroby zmetků a snížení pracnosti daných operací,
- současně s výrobou tvaru dochází u některých nekonvenčních metod obrábění také k řízené změně vlastností povrchové vrstvy, zejména zvýšení odolnosti proti korozi, zvýšení únavové pevnosti apod.

Podle převládajících účinků oddělování materiálu je možné provést následující třídění nekonvenčních metod obrábění:

a) Oddělování materiálu **tepelným účinkem**:

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

b) Oddělování materiálu **elektrochemickým nebo chemickým účinkem**:

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

c) Oddělování materiálu **mechanickým účinkem**:

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

Pro nekonvenční metody obrábění jsou často využívány CNC řídicí systémy, které výrazně rozšiřují oblast jejich aplikace (tyto systémy řídí především cykly pohybů a úběr obráběného materiálu). Příslušné stroje jsou standardně řízeny ve třech osách, některé jsou vybaveny až šestiosým řízením. CNC stroje pro elektroerozivní hloubení mohou též využívat elektrodu, která má kulové zakončení jako fréza a jejich práce je pak podobná konvenčnímu obrábění na frézkách.

Tab.3.1. Aplikační oblasti nekonvenčních metod obrábění

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

USM - ultrazvuk, AWJM - vodní paprsek s abrazivem, EDM - elektroerozivní metody, EBM - elektronový paprsek, LBM - laser, PBM - paprsek plazmy, CM - chemické obrábění, ECM - elektrochemické obrábění, F - frézování, S - soustružení.
A - velmi vhodné, B - vhodné, C - obtížné, D - nelze aplikovat.

Tab.3.2. Obecná charakteristika účinků nekonvenčních metod obrábění

Charakteristika	Nekonvenční metody obrábění								Konvenční obrábění	
	Mech. účinek		Tepelný účinek				Chemický ú.			
	USM	AWJM	EDM	EBM	LBM	PBM	CM	ECM	F	S
Úběr materiálu	C	C	C	D	D	A	B-D	B	A	B
Přesnost rozměrů ¹⁾	A	B	A-D	A	A	D	A-B	B	B	A
Drsnost povrchu ¹⁾	A	A	B-D	B	B	D	B	B	B-C	A

Zkratky jednotlivých metod jako v tabulce 3.1.
1) týká se obrobené plochy.
A - vynikající, B - dobré, C - uspokojivé, D - špatné.

Tab.3.3. Technologické parametry vybraných NMO

Parametr	Metoda obrábění						
	USM	EDM	EBM	LBM	PBM	ECM	ECG
Ra [μm]	6,3 ÷ 0,4	50,0 ÷ 0,2	50,0 ÷ 6,3	50,0 ÷ 6,3		25 ÷ 1,6	0,8 ÷ 0,2
Stupeň přesnosti IT	7 ÷ 9	6 ÷ 12				9 ÷ 12	6 ÷ 9
Tloušťka ovlivněné vrstvy [μm]	N	2 ÷ 300	N	100	500÷800	N	N
U [$\text{cm}^3 \text{min}^{-1}$]	$10^{-2} \div 10$	$10^{-4} \div 0,6$	$10^{-2} \div 0,4$	10^{-4}	100	0,05÷0,50	10^{-2}
E [kWh cm^{-3}]	0,07÷0,80	0,1 ÷ 1,0		8 ÷ 13		0,1 ÷ 0,3	0,04÷0,08

Zkratky jednotlivých metod jako v tabulce 3.1, ECG - elektrochemické broušení.
U- úběr obráběného materiálu, E- měrná spotřeba energie, Ra- drsnost povrchu obrobené plochy.
N - neovlivňuje.

3.1. ELEKTROEROZIVNÍ OBRÁBĚNÍ

Elektroerozivní obrábění zahrnuje řadu metod, které mají jeden společný znak - úběr materiálu je vyvolán periodicky se opakujícími elektrickými, popř. obloukovými výboji mezi [nástrojem a obrobkem](#). Z obráběného materiálu jsou tavením a vypařováním odstraňovány velmi malé částice (mikročástice - volným okem neviditelné), které mají tvar dutých kuliček a jsou z oblasti obrábění odplavovány pomocí dielektrické kapaliny.

Dielektrická kapalina (petrolej, lehké strojní nebo transformátorové oleje, vodní sklo, různé solní roztoky, deionizovaná destilovaná voda) má velmi důležitý vliv na celý proces eroze a proto musí splňovat následující požadavky:

- musí zabezpečovat potřebnou vzdálenost mezi elektrodami, aby přechod proudu mezi nimi vyústil do výboje,
- musí mít nízkou viskozitu a dobrou smáčivost, aby byla rychle obnovována izolace po výboji,
- musí být chemicky neutrální, aby zamezovala vzniku koroze,
- musí mít dostatečně vysokou teplotu hoření, aby nedocházelo ke vzplanutí,
- musí zabezpečovat chlazení elektrod a odebíraných částic obráběného materiálu,
- při práci s ní nesmí vznikat jedovaté výpary a nepříjemný zápach,
- nesmí podléhat chemickým změnám, musí být stálá, lehce vyrobitelná a levná,
- musí zabezpečovat spolehlivý odvod (odplavení) erozních zplodin ze zóny úběru obráběného materiálu.

Fyzikální proces úběru materiálu má velmi [komplexní průběh](#). Obrábění je založeno na principu dvou elektrod (musí být z elektricky vodivého materiálu), oddělených jiskrovou mezerou velikosti 0,01 až 0,50 mm, ponořených v dielektrické kapalině. Celkový proces odebrání materiálu se skládá ze střídajících se impulzních výbojů, statisticky rozložených po celé aktivní ploše nástroje. Při každém výboji dojde k narušení materiálu, na obrobku i elektrodě se vytvoří kráter. Doba vypnutí (přerušení toku elektrického proudu) umožní, aby proudící kapalina odplavila z místa narušení všechny vzniklé mikročástice. Čas přerušování musí být delší než je čas deionizace kapaliny, aby se ve stejném místě nemohl udržet plynulý výboj. Charakteristické parametry elektroerozivního obrábění jsou určeny tvarem a energií impulzů, velikostí jiskrové mezery a typem a vlastnostmi dielektrika.

Oddělení obráběného materiálu probíhá tak, že do [pracovního okruhu](#) je dodáván stejnosměrný proud v pulzech, které mají obdélníkový průběh a každý z nich způsobuje vytvoření výboje mezi nástrojem (-) a obrobkem (+). Výboj mezi elektrodami vzniká v místě nejsilnějšího elektrického napětového pole, které vytváří ionizovaný (vodivý) kanál, umožňující přechod jiskry mezi nástrojem a obrobkem. Výsledkem výboje je krátkodobá koncentrace elektrické a mechanické energie elektronů na anodě (obrobek), vznik vysoké teploty v bezprostřední blízkosti výboje, natavení a dokonce odpaření materiálu z anody, ale i katody (nástroje). Elektrodynamické síly a spád vnitřních napětí v důsledku teplotního pole způsobují, že natavený kov je vymrštěván do dielektrika. Nástroj je pomocí posuvového mechanismu neustále přibližován k ploše obrobku a současně může kmitat. Kmitavý pohyb zlepšuje podmínky pro výboj, zdokonaluje odstraňování vznikajících mikročástic a zintenzivňuje výměnu dielektrika v jiskrové mezeře.

Základem klasického RC pracovního okruhu je kondenzátor s kapacitou, která se pohybuje v rozsahu 0,25 až 600 μF , jsou používána i zapojení bez kondenzátoru. Úkolem kondenzátoru je akumulace elektrické energie, která se vybije ve formě silného jiskrového výboje. V okruhu bez kondenzátoru vzniká při určité vzdálenosti elektrod elektrický oblouk a ne

jiskrový výboj. Elektrický oblouk dosahuje teploty 3600 až 4000 °C za dobu 0,1 ms až 0,1 s, zatímco jiskrový výboj teploty až 10000 °C za dobu 0,01 ms až 0,10 ms.

Elektrojiskrové obrábění, které využívá obloukový výboj vhodného tvaru a časového průběhu je označováno jako **elektroimpulzní obrábění**. Zdrojem pracovního proudu je impulzní generátor, nástrojová elektroda je napojena na pól plus (+), obrobek na pól mínus (-). Pro tento účel se používají zvláště zkonstruované nezávislé impulzní generátory, u kterých amplituda, doba trvání, polarita, frekvence a tvar impulzů nezávisí na době obrábění, ani na fyzikálním stavu jiskrové mezery. V porovnání s běžným elektrojiskrovým obráběním lze u tohoto způsobu dosáhnout podstatně vyšších úběrů materiálu (až 25 cm³ min⁻¹), avšak drsnost povrchu a přesnost rozměrů obrobené plochy jsou horší. Za výhodu lze též považovat menší opotřebení nástrojové elektrody (méně než 1%). Elektroimpulzní obrábění je vhodné pro obrábění rozměrných obrobků, pro hrubovací operace a v případech, kde jsou vysoké náklady na nástrojové elektrody (např. při výrobě tvářecích nástrojů).

V závislosti na fyzikálních podmínkách úběru materiálu se elektroerozivní obrábění obvykle člení na **elektrojiskrové obrábění**, **elktrokontaktní obrábění** a **anodomechanické obrábění**.

3.1.1. Elektrojiskrové obrábění

3.1.1.1. Elektrojiskrové hloubení

Elektrojiskrové hloubení představuje základní typ elektroerozivních metod obrábění. Uplatňuje se při vytváření tvarově složitých vnějších, ale zejména vnitřních ploch ve výrobě tvářecích zápusťek, forem pro lití, střížných nástrojů ([Sumitomo](#)), nástrojů pro [lisování plastů](#), atd. K výhodám elektrojiskrového hloubení patří:

- možnost obrábění vodivých materiálů bez ohledu na jejich [mechanické vlastnosti](#) (pevnost, tvrdost, houževnatost, křehkost),
- velký rozsah pracovních parametrů umožňuje vyrábět povrchy různých jakostí,
- možnost výroby součástí složitých tvarů a provádění operací, které nelze uskutečnit jinými metodami obrábění (výroba děr se [zakřivenou osou](#)),
- na obrobek nepůsobí žádné mechanické zatížení,
- vzniká menší odpad než při konvenčním mechanickém obrábění,
- snižuje se pracnost při výrobě ploch složitých tvarů,
- poměrně jednoduchá výroba nástrojových elektrod,
- na hranách obrobku nezůstávají otřepy,
- výrobní proces lze snadno automatizovat.

K nevýhodám elektrojiskrového hloubení patří:

- nepřímá úměra mezi produktivitou obrábění a jakostí povrchu obrobené plochy,
- nutnost ponoření obrobku do kapaliny v průběhu obrábění,
- jakost obrobeného povrchu závisí na mnoha faktorech, které nelze předem spolehlivě určit,
- poměrně nízká produktivita při obrábění měkkých materiálů.

Nástrojová elektroda ([Sodick](#)) se při elektrojiskrovém hloubení automaticky [posouvá](#) proti obrobku, řídicí systém musí přitom udržovat konstantní velikost jiskrové mezery. Elektroda má negativní tvar obrobené plochy, který je prostřednictvím výbojů kopírován do obrobku ([obr.1](#), [obr.2](#)). Produktivita obrábění a jakost povrchu obrobené plochy závisí na parametrech elektrického proudu, tvaru a frekvenci výbojů, dielektrické kapaliny, materiálu nástroje a materiálu obrobku.

Složitější tvary lze na strojích s CNC řízením ([Agie](#), [Charmilles Roboform 35P QCRI](#), [Leblond Makino](#), [Makino EDGE2-5XR CNC](#), [Mitsubishi EX22](#)) hloubit i jednoduchou elektrodou, jejíž pohyb je řízen po odpovídající dráze. U starších strojů zajišťují tento pohyb tzv. vychylovače elektrod, které vychylují elektrodu do všech požadovaných směrů. Uvedená technologie navíc snižuje spotřebu elektrod prostřednictvím korekce jejich opotřebení.

Nástrojové elektrody

Při volbě nástrojové elektrody je třeba vzít v úvahu její materiál (tab. 3.4), výrobu (možnosti, cena) a opotřebení v průběhu daného procesu elektrojiskrového obrábění. Materiál elektrody má mít vysokou elektrickou vodivost, dobrou obrobiteľnosť, vysoký bod tavení a dostatečnou pevnost, aby se při vlastní práci nedeformoval. K základním metodám výroby nástrojových elektrod patří obrábění, lisování, lití, prášková metalurgie, stříkání a galvanoplastika.

Na opotřebení elektrody má největší vliv teplota tavení použitého materiálu, hodnotí se opotřebení boků, rohů a konce elektrody. Nejvýznamnější kritérium, které určuje trvanlivost elektrody a vymezuje nutnost její úpravy, je opotřebení rohů.

Tab.3.4. Materiály nástrojových elektrod

Materiál	Charakteristika
Grafit	Nejčastěji používaný materiál, je dobře obrobiteľný a vykazuje nízké opotřebení. Nevýhodou grafitu je znečišťování hloubicího stroje.
Měď	Má dobrou elektrickou vodivost, vykazuje nízké opotřebení. Měděné elektrody nepracují tak dobře jako elektrody z grafitu nebo mosazi. Jsou vhodné pro obrábění karbidu wolframu. Dosahovaná drsnost povrchu obrobené plochy je lepší než Ra=0,5 μm.
Měď - wolfram a stříbro - wolfram	Jde o drahé materiály. Používají se pro výrobu elektrod na hluboké drážky. Elektrody jsou vyráběny slinováním wolframu s mědí nebo stříbrem. Po slinutí již nemůže být elektroda tvarována v důsledku křehkosti materiálu.
Měď - grafit	Tento materiál je 1,5 až 2krát dražší než grafit, je vhodný pro obrábění karbidu wolframu.
Mosaz	Relativně levný a snadno obrobiteľný materiál, vykazuje však vysoké hodnoty opotřebení.
Wolfram	Pro výrobu malých děr, D < 0,2 mm.

3.1.1.2. Elektrojiskrové řezání

Tato metoda elektrojiskrového obrábění se vyznačuje minimální šířkou řezu a nachází uplatnění zejména při výrobě střížných a lisovacích nástrojů ([Hitachi](#), [Sodick](#), Wirecut - [obrázek](#), [detail](#)) a při dělení velmi pevných a tvrdých materiálů (např. elektricky vodivých keramických materiálů - SiC, Si₃N₄, slinutých karbidů - [obr.1](#), [obr.2](#), [obr.3](#), kalených ocelí, titanových slitin, superslitin, atd.). Nástrojovou elektrodou je tenký drát, který se pomocí speciálního zařízení průběžně odvíjí z cívky (kvůli zamezení opotřebení) a přes vodící zařízení prochází místem řezu ([schéma](#), Agie - [obr.1](#), [obr.2](#), Sodick - [obr.1](#), [obr.2](#), [obr.3](#), [obr.4](#), [Sumitomo](#)). Drát je napínán konstantní tahovou silou (předpětí ovlivňuje přesnost řezu), prostor mezi obrobkem a drátem je zaplněn dielektrickou kapalinou.

Dráty (průměr 0,03 až 0,35 mm) jsou vyráběny z mědi a jejích slitin, nejčastěji z mosazi, pro velmi jemné řezy z molybdenu (průměr 0,03 až 0,07 mm). V současné době jsou též velmi často používány povlakované dráty s jádrem ze slitiny mědi (např. Cu-Cr, Cu-

Zr, Cu-Ag, Cu-Sn, Cu-Sn-In) a [povlakem](#), obsahujícím vysoké procento zinku - jádro umožňuje práci s vysokými řeznými rychlostmi, povlak udržuje stabilní výboj a zaručuje vysokou jakost povrchu obrobené plochy.

Pohyb stolů pro upnutí obrobku ([Agie](#), Sodick - [obr.1](#), [obr.2](#)) je u řezacích strojů ([Agie](#), [Brother HS-70A](#), [Charmilles Robofil 440](#), [Mitsubishi SX10](#), Sodick - [AP200L](#), [AQ535L](#)) řízen CNC systémem, který zajišťuje přesnost odpovídající nástrojařským pracím. Stroje mohou být navíc vybaveny CNC řízeným nakláněním drátové elektrody v rozsahu 0° až 30°, což umožňuje vyřezávat kuželovité a jiné složitější tvary ([Sodick](#)).

3.1.2. Elektrokontaktní obrábění

Podstatou této metody elektroerozivního obrábění je odporové odtavování obráběného materiálu v místě styku nástroje s povrchem obrobku, při použití střídavého proudu o nízkém napětí (25 V, někdy i více). Při přiblížení nástroje k obrobku vzniká krátkodobý oblouk, v místech přímého kontaktu se materiál obrobku začíná tavit, roste přechodový odpor a uvolňuje se velké množství tepla. Aby nedošlo v místech styku ke svařování, musí se nástroj neustále pohybovat (většinou vykonává rotační pohyb). Uvedený pohyb způsobuje přerušování kontaktů (v těchto místech se následně tvoří elektrické oblouky) a současně jejich vytváření na jiných místech - jedná se tedy o mechanické buzení elektrických oblouků. K ochlazení nástroje slouží proud kapaliny (vody) nebo stlačeného vzduchu, který současně odstraňuje z místa řezu ztuhlé částice obráběného materiálu.

Při obrábění s napětím nižším než 12 V probíhá úběr obráběného materiálu především v důsledku mechanických účinků, při vyšších napětích v důsledku elektrických účinků (lze tedy použít nižší přitlačné síly). Kontakt nástroje s obrobkem může být nepřerušovaný (dělení materiálu, soustružení), nebo přerušovaný - slouží pouze k vytvoření obloukového výboje.

K výhodám elektrokontaktního obrábění patří jednoduchost výrobního zařízení a poměrně vysoká produktivita (úběr obráběného materiálu 30 až 200 cm³ min⁻¹), k nevýhodám horší drsnost a nižší rozměrová a tvarová přesnost obrobené plochy.

3.1.3. Anodomechanické obrábění

Z hlediska odebrání materiálu je anodomechanické obrábění na rozhraní elektroerozivního a elektrochemického obrábění, zařazení do příslušné skupiny závisí zejména na energetických parametrech. Při použití vyšších napětí a větších proudových hodnot dochází k úběru materiálu elektrotermickým účinkem (elektroerozivní metoda), při použití nižších hodnot k úběru elektrochemickým účinkem. Další složkou úběru je elektrochemické rozpouštění, protože jsou zde vytvořeny podmínky pro elektrolýzu. Celkový úběr obráběného materiálu (při řezání 1 až 7 cm³ min⁻¹, při leštění a broušení pouze 2 až 30 mm³ min⁻¹) a drsnost povrchu obrobené plochy (při řezání Ra = 6,3÷50,0 μm, při leštění a broušení Ra = 0,1÷3,2 μm) závisí na druhu elektrolytu, elektrických a mechanických parametrech procesu a také na teplotě tavení a tepelné vodivosti materiálu obrobku.

Anodomechanické obrábění se používá zejména pro rozřezávání tvrdých a těžkoobrobitelných materiálů, tenkostěnných trubek, pro vyřezávání profilů a pro tvarové broušení nástrojů ze slinutých karbidů. Zdrojem energie je usměrňovač střídavého proudu, který dodává stejnosměrné napětí 32 až 36 V (naprázdno, pracovní napětí klesá na 18 až 22 V), hodnoty proudu se pohybují v širokém rozmezí 3 až 3000 A (závisí na obráběném materiálu a požadované jakosti povrchu obrobku).

Zařízení na anodomechanické dělení materiálu má rám a na něm stojan s ložiskem, ve kterém je uloženo elektricky odizolované vřeteno nástroje (pro dělení materiálu je nástroj - úzký kotouč - vyroben z hlubokotažného ocelového plechu, pro broušení z běžné konstrukční oceli). Nástroj je k vřetenu upevněn pomocí přírub a spolu s ním se otáčí otáčkami n tak, aby jeho obvodová rychlost dosahovala hodnot $v_c = 9 \div 12 \text{ m s}^{-1}$. Záporný pól elektrického zdroje je zapojen na nástroj, kladný pól na svěrák s upnutým obrobkem, svěrák je automaticky posouván proti nástroji. Elektrolyt (nejčastěji vodní sklo - křemičitan sodný - $\text{Na}_2\text{O} \cdot x\text{SiO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$, měrná hmotnost 1,27 až 1,32 g cm^{-3}) je pomocí nastavitelné hubice přiváděn přímo do místa řezu. Pro anodomechanické broušení lze jako elektrolyt použít 1,0 až 1,5procentní vodní roztok tetraboritanu sodného (borax).

Proces úběru materiálu probíhá při vysokých teplotách, přičemž roztavený kov je z místa obrábění odstraňován otáčejícím se nástrojem. Pracovní prostor je zaplaven kapalinou, která plní funkci izolátoru s chladicím účinkem. Výboj nastává pouze v místech, kde nástroj svým otáčivým pohybem naruší izolační vrstvu (mechanické buzení elektrických výbojů).

3.2. OBRÁBĚNÍ PAPRSKEM PLAZMY

Při obrábění paprskem plazmy je obráběný materiál postupně odtavován, odpařován a rozprašován paprskem plazmy, vystupujícím vysokou rychlostí z plazmového hořáku. Plazma je elektricky vodivý stav plynu, který obsahuje směs volných elektronů, pozitivně nabitých iontů a neutrálních atomů a má vysokou teplotu 10 000 až 30 000 °C. Vlastnosti plazmy jsou ovlivněny použitými plyny, které se podle funkce dělí na:

- **plazmové**, které jsou přiváděny přímo do obloukového výboje a vytvářejí plazmový paprsek - Ar, Ar +H₂, He, N₂, CO₂, vzduch,
- **fokusační**, které slouží ke zužování paprsku při jeho výstupu z trysky plazmového hořáku - Ar, Ar +H₂, Ar +N₂, N₂,
- **ochranné**, které obklopují plazmový paprsek a oblast tavení materiálu a chrání je před účinky atmosféry - Ar.

Plazma se tvoří ohřevem plynu na vysokou teplotu, elektrickým obloukovým výbojem mezi dvěma elektrodami (nejčastěji užívaný způsob - katodou je wolframová elektroda, anodou řezaný materiál), nebo působením koncentrovaného svazku iontů. Základním prvkem zařízení pro obrábění plazmou je plazmový hořák (Komatsu Rasor G940-II - schéma: řezná rychlost $v_c = 1,15$ až $5,10 \text{ m min}^{-1}$ pro řezání běžných ocelí, $v_c = 1,25$ až $3,05 \text{ m min}^{-1}$ pro řezání korozivzdorných ocelí, $v_c = 1,25$ až $3,30 \text{ m min}^{-1}$ pro řezání hliníkových slitin; Rasor G9120-II - schéma: řezná rychlost $v_c = 0,60$ až $7,60 \text{ m min}^{-1}$ pro řezání běžných ocelí, $v_c = 0,75$ až $2,55 \text{ m min}^{-1}$ pro řezání korozivzdorných ocelí, $v_c = 0,75 \div 3,80 \text{ m min}^{-1}$ pro řezání hliníkových slitin; Esab, Pierce). Pracovní plyn prochází elektrickým obloukem (tvoří se mezi elektrodou hořáku - mínus pól a obrobkem - plus pól) a za vývinu velkého množství tepla se rozkládá na jednotlivé molekuly.

Proces obrábění je tak intenzivní, že se částice obráběného materiálu odtavují nebo odpařují velmi rychle a hloubka tepelně ovlivněné vrstvy nepřevyšuje 1 mm. Vzhledem k vysokým rychlostem obrábění je povrch relativně jemný a rozměrová přesnost odpovídá hrubovacím operacím. Plazmový paprsek se nejčastěji používá pro řezání různých materiálů (rychlost posuvu 50 až 6000 mm min^{-1} , max. tloušťka přes 100 mm), včetně těžkoobrobitelných ocelí, uplatňuje se však i při obrábění rotačních ploch (přímé soustružení paprskem, nebo ohřev obráběného povrchu před nástrojem s keramickou břitovou destičkou). Řezací stroje (obrázek, Esab Suprarex SXE-P, Komatsu Rasor KCR-0951, Nessap, Pierce) jsou obvykle vybaveny velkými pracovními stoly, pro pohyb hořáku (hořáků) je využíváno CNC řízení.

Mezi výhody řezání paprskem plazmy patří lepší kvalita řezu při řezání materiálů větší tloušťky a kratší časy řezání (ve srovnání s řezáním plamenem) a nižší náklady při řezání tenkých plechů, ve srovnání s laserem. Za nevýhody lze považovat vyšší náklady (ve srovnání s řezáním plamenem) a horší kvalitu řezu (ve srovnání s laserem).

3.3. OBRÁBĚNÍ LASEREM

Název LASER obsahuje první písmena slov v anglickém názvu **L**iht **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation - zesílení světla pomocí vybuzené emise záření. Běžné světelné záření je vlnění, které se šíří všemi směry, zesílením je vytvořen úzký svazek fotonů (kvant elektromagnetického záření). Laserové světlo vzniká v prostředí určitého stimulujícího elektromagnetického záření potlačením spontánní emise na úkor emise stimulované. Spontánní (samovolná) emise záření vzniká v případě, že vybuzené atomy s energetickou hladinou E_2 mají tendenci zaujmout hladinu s nižší energií E_1 a přitom emitují kvantum světelného záření.

Vlivem vnějšího podnětu se vybuzený atom vrací do základního stavu, přičemž emituje nový kvant se stejnou frekvencí, jakou měl předchozí kvant. Tento způsob emise se nazývá stimulovaná (vynucená) emise záření. V závislosti na rozdílu energetických hladin vzniká infračervené, ultrafialové nebo viditelné světelné záření. V běžných podmínkách se atom nachází v základním stavu, k emisi záření jej lze přinutit vybuzením. Dodání energie, potřebné pro dosažení vybuzeného stavu, se nazývá čerpání (u rubínového laseru pomocí fotonů, u argonového laseru přímým vybuzením elektronů, u laseru typu hélium - neón vzájemnou kolizí atomů).

Každé laserové zařízení obsahuje laserové médium (aktivní látka), zdroj excitační energie (čerpání) a optický rezonátor (polopropustné a nepropustné zrcadlo), který neustále vrací část stimulované emise záření zpět do laserového média. Zdrojem čerpání může být elektrický výboj, elektronový paprsek, viditelné světlo (výbojka), ultrafialové světlo, chemická reakce, teplo, případně jiné zdroje. Po načerpání se v laserovém médiu zvyšuje počet atomů, iontů a molekul na vyšší energetické hladině a médium samovolně emituje svoji přebytečnou energii ve formě fotonů, které mohou mít různou frekvenci, směr šíření a polaritu. Optický rezonátor vybírá pouze ty fotony, které mají frekvenci shodnou s jeho rezonanční frekvencí. Fotony se pohybují podél osy rezonátoru tak, že dopadají kolmo na jeho zrcadla. Od nepropustného zrcadla (odrazivost 100%) se odrazí zpět, proletí znovu aktivní látkou k polopropustnému zrcadlu (odrazivost 40÷80%), přes které vycházejí ven jako koherentní monochromatický laserový paprsek. Zbylé fotony, které mají jiný směr šíření a jinou frekvenci se nezesílí a jsou vyzařovány vnějšími stěnami laserového média. Všechny vzniklé fotony zůstávají v rezonátoru po extrémně krátkou dobu.

Laser je tedy kvantový elektronický zesilovač a generátor světelného svazku, který je charakterizován těmito základními vlastnostmi:

- je vysoce monochromatický - světlo v laserovém paprsku má prakticky pouze jednu vlnovou délku,
- má vysoký stupeň prostorové a časové koherence, v prostorově koherentním paprsku kmitají všechny částice světelné vlny se stejnou fází v rovině kolmé na směr šíření paprsku, v časově koherentním paprsku kmitají se stejnou fází všechny částice světelné vlny ve směru šíření paprsku,
- má minimální divergenci (rozbíhavost),
- má vysokou výstupní výkonovou hustotu I [W cm^{-2}] - tab. 3.5,
- má modální strukturu (v příčném průřezu vytváří paprsek buď jednoduchou stopu, nebo složitější obrazce pravoúhle nebo kruhově symetrické).

Tab.3.5. Výkonová hustota různých energetických zdrojů

Zdroj energie	I [W cm ⁻²]
Slunce (čočka, f = 50 mm)	5.10 ²
Elektrický oblouk	1.10 ⁵
Acetylén-kyslíkový plamen	1.10 ⁴
Plazmový paprsek	1.10 ⁵
Elektronový paprsek	4.10 ⁸
CO ₂ laser	1.10 ⁹
Nd laser	1.10 ¹⁴

Lasery lze klasifikovat podle aktivní látky - laserového média (materiál, který se používá na generování záření a jeho skupenství), vlnové délky záření, druhu respektive režimu paprsku, výkonu, konstrukce zařízení a [použití](#). Podle aktivního prostředí se lasery dělí na:

- **pevné:**
 - rubínové (Al₂O₃), výkon P = 5 W, použití - holografie,
 - Nd-YAG (YAG je zkratka pro yttrium aluminium granát, Y₃Al₅O₁₂), P = 100 W až 1,2 kW, strojírenský průmysl,
 - Nd-sklo, P = 2 mW,
 - alexandrit, P = 10 W,
- **plynové:**
 - CO₂, N₂+He, P = 500 W až 15 kW, strojírenský průmysl (Trumpf - [princip](#), [schéma](#), [obr.1](#), [obr.2](#)),
 - He-Ne, P = 20 mW, metrologie, geodézie, holografie,
 - Ar, P = 1 W až 5 kW, chirurgie,
 - excimerové - ArCl, XeCl, XeF, KrF, P = 20 až 250 W, fotolitografie, chirurgie, strojírenství,
- **kapalinové**, P = 100 W, fotochemie, spektroskopie,
- **polovodičové - GaAs**, P = 2 až 10 mW, informační technologie, optoelektronika.

Laserový paprsek lze využít ve čtyřech základních oblastech, klasifikovaných podle mechanismu technologie zpracování materiálů:

- **úběr materiálu**; do této oblasti spadá řezání ([obecné schéma](#), hlavice - [schéma](#), [obrázek](#), řezací stroje: Trumf: [schéma](#), [obr.1](#), [obr.2](#), [obr.3](#), Fast Laser LH2100: [obrázek](#), [detail](#), [Lasmac](#), [Kingsland](#), [LVD](#), NTC America: [TLM](#), [TLN](#), [TLV](#), Alabama Laser: [plech](#), [225 děr za minutu](#) v ocelovém plechu tl. 1 mm, trubky - [video 1](#), [video 2](#), [video 3](#), [video 4](#)), vrátání, mikroobrábění (přistřihování, ořezávání, popisování, rytí) a čištění (odstraňování tenké povrchové vrstvy kontaminované oleji a plyny);
- **pájení a svařování** (Trumf: [obr.1](#), [obr.2](#), [Alabama Laser](#) - svařování nízkouhlíkové a korozivzdorné oceli);
- **tepelné zpracování** (kalení, žhání, povrchové legování, CVD a PVD povlakování, rekrytalizace polovodičů po iontové implantaci);
- **nové procesy** (růst safírových krystalů, tažení optických vláken, barvení, dělení skla a keramiky řízeným lomem, laserem podporované obrábění - LAM - Laser Assisted Machining - např. [soustružení](#)).

Při laserovém obrábění dochází k odebrání materiálu účinkem úzkého paprsku silného monochromatického světla soustředěného na velmi malou plošku. [Působením](#) laserového paprsku dochází k místnímu ohřevu částic materiálu na vysokou teplotu (řádově až 10⁴ °C), která způsobí jejich roztavení. Povrch natavené oblasti se rychle zvětšuje a materiál se dalším

působením paprsku začne odpařovat. Při odpařování vznikají v natavené oblasti poměrně vysoké tlaky, tavenina je tlakem par přemísťována a vytlačena ze vznikajícího kráteru a paprsek proniká do větší hloubky.

V oblasti obrábění se laserová technika používá pro rozřezávání rozmanitých materiálů ([obr.1](#), [obr.2](#), od textilu, [dřeva](#) a plastů - [video 1](#), [video 2](#), až po těžkoobrobitelné materiály) a pro výrobu přesných děr malých průměrů v těžkoobrobitelných materiálech (titanové slitiny, superslitiny, slinuté karbidy, monokrystaly, atd.), případně v některých nekovových a elektricky nevodivých materiálech (boridy, keramické materiály, apod.). Obvykle je při obrábění laserem nutné specifikovat tyto parametry:

- výkon laseru,
- druh paprsku (kontinuální nebo pulzní) a jeho mód,
- průměr fokusovaného paprsku,
- úhel vychýlení paprsku (při přechodu paprsku obráběným materiálem dochází k jeho vychýlení od původního směru o 75° až 80°),
- řezná rychlost (rychlost posuvu paprsku - [obr.1](#), [obr.2](#), [obr.3](#), [obr.4](#), [obr.5](#)),
- ohnisková vzdálenost,
- šířka řezu,
- tepelně ovlivněná vrstva,
- geometrie obrobku a maximální obráběná tloušťka ([obr.1](#), [obr.2](#), [obr.3](#), Alabama Laser: [video 1](#), [video 2](#), [video 3](#) - tl. 38 mm, [video 4](#) - tl. 38 mm, [video 5](#) - tl. 50 mm),
- typ obráběného materiálu (ocel, sklo, keramika, textil, kompozit, atd.),
- mechanické vlastnosti obráběného materiálu,
- fyzikálně chemické vlastnosti obráběného materiálu,
- termofyzikální vlastnosti obráběného materiálu (tepelná vodivost, viskozita taveniny, povrchové napětí, [absorpce](#), odrazivost povrchu).

K základním specifickým možnostem a přednostem technologie obrábění pomocí laserového paprsku patří zejména:

- tepelnou energii lze koncentrovat na velmi malou plochu bez použití mechanických sil, což umožňuje obrábět i velmi křehké materiály bez nebezpečí jejich mechanického poškození,
- průměr paprsku lze pomocí vhodné optiky měnit v širokém rozsahu (snadné řízení výkonové hustoty paprsku),
- možnost obrábění v místech nedostupných pro jiné nástroje (na přenos laserového paprsku do těžko dostupných míst lze použít zrcadla nebo optické kabely),
- možnost vytvářet mimořádně [úzké řezy](#) (úspora materiálu, omezení poškození nebo ovlivnění povrchu obrobku plochy),
- vysoká rychlost a přesnost zapínání a vypínání paprsku,
- izotropní účinek paprsku v rovině kolmé k jeho ose (možnost řezání všemi směry, snadná změna směru řezání, libovolný úhel řezání),
- vysoká produktivita obrábění ve spojení s CNC řízením ([3D řezání](#), Alabama Laser - pětiosé řezání: [video 1](#) - součást z hliníkového plechu je uložena ve vodní lázni kvůli odvádění tepla, generovaného reflexním povrchem součásti, [video 2](#), [video 3](#)),
- začátek řezu je možný i bez předchozího navrtání,
- chemická čistota paprsku je zárukou obrábění bez znečištění obrobku.

3.4. OBRÁBĚNÍ PAPSREM ELEKTRONŮ

Princip metody spočívá ve využití soustředěného svazku elektronů, který vysokou rychlostí (až 3/4 rychlosti světla) dopadá na malou plochu obrobku, kde se energie elektronů mění na jiné formy energie, nejčastěji na energii tepelnou. Paprsek pak působí na zpracovávaný materiál termickým nebo netermickým účinkem (při netermickém účinku se mění chemicky nebo fyzikálně - změna složení a struktury, změna fyzikálních a chemických vlastností, apod.). Tepelný účinek elektronového paprsku může v kompaktním tělese způsobit:

- fázové přeměny v tuhém stavu (kalení),
- rozklad materiálu na těkavé látky (při výrobě děr a řezání různých syntetických materiálů, keramiky, celulózy, atd.),
- roztavení (mikroobrábění, leštění, legování, svařování),
- vypaření (úběr materiálu při výrobě děr a drážek, při řezání a rytí),
- rázové vlny (při drobení materiálů).

Tuto metodu lze použít pro obrábění širokého spektra materiálů (kovových i nekovových), protože není limitována jejich mechanickými nebo fyzikálními vlastnostmi, jako je tvrdost, houževnatost, elektrická vodivost, bod tavení, atd. Nejčastěji se využívá pro řezání materiálů nebo vrtání děr malých průměrů (0,01 až 1 mm), zejména v oblasti elektroniky a mikroelektroniky (např. litografie - výroba integrovaných obvodů s přesností polohování paprsku 0,10 až 0,01 μm). K jejím přednostem patří vysoká účinnost a možnost automatizace pracovního cyklu, k nevýhodám nutnost práce ve vysokém vakuu (10^{-2} až 10^{-4} Pa).

Elektronový paprsek lze také využít k mikroobrábění (obrábění velmi tenkých fólií), značkování, rytí, svařování (tenké plechy v automobilovém a chemickém, ale zejména v leteckém a kosmickém průmyslu) a nanášení tenkých povrchových vrstev (polovodičová technika, elektrické odpory, optický průmysl, dekorativní vrstvy).

3.5. ELEKTROCHEMICKÉ OBRÁBĚNÍ

Elektrochemické obrábění je řízený proces oddělování materiálu prostřednictvím anodického rozpouštění v elektrolytu (viz tabulku 3.6), který proudí mezerou (0,025 ÷ 1,3 mm, rychlost proudění $10 \div 50 \text{ m s}^{-1}$) mezi elektrodami (anoda - obrobek, katoda - nástroj), napájenými stejnosměrným zdrojem nízkého napětí (4 až 30 V) při vysoké hodnotě proudu (50 až 20000 A). Intenzita rozpouštění je závislá na hustotě elektrického proudu (0,2 ÷ 3 A mm^{-2}). Její zvyšování nepříznivě ovlivňuje úběr obráběného materiálu, protože na povrchu elektrod se začínají usazovat oxidy, které vytvářejí pasivační vrstvu, zabraňující dalšímu rozpouštění materiálu obrobku. Vrstva oxidů pak musí být odstraňována přiváděním elektrolytu pod tlakem (70 až 2800 kPa).

Nevhodná volba složení elektrolytu a podmínek obrábění může způsobit mezikrystalickou korozi obráběného materiálu a tím snížit únavovou pevnost obráběné součásti. Negativní vliv může mít i nevhodné vyústění děr a štěrbin pro přívod elektrolytu do pracovní mezery - nevhodné víření elektrolytu má za následek nerovnoměrné rozpouštění obráběného materiálu a nižší rozměrovou přesnost vyrobené součásti.

K základním aplikacím elektrochemického obrábění patří výroba tvarově složitých součástí (zápustky, lisovací nástroje, lopatky turbín), obrábění materiálů s vysokou pevností a tvrdostí (kalené oceli, žárovevné slitiny, slinuté karbidy) a obrábění součástí s malou tuhostí, které by se účinkem řezných nebo upinacích sil mohly při klasickém obrábění deformovat.

Metodou ECM lze frézovat ([obr.1](#), [obr.2](#)), vrtat ([obr.1](#), [obr.2](#)), řezat a brousit. Dosahovaná rozměrová přesnost - 0,02 až 0,05 mm, drsnost povrchu $Ra = 0,1$ až $0,8 \mu\text{m}$.

Proces elektrochemického obrábění je provázen tvorbou značného množství kalů, skládajících se převážně z oxidů a hydroxidů rozpouštěných kovů. Čištění elektrolytu se většinou provádí kontinuálně, filtrací, usazováním a odstředivým způsobem. Při obrábění na více strojích vznikají potíže s ekologickým odstraňováním odpadů, protože kaly obsahují značné množství látek, které mohou být základem pro tvorbu jeďů.

Tab.3.6. Typy elektrolytů

Elektrolyt	Koncentrace [% hm.]	Obráběný materiál	Poznámka
NaCl	5 ÷ 20	Slitiny na bázi Fe, Ni, Cu, Al, Mg, Ti	Silně korozivní, malý vliv na pasivaci, levný, nejedovatý.
NaNO ₃	10 ÷ 20	Slitiny na bázi Fe, Al, Cu, Zn	Univerzální, výrazný pasivační účinek.
NaNO ₂ + inhibitory	do 12	Slitiny na bázi Fe, Ni, Cu, Al, Ti, W, karbidy	Jedovatý, jen pro zvláštní účely
NaSO ₄	10	Slitiny Cu	Jen výjimečně
NaClO ₃	20 ÷ 45	Oceli	Velký úběr a přesnost obrábění, nebezpečná manipulace.
NaOH	do 10	W, Mo, slinuté karbidy	Leptací účinek, obtížná manipulace.
HCl H ₂ SO ₄	do 10	Slitiny na bázi Ni, Cr, Co	Agresivní, náročný na dodržení bezpečnosti, spotřebovává se.

Nástroje

Kritickými faktory při uplatňování elektrochemického obrábění jsou tvar a materiál nástroje. Materiál nástroje musí mít dostatečnou pevnost, dobrou elektrickou a tepelnou vodivost, musí být snadno obrobitelný a odolný proti chemickému působení elektrolytu. Nejčastěji používanými materiály jsou měď, mosazi, bronzy, korozivzdorné oceli, titan, někdy i slinuté karbidy. Jako optimální se doporučují bronzy nebo mosazi.

Nástroj má negativní tvar obrobené plochy hotové součásti, konkrétní rozměry jsou po celé jeho funkční ploše upraveny tak, aby v každé fázi obrábění byla zachována požadovaná konstantní mezera mezi nástrojem a obrobkem. V některých případech jsou potřebné plochy na nástroji opatřeny izolační vrstvou, aby bylo možné cíleně řídit průchod elektrického proudu. Izolační materiály (např. teflon, epoxidové pryskyřice) jsou nejčastěji nanášeny stříkáním.

3.5.1. Elektrochemické obrábění v proudícím elektrolytu

Tato technologie patří k nejrozšířenějším aplikacím při hloubení dutin složitých tvarů v těžkoobrobitelných materiálech. Speciální aplikační oblastí je obrábění vnějších tvarových ploch, např. výroba turbínových [lopatek](#).

Nástroj a obrobek jsou odděleny pracovní mezerou 0,05 až 2 mm, kterou protéká elektrolyt rychlostí 10 až 50 m s⁻¹, pod tlakem až 2,5 MPa. Přířizovací rychlost nástrojové elektrody závisí na pracovním proudu a obráběné ploše (velikost, složitost tvaru) a pohybuje se v rozsahu 0,5 až 10 mm min⁻¹. Protože obrobená plocha nevzniká jako ekvidistanta k funkční ploše nástroje, musí se provést speciální korekce tvaru nástroje, nebo na boční plochy nanést izolace tak, aby se zabránilo zvýšenému úběru obráběného materiálu na přilehlých plochách. Funkční povrch nástroje je vesměs leštěný.

Při hloubení dutin se často používá technologie se směsným elektrolytem (elektrolyt + CO₂ nebo vzduch). Tato technologie umožňuje obrábění při velmi malých mezielektrodových vzdálenostech (pod 0,1 mm), kdy dochází k téměř věrnému kopírování nástrojové elektrody do obrobku a proto lze používat nekorigovaný nástroj.

3.5.2. Elektrochemické obrábění rotující elektrodou

Je kombinací standardního broušení a elektrochemického účinku, přičemž broušením se odstraňuje méně než 10 % materiálu. Hlavní předností metody je velký úběr materiálu při zachování vysoké přesnosti obrábění. Používá se zejména pro obrábění nástrojů ze slinutých karbidů, materiálů s vysokou tvrdostí, křehkých materiálů a materiálů, které jsou náchylné k tepelnému poškození a nedají se brousit klasickými metodami.

Obráběná součást (anoda) je připojena ke kladnému pólu stejnosměrného zdroje, [broušící kotouč](#) (katoda) k zápornému pólu zdroje. Pracovní mezera je vytvářena zrny brusiva, které vystupují z elektricky vodivého pojiva (slitiny Cu). Vystupující zrna brusiva rovněž odstraňují oxidovou vrstvu, která se tvoří na povrchu obrobku v důsledku pasivačních jevů při elektrolytickém rozpouštění. Pro obrábění ocelí je vhodným brusivem oxid hlinitý, pro obrábění slinutých karbidů a kalených ocelí se používá diamant.

Do této skupiny metod je možné zařadit také elektrochemické [honování](#). Honovací hlava s elektricky nevodivými broušícími lištami (Al₂O₃, SiC, diamant v keramické vazbě) je připojena na záporný pól stejnosměrného zdroje, obráběná součást je připojena na kladný pól. Oproti standardnímu honování se docílí 3 až 6-ti násobné zvýšení produktivity práce.

3.5.3. Elektrochemické leštění

Metodu lze použít pro plochy libovolného tvaru, nutnou podmínkou je však čisté jednofázové složení obráběného materiálu. V průběhu [leštění](#) se na obráběném materiálu vytváří vrstva produktů anodického rozpouštění, které se usazují zejména v prohlubních, zatímco na vrcholcích nerovností se tvoří pouze tenký film. Hustota proudu je v místech výstupků vyšší než v místech prohlubní (velký odpor anodové vrstvy v prohlubních), proto na vrcholcích dochází k intenzivnějšímu rozpouštění a nerovnosti se postupně vyhlazují. Množství rozpouštěného materiálu závisí na hustotě proudu, teplotě a složení elektrolytu, druhu obráběného materiálu a na umístění obrobku v elektrolytu.

3.5.4. Elektrochemické odstraňování ostřin

Elektrochemické odstraňování ostřin je velmi účinná metoda, která vylučuje velký podíl manuální práce a umožňuje v krátkých časech odstraňovat ostřiny i z těžko přístupných míst. Současná zařízení umožňují zařazovat tyto operace i do linkového uspořádání výroby. Princip metody spočívá v intenzivním anodickém rozpouštění ostřin, které je způsobeno velkou koncentrací hustoty elektrického proudu právě na ostrých hranách a na vrcholcích ostřin.

Odstraňování ostřin se provádí tvarovou [elektrodou](#), nebo v lázni. Elektrochemické odstraňování ostřin tvarovou elektrodou je vhodné zejména pro průchozí díry. Přívod elektrolytu je orientován tak, aby aktivně působil pouze v místě ostřin.

Elektrochemické odstraňování ostřin v lázni je vhodné pro ostřiny s malou výškou. Používá se zařízení pro kontinuální elektrochemické leštění, případně rotační nebo vibrační bubny, kde grafitové kuličky plní funkci elektrod.

3.6. CHEMICKÉ OBRÁBĚNÍ

Podstatou chemického obrábění je řízené odleptávání vrstev materiálu o tloušťce od několika setin milimetru do několika milimetrů z povrchu obrobku, založené na chemické reakci obráběného materiálu s pracovním prostředím (viz tabulku 3.7). Místa, která nemají být leptána, jsou chráněna speciálním povlakem - maskou (tloušťka 0,2÷2,0 mm). Metoda je ekonomicky výhodná zejména při úběru malých tlouštěk materiálu z obrobků velkých plošných rozměrů a složitých tvarů. V praxi se uplatňuje chemické prostřihování a chemické rozměrové leptání.

Tab.3.7. Typy pracovních kapalin

Obráběný materiál	Pracovní kapalina	Rychlost leptání [mm min ⁻¹]	Leptací faktor F [-]
Al	FeCl ₃ (120÷180 g l ⁻¹)	0,020	1,75
Slitiny Al	NaOH (160÷180 g l ⁻¹)	0,025	
Cu a její slitiny	FeCl ₃ (550÷600 g l ⁻¹)	0,050	2,75
	(NH ₄) ₂ S ₂ O ₈ (120÷240 g l ⁻¹)		
Mg a jeho slitiny	H ₂ SO ₄	0,038	1,00
Si	HNO ₃ + HF + H ₂ O	velmi nízká	
Nízkouhlíkové oceli	FeCl ₃ (550÷600 g l ⁻¹), HNO ₃ (10÷15 %), HCl + HNO ₃ ,	0,025	2,00
Korozivzdorné oceli	FeCl ₃ (550÷600 g l ⁻¹), HCl (50%) + HNO ₃ (5%) + H ₂ PO ₄ (2,5%)		
Slitiny Ti	HF (10÷50 %), HF + HNO ₃	0,025	1,00

Chemické prostřihování

Metoda umožňuje zhotovovat tenké a složité výlisky z tenkého plechu a fólií bez otřepů. K typickým aplikacím patří výroba elektroplechů pro elektrické motory, elektrické kontakty a svorky, jemná síta, clony, šablony apod. Ve většině aplikací je obrys výrobku přenášen na polotovar fotochemickým tištěním. Princip přenosu spočívá v nanesení fotosenzitivní vrstvy na povrch polotovaru, na kterou se fotografickou cestou přenáší obrys výrobku. Fotosenzitivní vrstva jednak lokalizuje odleptávaná místa a jednak chrání místa, která nemají být leptána.

Chemické rozměrové leptání

Tato metoda je také označována jako **chemické frézování**. Místa, která nemají být leptána, se chrání ochrannou vrstvou z polyvinylových pryskyřic, polyamidových pryskyřic nebo speciálních laků. Tvar obrobku se přenáší na polotovar vesměs podle šablon. Leptání se provádí ponořením do leptacích roztoků. Typickým jevem rozměrového leptání je tzv. „podřezávání“ materiálu, tj. odleptání materiálu v oblasti pod ochrannou maskou, které lze kvantifikovat hodnotou leptacího faktoru **F** (viz tab.3.7).

Chemické rozměrové leptání se nejčastěji používá pro obrábění slitin Mg a Ti, lze jej však použít i pro nelegované, korozivzdorné a žáruvzdorné oceli. Drsnost povrchu dosahuje v závislosti na obráběném materiálu hodnot Ra = 0,4 až 6,3 μm. Rychlost odleptávání se pohybuje v rozsahu 0,01 až 0,04 mm min⁻¹, hloubka odleptávané vrstvy závisí na odolnosti nátěru proti chemickému rozrušení. Ochranné nátěry snesou dobu leptání do 10 hod., čemuž odpovídají hloubky leptání do 10 mm.

Výhody metody:

- úběr materiálu nezpůsobuje vznik zbytkových napětí v obrobku,
- metoda zabezpečuje rovnoměrné obrábění složitých profilů,
- lze vytvářet velmi tenké profily,
- lze obrábět většinu kovových slitin,
- tvrdost a křehkost obráběného materiálu nejsou limitujícími faktory,
- rozměry obrobku jsou omezeny pouze rozměrem nádrže, do které jsou ponořeny,
- lze dosáhnout úzké tolerance ($\pm 0,25$ mm), i u větších rozměrů,
- nízké provozní náklady.

Nevýhody metody:

- vznik nekontrolovatelného podřezávání,
- nelze vytvářet ostré hrany,
- výroba hlubokých tvarů není hospodárná,
- pro zabezpečení rovnoměrnosti odleptávané vrstvy se u ocelí vyžaduje homogenní struktura,
- nelze obrábět svary a nálitky (různorodá struktura se projeví ve špatné jakosti povrchu),
- náklady na obrábění jsou závislé na výchozí jakosti obráběného povrchu (např. rýhy a koroze způsobují nerovnoměrné odleptávání a vznik různých vad),
- někdy se musí povrch po chemickém leptání mechanicky leštit,
- nedoporučuje se výroba drážek s menší šířkou, než je dvojnásobek jejich hloubky,
- titanové slitiny vyžadují speciální pracovní kapaliny,
- nutno zachovat zvýšenou pozornost z hlediska bezpečnosti a ochrany zdraví při práci.

3.7. OBRÁBĚNÍ ULTRAZVUKEM

Proces úběru materiálu při obrábění ultrazvukem je společným důsledkem mechanického účinku abrazivních zrn, která se nacházejí mezi obrobkem a nástrojem, kmitajícím s ultrazvukovou frekvencí (20÷30 kHz, amplituda 10÷100 μm) a kavitačního a chemického účinku kapaliny, kterou jsou k obráběnému povrchu přiváděna abrazivní zrna. Velká kinetická energie zrn abraziva způsobuje narušování celistvosti obráběného povrchu, kavitační účinky navíc umožňují rychlou výměnu opotřebených zrn za nová. Kapalné prostředí (voda, benzín, petrolej, lín) umožňuje lepší pronikání ultrazvukové energie do místa obrábění, nejlepších výsledků se dosahuje při použití vody.

Jako brusivo se používají zrna B_4C , SiC , Al_2O_3 , výjimečně diamantová zrna nebo zrna kubického nitridu boru. Koncentrace brusiva v kapalině se v závislosti na tvrdosti obráběného materiálu pohybuje v rozsahu 30 až 40 hm.% (při přívodu suspenze pod tlakem může být koncentrace snížena na 20 hm.%). S rostoucí velikostí zrna (30÷50 μm - zrnitost 200÷400 podle ISO 525-75 pro hrubování, 9÷14 μm - zrnitost 800÷1000 pro dokončování) narůstá úběr obráběného materiálu, klesá přesnost obrábění, zvětšuje se pracovní mezera a opotřebenění nástroje. Úběr narůstá i při zvětšování amplitudy a frekvence kmitů (s rostoucí frekvencí ale klesá účinnost procesu).

Systémy pro vytvoření mechanických kmitů s ultrazvukovou frekvencí se skládají z generátoru, měniče (mění elektrickou energii na mechanickou využitím magnetostričního, případně piezoelektrického efektu) a koncentrátoru amplitudy, se kterým je spojen nástroj. Koncentrátory se používají pro zvětšení amplitudy kmitů, která na výstupu měniče dosahuje hodnoty pouze 10^{-5} až 10^{-6} mm. Základní charakteristikou koncentrátoru je proto velikost zesílení, tj. hodnota, udávající kolikrát je amplituda v místě připojení nástroje větší než na vý-

stupu měniče (od 4 až 6 u stupňovitého koncentrátoru až po 22 u exponenciálního koncentrátoru). Současné moderní ultrazvukové obráběcí stroje jsou velmi často vybaveny CNC řízením (Gildemeister Ultrasonic 35 - [uzavřený kryt](#), [otevřený kryt](#)).

Ultrazvukem jsou obráběny zejména tvrdé (nad 40 HRC) a křehké materiály (měkké materiály nelze tímto způsobem obrábět, protože v nich ulpívají zrna abraziva) - sklo, křemík, keramika (příklady [obrobených povrchů](#) - Al_2O_3 , SiO_2 , ZrO_2), grafit, kompozity, slinuté karbidy, apod. - s rostoucí tvrdostí klesá obrobiteľnost. Při procesu obrábění působí abrazivní zrna nejen na obrobek, ale i na nástroj, proto jsou nástroje kvůli snížení opotřebenění vyráběny z pružných a houževnatých materiálů, jako jsou korozivzdorné oceli, nebo pro menší úběry měď a mosazi.

Ultrazvukové technologie jsou charakteristické širokou oblastí použití, do které patří (● obráběcí metody, * jiné metody):

- dělení materiálů,
- hloubení drážek a děr kruhových i nesymetrických tvarů (komplexnost tvaru je limitována pouze konfigurací nástroje); minimální průměr díry - 0,003 mm, maximální poměr hloubky díry k jejímu průměru - 3:1,
- broušení, lapování a leštění skla a keramiky,
- výroba tvarově složitých elektrod pro elektrojiskrové metody obrábění,
- výroba tvářecích nástrojů ze slinutých karbidů,
- výroba trysek z keramických materiálů,
- řezání a vrtání kompozitních materiálů,
- tvarování diamantů a jiných drahých kamenů s použitím diamantových nebo KNB prášků,
- * čištění produktů a dílců (odmašťování a příprava povrchů před PVD povlakováním, čištění zlatých a stříbrných šperků),
- * pájení (zejména u hliníku a jeho slitin, kde je destruktivní účinek ultrazvukových kmitů využíván k odstranění povrchových oxidových vrstev),
- * svařování (svařování plastických hmot a fólií bez tepelného zdroje),
- * tváření (speciální postupy).

Podobně, jako je tomu u laseru, lze i ultrazvuk použít jako podpůrný prostředek běžných metod obrábění, zejména při vrtání nebo frézování. Při vrtání je např. standardní rotující diamantový vrták rozkmitán ultrazvukovou frekvencí 20 kHz (amplituda 0,025 až 0,050 mm), do místa řezu se ale nepřivádí kapalina se zrny abraziva. Kmitání špičky vrtáku snižuje tření mezi nástrojem a obrobkem, brání zadírání, umožňuje lepší průtok řezné kapaliny a zkracuje jednotkové strojní časy. K dalším přednostem této metody patří větší úběr obráběného materiálu, menší tlaky nástroje na jemné součásti a zlepšení podmínek při hlubokém vrtání. Ultrazvukem podporované vrtání je výhodné i z toho důvodu, že na okraji díry (především při vrtání křehkých materiálů) nevznikají trhliny.

3.8. OBRÁBĚNÍ VODNÍM PAPERSEM

Obrábění vodním paprskem využívá k oddělování materiálu kinetickou energii vysokotlakého a vysokorychlostního (rychlost proudění 600 až 900 m s^{-1}) vodního paprsku (řezání čistým vodním paprskem - hydrodynamické obrábění, pracovní tlak až 690 MPa), kombinovanou s kinetickou energií abrazivních částic (vodní paprsek s abrazivem, pracovní tlak vody 60 až 400 MPa).

V případě paprsku s abrazivem dochází k úběru materiálu vysokorychlostním erozivním procesem, v důsledku působení řezného média (abrazivní částice), usměrněného do úzké-

ho paprsku s vysokým řezným účinkem. [Paprsek](#) prochází tryskou [řezací hlavice](#) ([Omax](#) - programovatelná pětiosá hlavice), proniká do obrobku, kde při vzájemném tření s materiálem obrobku postupně ztrácí svoji energii a vychyluje se z původního směru. Tento jev je doprovázen [zhoršováním jakosti](#) povrchu obrobku s rostoucí vzdáleností od místa vstupu paprsku a může být [potlačen](#) tzv. oscilačním řezáním, kdy rychlost pohybu paprsku v_p není konstantní, ale v průběhu času se s určitou frekvencí mění. Kvalita řezu je ovlivněna výtokovým průměrem trysky (0,75÷2,50 mm), tlakem vody, rychlostí pohybu paprsku, rychlostí proudění, vzdáleností ústí trysky od povrchu obrobku, úhlem sklonu paprsku, druhem abraziva a aditivy, obsaženými ve vodě. Aditiva (různé polymery s lineárními molekulami) zabráňují nadměrné turbulenci a napomáhají tak vytvoření souvislého, vysoce účinného paprsku, který si zachovává kompaktní jádro a při styku s obráběným materiálem se netříští.

Hlavními prvky [zařízení](#) pro řezání vodním paprskem (Aliko - [obr.1](#), [obr.2](#), Omax - [obr.1](#), [obr.2](#), PTV - [obr.1](#), [obr.2](#), [Romeo](#)) jsou [hydraulická jednotka](#) s čerpadlem a multiplikátorem (násobičem tlaku), filtry, ventily, potrubí pro rozvod vody, systém dávkování abraziva, řezací hlavice, zařízení pro pohyb řezací hlavice ve třech osách x, y, z, opěrný rošt pro podepření obrobku, lapač nečistot, systém úpravy a recyklace vody a řídicí NC nebo CNC systém.

Na výkon řezání a jakost povrchu obrobku má velký vliv druh a dodávané množství abraziva (udává se v jednotkách $g \cdot min^{-1}$), stejně jako tvar a velikost jeho zrn. Mezi běžně používaná abraziva patří:

- [granát](#) ($5Al_2O_3 \cdot 3Y_2O_3$ nebo $[Fe_3Al_2(SiO_4)]_3$) - nejčastěji používaný, vyšší cena, vyšší účinek, více opotřebovává trysku, není příliš vhodný pro recyklaci,
- oxid hlinitý - Al_2O_3 ,
- olivín - $(Mg,Fe)_2(SiO_4)$,
- křemičitý písek - nízká cena, nižší účinek a opotřebení trysky, nevhodný pro recyklaci,
- ocelová drť nebo broky.

Výhody technologií WJM a AWJM lze při porovnání s jinými nekonvenčními, případně i standardními metodami obrábění shrnout následovně:

- vysoká energetická účinnost (až 80%),
- relativně studený řez, který umožňuje řezat materiály citlivé na teplo,
- obrobek nevykazuje tepelnou ani mechanickou deformaci,
- v obrobku nejsou zbytková napětí, ani mikrotrhliny,
- proces je bezprašný, nevznikají žádné plyny nebo páry,
- malé ztráty materiálu v důsledku úzkého řezu,
- jedno vysokotlaké čerpadlo může současně napájet až 70 trysek paprsku bez abraziva nebo 8 trysek paprsku s abrazivem,
- vysoká životnost trysek (100 hodin u WJM, 50 hodin u AWJM),
- možnost řezání pod hladinou vody,
- řezání bez omezení směru, obrysů, tvarů nebo úkosů,
- mimořádná spolehlivost a jednoduchost obsluhy,
- změnou tlaku lze v krátkých časových úsecích oplachovat, otryskávat, čistit nebo řezat,
- možnost řezání vlnitých materiálů, jako jsou např. střešní krytiny (malá citlivost na změnu vzdálenosti ústí trysky od řezaného povrchu),
- vysoká flexibilita i při složité geometrii výřezu,
- přesné čištění a leštění povrchu těžkoobrobitelných materiálů (např. keramiky),
- obrobky není třeba upínat,
- šetrnost k životnímu prostředí, možnost recyklace odpadů,
- možnost CNC řízení.

Za jednu z mála nevýhod lze považovat možnost vzniku koroze u materiálů, které ji snadno podléhají (tento nedostatek lze vhodným způsobem omezit nebo odstranit).

Tab.3.8. Obecné porovnání vybraných procesů dělení materiálu

Metoda	Plazma	Laser	Vodní paprsek
Dělitelné materiály	Pouze železné a neželezné kovy	Všechny, mimo kompozitů a materiálů, které mají vysokou světelnou odrazivost	Všechny materiály
Teplota řezu	Horký řez	Teplý řez	Studený řez
Vliv teploty řezu na materiál	Velký	Malý	Není
Změny struktury materiálu v místě řezu	Velké	Malé	Žádné
Kolmost řezu	Silný odklon	Mírný odklon	
Drsnost povrchu obrobenej plochy	Výrazné striace (rýhy)	Nízká drsnost	Lze dosáhnout nízké drsnosti (závisí na podmínkách)
Výronek v řezné spáře	Možno bez výronku	Většinou bez výronku	Vždy bez výronku
Tvrdost řezaného materiálu	Nemá vliv na rychlost řezání		Mírně ovlivňuje rychlost řezání
Řezání plastů	Není možné	Problematické - toxicita	Je možné
Řezání kompozitů	Je možné, pokud jsou na bázi kovů	Je možné, pokud mají složky stejnou teplotu tavení	Je velmi vhodné
Řezání keramiky, skla, kamene	Není možné	Velmi omezené	Je velmi vhodné, s výjimkou kalených skel
Reliéfní obrábění	Není možné	Je možné	Výjimečně
Velikost dílce	Velké dílce	Malé i velké dílce	
Tloušťka materiálu	Střední a velká	Malá a střední	Velmi široký rozsah
Složitost tvaru	Jednoduché tvary	Komplikované tvary	
Průstřel	Je možný		
Vznik plyných emisí	Velké množství	Malé množství	Bez vývinu, nebo jen při průstřelu
Vznik oxidických povlaků	Vznikají	Pouze při řezání s kyslíkem	Pouze u materiálů, korodujících při styku s vodou

Technologie vodního paprsku bez abraziva nebo s abrazivem nabízejí široké možnosti řezání ([video-1](#), [video-2](#), [video-3](#), [video-4](#)) různých materiálů ([obr.1](#), [obr.2](#), [obr.3](#)) v různých průmyslových odvětvích:

- chemický průmysl - dělení výbušných látek (dynamit, tuhá paliva raketových motorů),
- potravinářský průmysl - dělení potravin v syrovém i zmraženém stavu (zelenina, ovoce, čokolády, sýry, maso, atd.),
- elektrotechnický a elektronický průmysl - řezání feritů, keramiky, skla, amorfních látek, permanentních magnetů, desek [tištěných spojů](#),
- strojírenský průmysl - řezání titanu, wolframu, tantalu, uranu, velmi tvrdých a těžkoobrobitelných materiálů (slnuté karbidy, superslitiny na bázi Ni nebo Co), [kompozitů](#), skel,

izolačních materiálů, výroba [tvarově složitých](#) součástí (lopatky a díly proudových a raketových motorů, turbin a kompresorů), řezání vláknitých materiálů,

- stavební průmysl - dělení plastů (polyuretany, polystyrény, atd.), čedičové vaty, azbestu, betonu, keramiky,
- gumárenský průmysl - řezání gumy, plastů, vláken,
- papírenský průmysl - řezání papíru ([obr.1](#), [obr.2](#)), fólií, buničiny (bezprašná pracoviště bez nebezpečí elektrostatických výbojů),
- obuvnický průmysl - řezání kůže, plastických hmot,
- sklářský průmysl - řezání (až do tloušťky 200 mm), vrtání a matování všech druhů skel, tvarové řezy,
- jaderná energetika - dekontaminace a odstraňování ochranných železobetonových vrstev v zařízeních pro jaderné elektrárny, čištění a odstraňování usazenin.

Mimo nejčastější aplikace, kterou je řezání, lze vodní paprsek použít i pro vrtání, soustružení a frézování (paprsek se používá jako nástroj namísto klasického vrtáku, soustružnického nože nebo frézy).

Tab.3.9. Orientační hodnoty rychlosti řezání, AWJM, abrazivo - granát

Tl. [mm]	Kva- lita	O	KO	Al	Cu	M	Ž	S	P	St
		v_p [mm min ⁻¹]								
1	1	450	360	975	750			750	1800	1500
	2	570	450	1350	1050				2250	1800
	3	690	555	1950	1500				3000	2250
2	1	345	278	750	600			1500	1350	1200
	2	420	330	1050	825				1575	1425
	3	450	420	1350	1050				1800	1800
3	1	225	180	600	450			1800	1050	1125
	2	300	240	750	600			2250	1275	1350
	3	390	300	975	750			2700	1500	1650
4	1	150	120	375	300			1500	825	900
	2	210	165	480	375			2100	1050	1050
	3	255	203	600	450			3000	1350	1350
5	1	135	150	270	210			1200	675	750
	2	180	143	345	270			1800	825	900
	3	225	180	450	345			2250	1050	1125
10	1	75	60	173	135	300	225	600	270	420
	2	98	75	225	173	360	263	750	330	495
	3	135	105	285	218	480	345	900	450	630
20	1	38	30	120		120	90	180		300
	2	45	38	158		165	120	240		360
	3	53	45	210		225	158	300		450
30	1	18	15	90		83	60	90		
	2	24	20	113		105	75	120		
	3	30	24	135		135	98	165		
40	1			60			38			
	2			83			45			
	3			105			56			

O - ocel, KO - korozivzdorná ocel, Al - hliník, Cu - měď, M - mramor, Ž - žula, S - sklo, P - plexisklo, St - sklotextil

4. LITERATURA

1. ABA Z&B SCHLEIFMASCHINEN GmbH. Reutlingen-Mittelstadt, Germany. *Double-column machines in portal form - TWINMASTER*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.ziersch-grinding.de/scripts/content.php4?LANG=en&NAVID=13>>.
2. ABRASIVE TECHNOLOGY. Ohio, USA. *Diamond & CBN grinding tools*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.abrasive-tech.com/>>.
3. ABRASIVE TECHNOLOGY. Ohio, USA. *P.B.S.® vs. Electroplating*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.abrasive-tech.com/pdf/tpbsvsep.pdf>>.
4. ALABAMA LASER - A Division of Alabama Speciality Products, Inc. Munford, Alabama, USA. *5-axis Video Clips*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <[http://www.alspi.com/videos\(5axis\).htm](http://www.alspi.com/videos(5axis).htm)>.
5. ALABAMA LASER - A Division of Alabama Speciality Products, Inc. Munford, Alabama, USA. *Laser Blanking Video Clips*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <[http://www.alspi.com/videos\(blanking\).htm](http://www.alspi.com/videos(blanking).htm)>.
6. ALABAMA LASER - A Division of Alabama Speciality Products, Inc. Munford, Alabama, USA. *LASOX® Video Clips*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <[http://www.alspi.com/videos\(lasox\).htm](http://www.alspi.com/videos(lasox).htm)>.
7. ALABAMA LASER - A Division of Alabama Speciality Products, Inc. Munford, Alabama, USA. *Laser Welding Video Clips*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <[http://www.alspi.com/videos\(welding\).htm](http://www.alspi.com/videos(welding).htm)>.
8. ALABAMA LASER - A Division of Alabama Speciality Products, Inc. Munford, Alabama, USA. *Sheet Cutting Video Clips*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <[http://www.alspi.com/videos\(sheet\).htm](http://www.alspi.com/videos(sheet).htm)>.
9. ALABAMA LASER - A Division of Alabama Speciality Products, Inc. Munford, Alabama, USA. *Tube Cutting Video Clips*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <[http://www.alspi.com/videos\(tube\).htm](http://www.alspi.com/videos(tube).htm)>.
10. ALABAMA LASER - A Division of Alabama Speciality Products, Inc. Munford, Alabama, USA. *5-axis Video Clips*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <>.
11. ALIKO AUTOMATION Oy. Urjala, Finland. *The Aliko Water Jet Cutting System*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.aliko.fi/pdf/aliko_eng.pdf>.
12. ALOMA SHIM AND MANUFACTURING. Oakmont, Pennsylvania, USA. *Water jet cutting services*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.aloma.com/watercut.aspx>>.
13. AOYAMA, S., TAMURA, K., SATO, T., KIMURA, T., SAWAHATA, K., NAGAI, T. High-performance Coated Wire Electrodes for High-speed Cutting and Accurate Machining. *Hitachi Cable Review*. 18/1999. pp. 75-80. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.hitachi-cable.co.jp/en/review/18/review13.pdf>>.
14. BAUBLIES AG - ROLLIERWERKZEUGE. Renningen-Malsheim, Germany. *Tools*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.baublies.de/Baublies/e/index.php?w=1280>>.
15. BĚKĚŠ a kol. *Obrábání kovů*. Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, Edícia strojárскеj literatúry. Bratislava, 1960. 467 s. DT 621.91.05.
16. BEST-BUSINESS, a.s. Kunštát na Moravě. *Production assortment*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.bestb.cz/sortiment_a.html>.
17. BOCCA & MALANDRONE SUNEBO S.p.A. *News*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.boccamalandronesunebo.it/news.htm>>.
18. *Brusivo pro přesné broušení*. Rappold Brno, s.r.o.

19. CARISTAN, Ch.L. *Laser Cutting Guide for Machining*. Society of Manufacturing Engineers. Dearbon, Michigan, USA. 2004. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.sme.org/gmn/BK/chapters/BK03PUB38.pdf>>.
20. CENTER FOR NON TRADITIONAL MANUFACTURING RESEARCH. Lincoln, Nebraska, USA. *Electrical discharge machining process*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.unl.edu/nmrc/Processmech/Processmech.htm>>.
21. ČESKÁ ZBROJOVKA a. s. Uherský Brod, Česká republika. *Výrobní možnosti*. [CD disk]. Verze pro Windows 98 SE, XP, 2000, 2003. Česká zbrojovka a.s., 2004.
22. ČSN ISO 3002-5. *Základné veličiny pri rezaní a brúsení. Časť 5: Základná terminológia brúsnych operácií používajúcich brúsiace kotúče*. Český normalizační institut, 1993. MDT 621.923:001.4.
23. D'EVELYN, M.P. *Industrial Diamond*. General Electric Research & Development Center. Technical report. March 2001. 2001CRD026. 31 pp.
24. DISKUS WERKE SCHLEIFTECHNIK GmbH. Dietzenbach, Germany. *Diskus Double Face Grinding Machines*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.diskus-werke.de/Content_English/frame_english/frameset_english.htm>.
25. ECOROLL - AG. Celle, Germany. *Deep rolling, versatile and efficient against Fatigue*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.ecoroll.de/6090e.pdf>>.
26. ELEMENT SIX Ltd. Clare, Ireland. *ABN - Cubic boron nitride abrasives*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.e6.com/e6/uploaded_files/335_en.pdf>.
27. ELH EUROLASER GmbH. Seevetal, Germany. [online]. *Laser Cutting Systems*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.eurolaser.com/index-czech.html>>.
28. ENGIS CORPORATION - USA. Wheeling, Illionis, USA. *Electrogrip Superabrasive*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.engis.com/electrogrip/electrogrip.html>>, <<http://www.engis.com/catalogs/eg/eg10-11.pdf>>.
29. ERL PERFORMANCE, Inc. New Albany, Indiana, USA. *Engine Services*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.erlperformance.com/art/honing2lg.jpg>>, <http://www.erlperformance.com/high_performance_engine_services.asp>.
30. ERWIN JUNKER MASCHINENFABRIK GmbH. Nordrach, Germany. *Quickpoint - Everything in One Clamping*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.junker-group.com/eng/data/QUICKPOINT_E_1004.pdf>.
31. FLOW INTERNATIONAL CORPORATION. Kent, Washington, USA. *Waterjet slitting systems are the fastest, most efficient way to cut paper products*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.flowcorp.com/uploadedfiles/Resources/Brochures/Waterjet_Brochures/Systems/UHP%20Slitting%20Systems.pdf>.
32. FRITZ STUDER AG. Thun, Germany. *Product overview*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.studer.com/redwork/do.php?node=2141637383&layoutid=405&language=2>>.
33. GEHRING GmbH & Co. KG. Ostfildern, Germany. *Blind Hole Boring Tools*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.gehring.de/enpdf/BlindBore.pdf>>.
34. GEHRING GmbH & Co. KG. Ostfildern, Germany. *Laser honing*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.gehring.de/en/c1-2.php>>. <<http://www.gehring.de/enpdf/LaserHoning.pdf>>.
35. GEHRING GmbH & Co. KG. Ostfildern, Germany. *Product Line Abrasives*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.gehring.de/enpdf/Abrasives.pdf>>.

36. GILDEMEISTER Aktiengesellschaft. Bielefeld, Germany. *Ultrasonic complete machining of Advanced materials with ULTRASONIC Series*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.gildemeister.com/en.ultrasonic.ultrasonic>>.
37. GLEASON COROPRATION. Rochester, NY, USA. *400GX CNC - Precision Gear Grinder*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.gleason.com/new/cylindricalproducts/machines/images/400GX_CNC_07-16-03_FINAL.pdf>.
38. GLEASON COROPRATION. Rochester, NY, USA. *Gleason - Hurth ZH 200 Gear Power Honing Machine*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.gleason.com/new/cylindricalproducts/machines/images/ZH%20200%20engl.-2003-09-25.pdf>>.
39. GLEASON COROPRATION. Rochester, NY, USA. *Profile Grinding Machines P400G - P600G - P600/800G*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.gleason.com/new/cylindricalproducts/machines/images/W147_13701_P400_600_800G_e.pdf>.
40. GLEASON COROPRATION. Rochester, NY, USA. *Profile Grinding Machines P800G - P2800G*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.gleason.com/new/cylindricalproducts/machines/images/W148_13801_P800_G_P2800G_e.pdf>.
41. GUZZO, P.L., SHINOHARA, A.H., RASLAN, A.A. A Comparative Study on Ultrasonic Machining of Hard and Brittle Materials. *J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng.* January-March 2004, Vol. XXVI, No.1. pp. 58-61.
42. HYDROCUT WATERJET. Huntington Brach, California, USA. *Photo Gallery*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.hydrocutwaterjet.com/photo.htm>>.
43. CHEIL GRINDING WHEEL IND. Co., Ltd. Gyunggi-Do, Korea. *Product information*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.grinding.co.kr/cheil/product/list.asp>>.
44. CHEN, F.L., SIORES, E. The effect of cutting jet variation on surface striation formation in abrasive water jet cutting. *Journal of Materials Processing Technology*. No. 135, 2003, pp. 1-5.
45. ICHIDA, Y., SATO, R., MORIMOTO, Y., KOBAYASHI, K. Material removal mechanisms in non-contact ultrasonic abrasive machining. *Wear*. 258/2005. pp. 107-114. ISSN 0043-1648.
46. INSTITUTE OF PHYSICS AND IOP PUBLISHING Ltd. London, United Kingdom. *Simulation of abrasive water jet cutting process: Part 1. Unit event approach*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <http://ej.iop.org/links/q27/kaWGPNwoXuSHDg4sCWhoig/msmse4_6_010.pdf>.
47. JAHANMIR, S., RAMULU, M., KOSHY, P. *Machining of Ceramics and composites*. Marcel Dekker, Inc., New York, USA. 704 pp. ISBN 0-8247-0178-X.
48. JOHNSON D. *Shot Peening to Improve the Life of Atomizer Components*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.omegatomizers.com/attachments/shot%20peen%202000.pdf>>.
49. KAHLMAN, L., ÖJMERTZ, K.M.C., FALK, L.K.L. Abrasive-waterjet testing of thermo-mechanical wear of Ceramics. *Wear*. 248/2001. pp. 16-28. ISSN 0043-1648
50. KEMPF GmbH. Reichenbach, Germany. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.kempf-tools.de/PDF/glattwalzen/Universalglattwalzwerk.pdf>>.
51. KIM, B.H., NA, C.W., LEE, J.S., CHOI, D.K., CHU, C.N. Micro Electrochemical Machining of 3D Micro Structure Using Dilute Sulfuric Acid. *Annals of the CIRP*. Session on Electro-Physical & Chemical Processes (E8). Vol. 54/1/2005. [CD disk]. ISSN 1660-2773.

52. KLUCH Z. *Metoda AWJ s rozhraním CAD/CAM jako alternativní řešení výroby vybrané součásti*. Bakalářská práce v oboru „Strojírenská technologie - obrábění“. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. 2003. 63 s.
53. KOČMAN, K. a PROKOP, J. *Technologie obrábění*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., Brno, 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
54. KOMATSU AMERICA INDUSTRIES Llc. Wood Dale, Illinois, USA. *RASORTM - Fine plasma Cutting Technology*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://fineplasma.com/brochures/plasma.pdf>>.
55. KOVOSVIT MAS a. s. Sezimovo Ústí. *Univerzální soustruh s možností technologie válečkování, MASTURN 70/3000 CNC ROLLER*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.kovosvit.cz/czech/cmast70rol.php>>.
56. KRÍŽ, R., VÁVRA, P. a kol. *Strojírenská příručka 7. svazek*. SCIENTIA, s.r.o., pedagogické nakladatelství. Praha, 1996. 212 s. ISBN 80-7183-024-0.
57. *Large High-Capacity Honing Machines Types KSS+G+HH*. Gehrting Maschinenfabrik GmbH & Co. Ostfildern, Germany. 2/95.
58. LIDKÖPING MACHINE TOOLS AB. Lidköping, Sweden. *Centerless grinding of camshafts and crankshafts*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.lidkoping.com/machines/pdf/camcraft.pdf>>.
59. LIDKÖPING MACHINE TOOLS AB. Lidköping, Sweden. *Double face grinding machine for high-output precision grinding - Lidköping DG 500*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.lidkoping.com/machines/pdf/DG500ENG.pdf>>.
60. LOESER GmbH. Speyer, Germany. *Latest models*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.loeser.de/uk/products/rundschl/rund-pdf/wumag.pdf>>.
61. MAŇKOVÁ I. *Progresívne technológie*. Technická univerzita Košice, Strojnícka fakulta. Edícia vedeckej a odbornej literatúry. Viena, vydavateľstvo a tlačiareň Košice, 2000. 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
62. MECH-INDIA ENGINEERS Pvt., Ltd. Thane, India. *Diamond Burnishing Tools*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.mechindia.com/>>.
63. MECH-INDIA ENGINEERS Pvt., Ltd. Thane, India. *Roller Burnishing Tools*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.mechindia.com/cat/pdfs/RollerBurnishing.pdf>>.
64. MICHIGAN STATE UNIVERSITY COLLEGE OF ENGINEERING. East Lansing, Michigan, USA. *Nontraditional machining and thermal cutting processes*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.egr.msu.edu/~pkwon/me477/nontrad.pdf>>.
65. MOPAR ACTION ONLINE. *Project Bold Beeper*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.moparaction.com/Tech/beep/03.jpg>>, <<http://www.moparaction.com/Tech/archive/Bold-Beeper.html>>.
66. MSI MOTOR SERVICE INTERNATIONAL. Neckarsulm, Germany. *Honování motorových bloků z šedé litiny*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.msi-motor-service.de/download/broschueren/honen_cz.pdf>.
67. NETFIRMS, Inc. Toronto, Ontario, Canada. *Laser Beam versus Water Jet Machining*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <http://machine-tools.netfirms.com/21_laser_versus_water_jet.htm>.
68. Novinky od firmy Supfina. *Technika a trh*. 9/2005. s. 36. ISSN 1210-5902.
69. NTC America Laser Group. Farmington Hills, Michigan, USA. *The TLM Series Laser Cutting System*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.ntclaser.com/tlm.htm>>.

70. NTC America Laser Group. Farmington Hills, Michigan, USA. *The TLN Series Cantilever Style 3-axis Laser Cutting System*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.ntclaser.com/tln.htm>.
71. NTC America Laser Group. Farmington Hills, Michigan, USA. *The TLV Series 3-axis Laser Cutting System*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.ntclaser.com/tlv.htm>.
72. OMEGA ATOMIZERS. Grand Prairie, Texas, USA. *Shot Peening to Improve the Life of Atomizer Components*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.omegatomizers.com/attachments/shot%20peen%202000.pdf>.
73. OSBORN INTERNATIONAL GmbH. Burgwald, Germany. *Microabrasive brushers*. [online]. Dostupné na World Wide Web: http://www.osborn.de/Download/kataloge/mikro_deu_engl.pdf.
74. *Präzisions-Honmaschinen Baureihe M*. Maschinenfabrik GEHRING GmbH & Co. Ostfildern. 2/81.
75. *Präzisions-Honmaschinen Baureihe P*. Maschinenfabrik GEHRING GmbH & Co. Ostfildern. 2/84.
76. *Präzisions-Honmaschinen Baureihe Z*. Maschinenfabrik GEHRING GmbH & Co. Ostfildern. 2/59.
77. PROGRESSIVE TECHNOLOGIES Inc. Grand Rapids, Michigan, USA. *Downloads*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.ptihome.com/downloads.php#shot>.
78. ROLLMATIC BA. Le Landeron, Switzerland. *GrindSmart® 620XS - Brochure*. [online]. Dostupné na World Wide Web: http://www.rollmatic.ch/downloads/brochures/620XS16pcatalog_en.pdf.
79. ROLLMATIC BA. Le Landeron, Switzerland. *Microgrind D2000X - Brochure*. [online]. Dostupné na World Wide Web: http://www.rollomatic.ch/downloads/brochures/2000Xcatalog_en.pdf.
80. ROLLMATIC BA. Le Landeron, Switzerland. *Product range*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.rollomatic.ch/mainproducts.php>.
81. SAINT-GOBAIN ABRASIVES. *Norton Abrasives for the Industrial Market*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.ind.nortonabrasives.com/home.asp>.
82. SCHNEIDER, G. *Cutting Tools Applications*. George Schneider, Jr. Farmington Hills, Michigan, USA. 243 pp. ISBN 0-615-12191-8.
83. SOMOS INTERNATIONAL. St Georges les Bx, France. *MDF „S“ series machines*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.somos.fr/>.
84. SOO, H.L., XIAOPING, L. Study of the surface integrity of the machined workpiece in the EDM of tungsten carbide. *Journal of Materials Processing Technology*. 139/2003. pp. 315-321.
85. STAHLI USA. Wauconda, Illinois, USA. *DLM 500 - 700 Series - flathoning, lapping and polishing*. [online]. Dostupné na World Wide Web: http://www.stahliusa.com/machines/dlm_500_700.htm.
86. STÖSSEL-SITTIG, C., SCHNYDER, B., KÖTZ, R. XPS and AES surface characterization of WC-Co after electro-discharge machining. *Surf. Interface Anal.*, 36/2004. pp. 777-779.
87. SUMITOMO ELECTRIC U.S.A., Inc. New York, USA. *High Performance Electrode Wire for WEDM*. [online]. Dostupné na World Wide Web: http://www.sumitomoelectricusa.com/scripts/products/edm/en/out/pdf/WEDM/CT/SZ_P_R_Charmilles.pdf.
88. *Syntetické diamanty*. Nářadí, n. p. Praha. Středisko průmyslového diamantu.

89. TACHELLA MACCHINE. Cassine, Italia. *Choose your Proflex!* [online]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.tacchella.it/prodotti.asp?f=PROFLEX3%20H260/50&lingua=1#download>.
90. TRUMPF Laser GmbH + Co KG. Schramberg, Germany. *Extract of the book: The Fascinating World of Sheet Metal - Chapter 06.* [online]. Dostupné na World Wide Web: http://www.trumpf.com/3.img-cust/Sh_Metal_Chapter_06-Lasers.pdf.
91. TRUMPF Laser GmbH + Co KG. Schramberg, Germany. *Extract of the book: The Fascinating World of Sheet Metal - Chapter 07.* [online]. Dostupné na World Wide Web: http://www.trumpf.com/3.img-cust/Sh_Metal_Chapter_07-Laser_cutting.pdf.
92. TRUMPF Laser GmbH + Co KG. Schramberg, Germany. *Extract of the book: The Fascinating World of Sheet Metal - Chapter 12.* [online]. Dostupné na World Wide Web: http://www.trumpf.com/3.img-cust/Sh_Metal_Chapter_12-Laser_welding.pdf.
93. TRUMPF Laser GmbH + Co KG. Schramberg, Germany. *Extract of the book: The Fascinating World of Sheet Metal - Water jet cutting - a supplement to the laser.*
94. TRUMPF Laser GmbH + Co KG. Schramberg, Germany. *Laser processing - Chapter 1 - Function and installation of the TLF laser.* [online]. Dostupné na World Wide Web: http://www.trumpf.com/3.img-cust/TRUMPF_TLF-Laser-Kap1a_e.pdf.
95. TRUMPF Laser GmbH + Co KG. Schramberg, Germany. *Laser processing - Chapter 1 - TLF laser in material machining.* [online]. Dostupné na World Wide Web: http://www.trumpf.com/3.img-cust/TRUMPF_TLF-Laser-Kap2a_e.pdf.
96. TRUMPF Laser GmbH + Co KG. Schramberg, Germany. *Laser processing - Chapter 2 - Function and installation of the TLF laser.* [online]. Dostupné na World Wide Web: http://www.trumpf.com/3.img-cust/TRUMPF_TLF-Laser-Kap1b_e.pdf.
97. UNIVERSITY OF NEBRASKA. Center for non traditional manufacturing research. Lincoln, Nebraska, USA. *Electrical discharge machining process.* [online]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.unl.edu/nmrc/EDMresearch.htm>.
98. UNIVERSITY OF NEBRASKA. Center for non traditional manufacturing research. Lincoln, Nebraska, USA. *General description of electrochemical machining (ECM).* [online]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.unl.edu/nmrc/ecm1/ecm1.htm>.
99. UNIVERSITY OF NEBRASKA. Center for non traditional manufacturing research. Lincoln, Nebraska, USA. *Surface integrity.* [online]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.unl.edu/nmrc/Diesinking/surfaceint/surface.htm>.
100. *Urdiamant - Brousící kotouče z diamantu a kubického nitridu boru.* URDIAMANT s.r.o., Šumperk. 06/2004.
101. URDIAMANT s.r.o. Šumperk. *Výrobní program.* [online]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.urdiamant.cz/>.
102. VASILKO, K., KMEC, J. *Delenie materiálov.* Datapress Prešov. 2003. 229 s. ISBN 80-7099-903-9.
103. VASILKO, K., LIPTÁK, J., KOZÁKOVÁ, D., MODRÁK, V. *Nové materiály a technológie ich spracovania.* Alfa - vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry, Redakcia strojárскеj literatúry. Bratislava. 1990. 365 s. ISBN 80-05-00661-6.
104. VIGNER, M., PŘÍKRYL, L. a kolektiv. *Obrábění.* První vydání. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, Redakce báňské a strojírenské literatury. 1984. 808 s. L13-E1-V-41/22658.
105. VLACH, B. a kolektiv. *Technologie obrábění a montáží.* První vydání. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, Redakce strojírenské a metalurgické literatury. 1990. 472 s. L13-C3-V-31/28936.
106. WALKER, R., J. *Machining Fundamentals.* The Goodheart-Willcox Company, Inc., Tinley Park, Illinois, USA. 2004. 640 pp. ISBN 1-59070-249-2.

107. WINGFIELD ENGINEERING COMPANY, Inc. Goodwater, Alabama, USA. *OMAX 55100 JetMachining® Center*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.wingfield.net/>>.
108. WIRECUT TECHNOLOGIES Inc. Indianapolis, Indiana, USA. *Photo Album*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.wirecuttechnologies.com/photo/index.html>>.
109. W+I OBERFLÄCHEN-SYSTEME GmbH. Hilden, Germany. *Prospekte*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.w-und-i.de/de/service/prospekte/index.html>>.
110. YAMATO - YAZICI MACHINE & TOOL Org. Izmir, Turkey. *ROBUTO® Roller Burnishing Tools*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.yamato.com.tr/catalogue.htm>>.
111. ZYGO CORPORATION. Middlefield, CT, USA. *Measurement Display Graphics, Cylinder Hone*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.zygo.com/measgraph.htm>>.