



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TECHNOLOGIE A METODY DOKONČOVÁNÍ ROVINNÝCH PLOCH

TECHNOLOGIES AND METHODS FOR PLANE SURFACE FINISHING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

VÁCLAV HANZLÍK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. OSKAR ZEMČÍK, CSc.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Václav Hanzlík

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

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

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

Technologie a metody dokončování rovinných ploch

v anglickém jazyce:

Technologies and methods for plane surface finishing

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

1. Rešerše literatury k danému tématu.
2. Technologie a metody dokončování rovinných ploch.
3. Nové moderní metody dokončování rovinných ploch.
4. Vzájemné porovnání jednotlivých metod.
5. Závěr a doporučení pro strojírenskou praxi.

Cíle bakalářské práce:

Studie k zadanému tématu, moderních metod dokončování povrchu rovinných ploch. Jejich vzájemné porovnání a doporučení pro využití ve strojírenské praxi.

Seznam odborné literatury:

1. ZEMČÍK, O. Technologická příprava výroby. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. 158 s. ISBN 80-214-2219-X.
2. ZEMČÍK, O. Nástroje a přípravky pro obrábění. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. 193 s. ISBN 80-214-2336-6
3. KÖNIG, W. Fertigungsverfahren band 1,2,3. 4. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1999. 416 s. ISBN 3-18-401054-6
4. Firemní podklady dle dalšího zpřesnění a určení (Sandvik Coromant, Gühring, Fette, Pramet, Mitsubishi, Iscar, Seco, apod.
5. REICHARD, A. Fertigungstechnik 1,2. 10. Aufl. Hamburg: Handwerk und technik, 1993. 420 s. ISBN 3-582-02311-7

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Oskar Zemčík, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 29.11.2010

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce je zaměřena na technologie dokončování rovinných ploch, jsou zde popsány jednotlivé metody a zhodnocení těchto metod na výslednou jakost povrchu, včetně jejich výhod a nevýhod pro použití ve strojírenské praxi. Práce obsahuje starší i nové technologie, ale také konvenční a nekonvenční metody, které jsou nejrozšířenější pro dokončování rovinných ploch.

Klíčová slova

konvenční metoda, nekonvenční metoda, rovinná plocha, struktura povrchu, přesnost rozměrů

ABSTRACT

This thesis deals with technologies of finishing plane surfaces, describes individual methods and results on quality of surface including their advantages and disadvantages of using in industry. The thesis contains overview of both new and old technologies as well as mostly used conventional and unconventional methods of finishing plane surfaces.

Key words

conventional method, unconventional method, plane surface, surface texture, dimensional accuracy

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HANZLÍK, Václav. *Název: Technologie a metody dokončování rovinných ploch*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. s. 47, Vedoucí práce Ing. Oskar Zemčík, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Technologie a metody dokončování rovinných ploch** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

25. května 2011

.....
Václav Hanzlík

Poděkování

Děkuji tímto panu Ing. Oskaru Zemčíkovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

Abstrakt.....	4
Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah	7
Úvod	9
1 Dokončovací metody	10
2 Konvenční metody obrábění.....	12
2.1 Třískové dokončovací metody.....	12
2.1.1 Broušení	12
2.1.1.1 Kinematika broušení	13
2.1.1.2 Rovinné broušení	13
2.1.1.3 Brousící nástroje	16
2.1.1.4 Brousící stroje	16
2.1.2 Superfinašování	18
2.1.2.1 Nástroje.....	19
2.1.2.2 Superfinašovací stroje	19
2.1.2.3 Využití	20
2.1.3 Lapování.....	20
2.1.3.1 Lapovací nástroje	21
2.1.3.2 Lapovací stroje.....	22
2.1.3.3 Použití.....	23
2.1.4 Leštění	23
2.1.4.1 Nástroje.....	24
2.1.4.2 Stroje	25
2.1.5 Tryskání.....	25
2.2 Beztřískové dokončovací metody	27
2.2.1 Vyhlazování.....	27
2.2.1.1 Nástroje.....	28
2.2.2 Válečkování	28
2.2.2.1 Tvářecí elementy.....	29
2.2.2.2 Pracovní podmínky při válečkování.....	30
2.2.2.3 Způsoby válečkování.....	31
2.2.2.4 Nástroje.....	31
2.2.2.5 Stroje	32
2.2.2.6 Výhody válečkování.....	32
3 Nekonvenční metody obrábění	33
3.1 Elektroerozivní obrábění	33
3.1.1 Elektrojiskrové drátové řezání	34
3.1.2 Elektrokontaktní obrábění	37
3.1.3 Anodomechanické obrábění	38
3.2 Elektrochemické obrábění	38
3.2.1 Elektrochemické broušení	40
3.2.2 Elektrochemické lapování	40
3.2.3 Elektrochemické leštění	40
3.3 Chemické obrábění.....	41

3.3.1 Chemické rozměrové leptání	41
4 Porovnání dokončovacích metod.....	42
Závěr.....	44
Seznam použitých zdrojů	45
Seznam použitých zkratk a symbolů	47

ÚVOD

Nároky a požadavky na vyráběné produkty se v moderním strojírenství stále zvyšují. Velký důraz je kladen na bezpečnost a spolehlivost provozu součástí, s níž už musíme počítat od stádia návrhu, projekce a konstrukce. To má za následek zvyšování požadavků na technologie a metody, kterými jsou produkty zhotovovány.

Každý výrobce, který chce být prosperující, musí vyrábět své produkty dle požadavků poptávky. V dnešní době má každý zákazník možnost volby, to nutí výrobce, aby dbali na kvalitu vyráběných produktů. V oboru strojírenství hraje jakost a vzhled povrchu důležitou roli, neboť právě povrch je v kontaktu s okolním prostředím nebo dalšími součástmi. Velkou pozornost si zaslouží funkční plochy, které musí splňovat vysoké tvarové, rozměrové a jakostní požadavky. Tyto nároky už nelze plnit jen klasickými obráběcími metodami, proto je třeba zvolit správnou technologii dokončovací operace.

Dokončovacími technologiemi existuje celá řada, od starších, dobře zavedených a fungujících, až po nové perspektivní metody, které teprve hledají své místo v moderní a hospodárné výrobě.

V posledních letech se stále více uplatňují nekonvenční technologie, které jsou vysoce produktivní. Nekonvenční technologie se využívají zejména tam, kde vyráběná součást zahrnuje neobvyklé řešení, nebo kde je použito speciálních materiálů a běžné metody jsou zde kontraproduktivní.

Tato studie se zabývá dokončovacími metodami rovinných ploch, jak konvenčními, které mají pevné místo ve strojírenské výrobě, tak i novými moderními metodami.

Kvalita povrchu, geometrická přesnost, vysoká produktivita, nízké výrobní náklady a v neposlední řadě vzhled součástí je výsledkem správné volby a způsobu dokončovací operace. Všechny výše uvedené aspekty mají hlavní vliv na technologickou úroveň a hospodárnost celého výrobního procesu. Proto správnou volbou dokončovací operace můžeme ušetřit nemalé finanční prostředky a zefektivnit výrobu.

1 DOKONČOVACÍ METODY

Dokončování je poslední operace, kterou dosahujeme:

- konečné přesnosti rozměrů, tvarů a polohy (IT, kruhovitost, rovinnost, kolmost aj.)
- mikrogeometrie povrchu (různé parametry drsnosti a vlnitosti povrchu)
- vlastnosti povrchové vrstvy – mechanické a fyzikální (tvrdost, zpevnění, odolnost proti korozi a otěru, únavové vlastnosti, přenos tepla, třecí vlastnosti, odraz záření apod.)
- konečnou kvalitu povrchové vrstvy (struktura, zbytkové pnutí, poruchy, vady aj.)
- vzhled povrchu – morfologie (lesk, matný reliéf apod.)³

Tyto požadavky na povrch nespĺňuje v plné míře žádná z uvedených metod. V praxi se proto volí vhodná kombinace těchto metod s ohledem na budoucí funkci a spolehlivost součásti.

Nepříznivě ovlivněný povrch materiálu součásti po předchozích operacích lze zlepšit dvěma základními principy:

- odebráním přídavku na dokončovací operaci
- plastickou deformaci povrchové vrstvy

Ve strojírenství je průměrný výskyt nerotačních součásti asi 30 %. Nerotační součástí můžeme rozdělit do dvou skupin:

- Skříňové součásti
- Rovinné součásti

Skříňové součásti mají převažující podíl v pracnosti u nerotačních součástí téměř ve všech oborech strojírenské výroby. Rovinné součásti jsou velmi rozmanitého tvaru a rozměrů (víka, desky, táhla, páky, ojnice, lišty apod.). U těchto součástí se obrábí většinou čelní plochy a díry.⁵

Tab 1.1 Přehled vybraných konvenčních technologií pro dokončování rovinných ploch

KONVENČNÍ METODY	
Třískové dokončovací metody	Beztrískové dokončovací metody
Broušení	Vyhlazování
Superfinašování	Válečkování
Lapování	
Leštění	
Tryskání	

Tab. 1.2 Přehled vybraných nekonvenčních technologií pro dokončování rovinných ploch

NEKONVENČNÍ METODY	
Elektroerozivní obrábění	Elektrojiskrové drátové řezání
	Elektrokontaktní obrábění
	Anodochemické obrábění
Elektrochemické obrábění	Elektrochemické broušení
	Elektrochemické lapování
	Elektrochemické leštění
Chemické obrábění	Chemické rozměrové leptání

2 KONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ

2.1 TŘÍSKOVÉ DOKONČOVACÍ METODY

Použití těchto metod předpokládá dostačující přídavek na dokončování, který se odebere při dokončovacích operacích s minimálním tepelným ovlivněním nově vznikající povrchové vrstvy. Přídavek musí zajišťovat odebrání, předchozími technologickými procesy, narušené vrstvy (trhlinky, vady, změny struktury, tahová zbytková pnutí, tvarovou a rozměrovou nepřesnost – deformace po konečném tepelném zpracování, upínacími a řeznými silami, chemickými reakcemi s prostředím atd.). Výkon těchto operací je z uvedených důvodů posuzován nikoli odebraným objemem materiálu, ale plochou požadované kvality vytvořenou za jednotku času.³

2.1.1 Broušení

Broušení je hlavní dokončovací metoda, kterou získáváme velice přesné obrobené plochy s vysokou jakostí povrchu. Tato metoda je charakterizována obráběním mnohobřitého nástroje s geometricky nedefinovatelnými řeznými hranami (zrna brusiva), které jsou spojena pojivem. Při broušení nástroj odebírá nepravidelnou třísku z důvodu různé geometrie zrn, a jejich nepravidelného rozmístění po brousícím nástroji. Zrna přenášejí pouze malé řezné síly, to způsobuje slabé upevnění zrn pojivem. Při obrábění dochází k samovolnému uvolňování jednotlivých zrn nebo jejich částí, tento jev nazýváme samoostření brousícího kotouče. Při broušení dochází v důsledku velkých plastických deformací a tření třísky k takovým vysokým teplotám (až 1500°C), že se některé třísky roztaví a shoří, to se projevuje jako jiskření. Při broušení vzniká velké množství tepla, které odhliňuje povrch, dochází ke vzniku trhlin, vzniku nepříznivých tahových zbytkových napětí v povrchové vrstvě obrobené plochy. Proto je nutné chladit obrobek i řezný nástroj, abychom těmto nepříznivým změnám povrchu zabránili. Broušením dochází k otupování ostří a zanášení póru třískami řezného nástroje, což se projevuje ztrátou řezivosti. Řezivost se obnovuje pomocí orovnávačů, které mohou být jednokamenové, vícekamenové, ploché a tvarové.

Broušením dosahujeme malou drsnost obrobené plochy ($R_a = 0,8$ až $0,2 \mu\text{m}$), dále velkou přesnost (1 až $3 \mu\text{m}$) a správnost geometrických tvarů. Broušení je velice produktivní metoda, jak ukazuje velikost plochy součásti, obrobené za jednotku času. Zejména při rovinném broušení se dají na součásti obrábět velké plochy najednou.

2.1.1.1 Kinematika broušení

Řezná rychlost při běžném broušení je 30 až 35 m.s⁻¹, při rychlostním broušení může řezná rychlost dosahovat hodnoty 100 až 180 m.s⁻¹, ale je nutná aplikace brusné kotouče se speciálním druhem pojiva.

Podle řezných podmínek, které jsou především závislé na velikosti působících sil, volíme optimální tvrdost brusného kotouče. Pro menší síly se používají měkčí kotouče a u větších sil se volí kotouče tvrdší.

Řezná rychlost:

$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{60 \cdot 1000} \quad [\text{m.s}^{-1}] \quad (2.1)$$

d [mm] – průměr kotouče

n [min⁻¹] – otáčky kotouče

Řezná síla:

$$F_C = 25 \cdot v_w^{0.6} \cdot f_a^{0.6} \cdot a_e^{0.5} \quad [\text{N}] \quad (2.2)$$

v_w [m.min⁻¹] – obvodová rychlost obrobku

f_a [mm] – axiální posuv stolu na jednu otáčku

a_e [mm] – pracovní záběr

Hodnotu řezné síly jde vypočítat i z rovnice:

$$F_C = k_c \cdot A_D \quad [\text{N}] \quad (2.3)$$

k_c [Mpa] – měrná řezná síla

A_D [mm²] – průřez třísky

2.1.1.2 Rovinné broušení

Rovinné broušení se používá zpravidla jako operace načisto po předcházejícím frézování nebo hoblování, často se však používá i místo frézování při obrábění velmi tvrdých materiálů nebo materiálů s tvrdou kůrou.

Tab. 2.1 Dosahované drsnosti a přesnosti rozměrů²

Broušení	Drsnost povrchu Ra [μm]		Přesnost rozměru IT [-]	
	rozsah	střední hodnota	rozsah	střední hodnota
Dokončovací	0,4 - 1,6	0,8	5 - 7	7
Jemné	0,05 - 0,4	0,2	3 - 6	5

Rozdělení broušení podle aktivní části brousícího kotouče:

- obvodové broušení (broušení obvodem kotouče)
- čelní broušení (broušení čelem kotoučem)

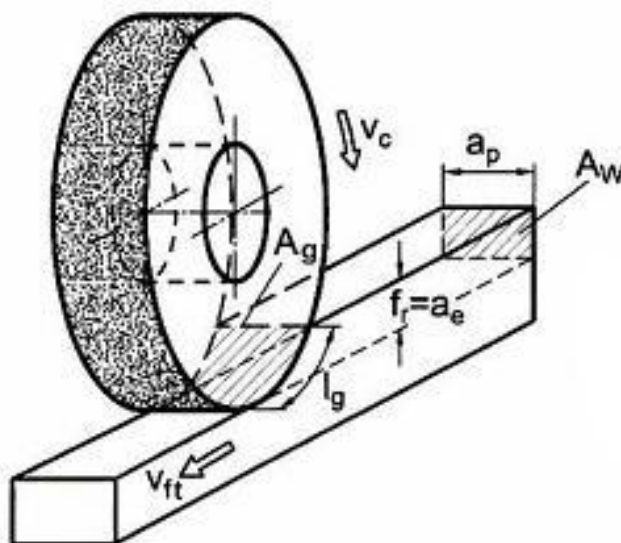
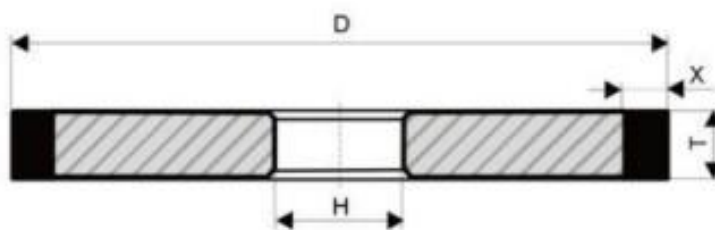
Rozdělení dle hlavního pohybu posuvu stolu vzhledem k brousícímu kotouči:

- axiální broušení (osa kotouče je rovnoběžná s posuvem stolu)
- radiální broušení (brousící kotouč je radiální k hlavnímu posuvu stolu)
- tangenciální (hlavní posuv stolu je rovnoběžný s vektorem obvodové rychlosti kotouče)

Obvodové rovinné broušení

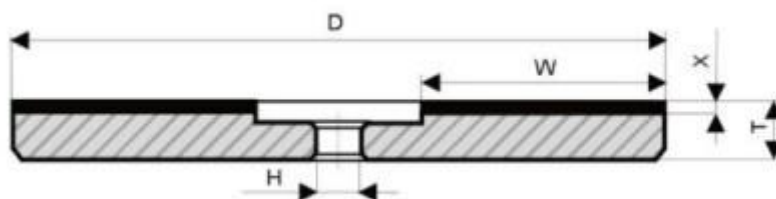
Broušením obvodem kotouče se řadí mezi velice přesné způsoby broušení rovinných ploch. Výhoda tohoto způsobu je, že se obrobek vlivem vzniklého tepla při broušení deformuje jen nepatrně, protože se pracuje s relativně úzkým kotoučem. Využívá se k výrobě nástrojů, měřidel, přípravků atd., obecně při broušení velmi přesných rovinných ploch.

Obrobek, který je upnut na elektromagnetickém stole může vykonávat přímočarý vratný nebo kruhový pohyb. U přímočarého posuvu obrobku se kotouč otáčí obvodovou rychlostí v_c a obrobek vykonává vratný přímočarý posuv rychlostí v_{ft} . V úvratích se kotouč příčně posouvá vzhledem k obrobku o vzdálenost f_a . Radiálním posuvem f_r se nastaví hloubka broušení. Výjimečně vykonává obrobek otáčivý pohyb.

Obr. 2.1 Obvodové broušení ¹Obr. 2.2 Schéma kotouče pro broušení obvodem ¹⁹

Čelní rovinné broušení

Méně přesná metoda než broušení obvodem kotouče, avšak broušení čelem je mnohem výkonnější. Ve výrobě se při přímočarém pohybu stolu brousí především menší součásti, jako jsou čelní plochy ozubených kol, čela kroužků kuličkových ložisek, pístní kroužky atd. Obvykle bývá průměr brusného kotouče větší, než je šířka broušené plochy. Obrobek vykonává přímočarý nebo otáčivý pohyb, stejně jako u obvodového broušení. Pro broušení větších průměrů čelem kotouče se především využívá segmentové hlavy. Hlavní výhody těchto hlavic jsou – lepší využití brusného materiálu, lépe se odstraňuje tříska, řezná kapalina má lepší přístup do místa broušení a součást se méně zahřívá.

Obr. 2.3 Schéma kotouče pro broušení čelem ¹⁹

2.1.1.3 Brousící nástroje

Brusný nástroj je tvořen z brusných zrn, pojiva a pórů. Brusná zrna tvoří na kotouči řezné klíny, jejich jakost a velikost má vliv na drsnost obrobeného povrchu. Materiály brusných zrn tvoří nejčastěji umělý korund (oxid hlinitý Al_2O_3), karbid křemíku SiC , karbid bóru B_4C , kubický nitrid bóru N_2B_3 , přírodní i umělý diamant. Druh materiálu brusných zrn se volí podle broušeného materiálu. Obecně platí, že tvrdý a křehký broušený materiál vyžaduje jemnější zrno než materiál měkký a houževnatý. V pórech se hromadí třísky a pojivo stmeluje brusná zrna dohromady, čímž vytváří pevné těleso různých tvarů a velikostí. Pojivo nám určuje tvrdost kotouče a mechanickou pevnost zrn. Trvanlivost kotouče, výkon a kvalitu broušeného povrchu podstatně ovlivňuje použití řezných kapalin. Řezné kapaliny především zajišťují chlazení a čištění nástroje a obráběné plochy.

Tab. 2.2 Materiály brusných zrn

Materiály brusných zrn		
Název / označení	Chemický vzorec	druh / označení
Umělý korund / A	Al_2O_3	Bílý / 99A
		Růžový / 98A
		Hnědý / 96A
		Černý / 58A
Karbid křemíku / C	SiC	Zelený / 49C
		Černý / 48C
Karbid bóru / B	B_4C	-
Kubický nitrid bóru / BN	N_2B_3	-
Diamant (umělý i přírodní) / D	-	-

2.1.1.4 Brousící stroje

Vodorovné rovinné brusky

Jsou určeny pro broušení rovinných ploch a jsou charakterizovány vodorovnou osou brousícího vřetena. Obrobky se nejčastěji upínají na elektromagnetickou desku umístěnou na pracovním stole. Pracovní stůl vykonává přímočarý vratný nebo otáčivý pohyb. Brousící vřeteník je svisle přestavitelný. Na stojanu stroje je vedení pro příčné sáně, na nichž se

v podélném směru pohybuje stůl. Rychlost stolu je možné plynule měnit. Velikost stroje je charakterizovaná šířkou pracovního stolu.²

Vodorovné rovinné brusky patří mezi nejrozšířenější druhy broušení. Mají své využití v kusové i malosériové výrobě, kde se vyžadují vyšší požadavky na přesnost broušených ploch.

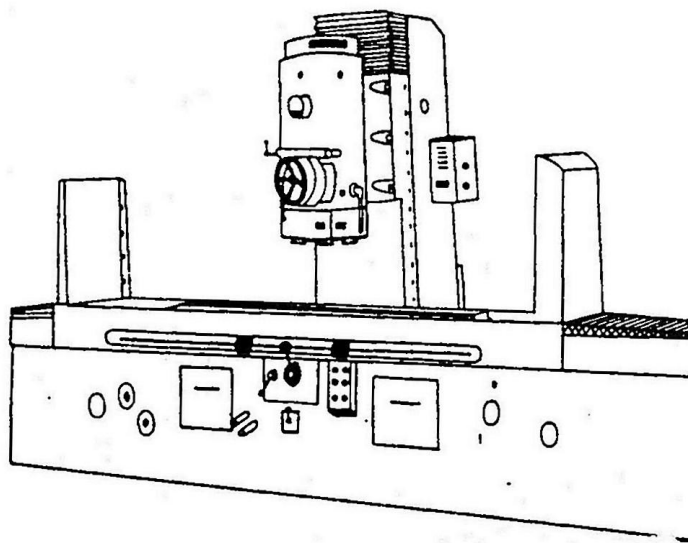


Obr. 2.4 Vodorovná rovinná bruska s přímočarým pohybem stolu¹⁷

Svislé rovinné brusky

Tyto brusky jsou charakterizovány svislou osou brousícího vřeten a vysokými výkony broušení, avšak horšími parametry přesnosti broušené plochy. Brousící vřeteník je posuvný po stojanu. Pracovní stůl uskutečňuje pouze přímočarý vratný pohyb, takže průměr brousícího kotouče musí být větší, než je šířka broušené plochy. Brousící kotouč je zpravidla segmentový. Obrobky se zpravidla upínají na magnetickou desku, umístěnou na pracovním stole.²

Svislé rovinné brusky se využívají především pro větší množství úběru materiálu, ale jakost obrobene plochy je nižší než u broušení na vodorovných rovinných bruskách.



Obr. 2.5 Svislá rovinná bruska s přímočarým pohybem stolu ²

2.1.2 Superfinašování

Superfinašování je zvláštní druh broušení, při němž se z dokončovaného povrchu odřezávají vrcholky nerovností velmi jemnými zrny brousícího nástroje (superfinašovacího kamene). Superfinašování je charakterizováno kmitavým pohybem superfinašovacího kamene, definovanou silou vyvolávající nízký tlak na obráběnou plochu a malými řeznými rychlostmi. ²

Superfinašovací kameny (zpravidla 1 až 4 kusy) jsou na dokončovanou plochu přitlačovány hydraulicky nebo mechanicky tak, aby na ploše styku nastal přitlak 0,1 až 0,4 MPa. Mezi stykové plochy se přivádí řezná kapalina, obvykle petrolej, olej nebo jejich směs. Průběh superfinašování je možno ovlivňovat změnou obvodové rychlosti obrobku, rychlostí kmitavého pohybu, velikostí přitlaku a viskozity řezné kapaliny. ³

Nejčastější operací před superfinašováním je broušení s výslednou drsností $R_a = (0,5 \text{ až } 1) \mu\text{m}$. Přídavek na superfinašování se odvíjí od výchozí a požadované drsnosti a vlnitosti, obvykle se volí v rozmezí 2 až 12 μm . Superfinašováním lze dosáhnout velmi nízkou drsnost povrchu $R_a = (0,05 \text{ až } 0,1) \mu\text{m}$ a snížení vlnitosti pod 0,1 μm . Geometrický tvar součásti se po superfinašování příliš nezlepší.

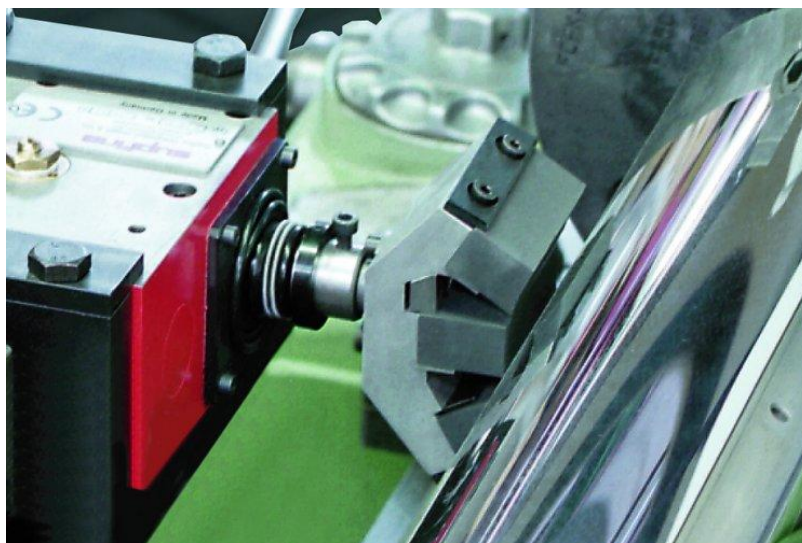
Superfinašování, jako poslední krok výrobního procesu hraje důležitou roli při plnění vzrůstajících nároků na kvalitu obrobku. Superfinašováním se zvýší funkčnost a životnost obrobených ploch, zlepší se geometrie obrobku, optimalizují se vlastnosti povrchové vrstvy (při procesu superfinašování je odstraněna poškozená vrchní vrstva po předchozích operacích a nepoškozený základní materiál tvoří nosný povrch) a v neposlední řadě také vysoká hospodárnost výrobního procesu.

Tab. 2.3 Dosahované přesnosti superfinišování ²

Superfinišování	Drsnost povrchu Ra [μm]		Přesnost rozměru IT [-]	
	rozsah	střední hodnota	rozsah	střední hodnota
Dokončovací	0,05 - 0,4	0,2	3 - 5	4
Jemné	0,025 - 0,1	0,05	2 - 4	3

2.1.2.1 Nástroje

Materiál je z povrchu obrobku odstraňován pomocí superfinišovacích kamenů. Superfinišovací kameny se vyrábějí s keramickou a bakelitovou vazbou z elektrokorundu pro obrábění oceli, z karborunda pro obrábění litiny a oceli nižších pevností, neželezných kovů a slitin. Pro superfinišování vysocelegovaných nástrojových a ocelí se používá kubický nitrid bóru v keramické vazbě. Tvrdost nástroje se volí podle tvrdosti superfinišovaného materiálu. ³

Obr. 2.6 Superfinišovací kameny upevněné v držáku ¹⁰

2.1.2.2 Superfinišovací stroje

Stroje pro superfinišování využívají pneumatické nastavbové zařízení vhodné pro pohon při nejjemnějším opracování.

Keramické superfinišovací nástroje vedly ke vzniku nové generace superfinišovacího zařízení, kde jsou spojeny všechny výhody nástroje se superfinišovacím víceúčelovým zařízením. Tak se dají keramické superfinišovací nástroje připravit mimo produkční stroj a pak rychle během několika sekund vyměnit ve stroji pomocí jednoduchého zásuvného zařízení.

Superfinašovací nástavbové zařízení je dnes používáno všude tam, kde musí být levně a v krátkém termínu zlepšen povrch obráběného dílce.

Přídavné superfinašovací zařízení se používá na konvenčních bruskách nebo může být integrováno do CNC obráběcího stroje.⁶

Tab. 2.4 Řezné podmínky a přídavky pro superfinašování²

Drsnost povrchu Ra [μm]		Přídavek [μm]	Operace	Úhel skřížení stop 2α [°]	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

Pozn: 1,2 hrubovací fáze superfinašování, 3,4 jemné finašování (volba dle výchozí drsnosti)

2.1.2.3 Využití

Technologie superfinašování se používá v automobilovém průmyslu, při výrobě jemné mechaniky a medicínské techniky, také u technologií pro oboustranné i pásové broušení aj.

2.1.3 Lapování

Lapování je dokončovací metoda obrábění, kterou se dosahuje nejvyšší rozměrové přesnosti a nejmenší drsnosti povrchu.

Na rozdíl od ostatních dokončovacích operací dochází k úběru materiálu převážně účinkem zrn volného brusiva, přiváděnou kapalinou nebo měkkou pastou mezi nástroj a obrobek. Zlepšování drsnosti a do určité míry i geometrického tvaru obrobených ploch probíhá při odřezávání mikronerovností brousícími zrny, kterými po povrchu obrobku pohybuje lapovací nástroj. Rovněž plastická deformace malých nerovností, k níž dochází tlakem pohybujících se brusných zrn, přispívá ke zlepšení kvality povrchu.³

Lapování se dělí podle charakteru úběru materiálu na hrubovací a velmi jemné lapování. U hrubovacího lapování se mikronerovnosti odřezávají velkým počtem zrn. Při velmi jemném lapování se povrch leští a dochází na lapované ploše k plastickým deformacím povrchové vrstvy.

Tab. 2.5 Dosahované drsnosti a přesnosti rozměrů ²

Lapování	Drsnost povrchu Ra [μm]		Přesnost rozměru IT [-]	
	rozsah	střední hodnota	rozsah	střední hodnota
Dokončovací	0,1 - 0,4	0,2	3 - 5	4
Jemné	0,012 - 0,05	0,05	1 - 3	3

2.1.3.1 Lapovací nástroje

Vyrábějí se nejčastěji z kvalitní jemnozrné politické litiny, mědi, měkké oceli, olova, plastických hmot apod. Tyto měkké nástroje umožňují zamáčknutí brusiva do jejich činné části. Pro velmi jemné lapování se obvykle používá nástrojů z kalené oceli nebo tvrdě chromovaných nástrojů. ³

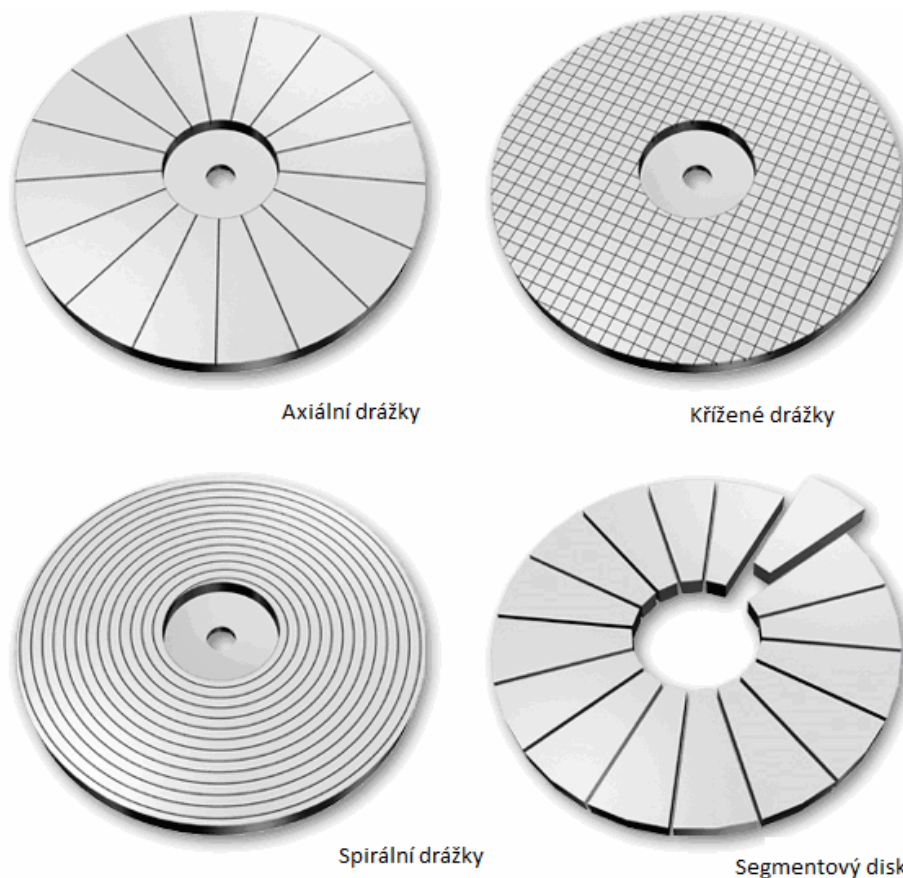
Lapovaná plocha určuje tvar lapovacího nástroje. Pro ruční lapování rovinných ploch to jsou lapovací desky (u této metody se pohybuje obrobek) nebo destičky (u této metody se pohybuje nástroj). Pro strojní lapování rovinných ploch je nástrojem litinový lapovací kotouč nebo brousící kotouč s vázaným brusivem a keramickou vazbou.

Jako brusiva pro lapování měkké i kalené oceli se nejčastěji používá umělý korund. Pro lapování litiny, polovodičových materiálů, skla, keramiky se používá karbid křemíku. Při lapování velmi tvrdých materiálů, jako např. slinutých karbidů, je vhodný karbid bóru nebo diamantové mikroprašky.

Tab. 2.6 Brusivo pro lapování ²

Lapovaný materiál	Brusivo
Ocel	umělý korund
Litina, keramika, sklo	karbid křemíku
Zvlášť tvrdé materiály (SK)	karbid bóru, kubický nitrid bóru, diamant
Měkké materiály	oxid železitý Fe_2O_3 oxid chromitý Cr_2O_3 hydroxid železitý $\text{Fe}(\text{OH})_2$

Lapovací pasty mají různé složení. Kromě brousících zrn obsahují živočišné tuky nebo oleje, petrolej, některé druhy kyselin (kyselinu stearinovou, olejovou apod.), kyselina narušuje mikroskopické vrstvy lapované plochy, které lze pak snadněji obrousit. ³

Obr. 2.7 Ukázka lapovacích kotoučů ¹⁵

2.1.3.2 Lapovací stroje

Pro lapování rovinných i válcových ploch se používají univerzální lapovací stroje.

Pro lapování vnějších válcových a rovinných ploch se nejvíce používá dvoukotoučové lapovací stroje se svislými osami kotoučů. Pracovní otáčky koná buď jeden kotouč (spodní) nebo oba. Hnací kotouč je výkyvný, aby se jeho plocha mohla přizpůsobit ploše dolního kotouče a byla s ním rovnoběžná. Tlak je vyvozován vahou horního kotouče nebo hydraulicky. Mezi oběma kotouči je vložena unášecí deska s otvory přizpůsobenými tvaru lapovaných součástí. Unášecí deska je vychylována excentrem, aby se součásti pohybovaly po takových drahách, které pokryjí celý povrch lapovacího kotouče, a aby nedocházelo k jeho nerovnoměrnému opotřebení.³

Obr. 2.8 Svislý lapovací stroj¹²

2.1.3.3 Použití

Lapováním lze dokončovat měkké i tvrdé materiály ručně v kusové výrobě, strojně v sériové a hromadné výrobě. Lapují se funkční plochy měřidel (koncové měrky, kalibry), důležitá závitová spojení, ozubení, součásti motorů apod.

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.²

2.1.4 Leštění

Pro dosažení lesklého povrchu s menšími nároky na přesnost rozměru, tj. úpravy povrchů převážně z důvodu jejich vzhledu, se používají nejrůznější druhy dokončovacích operací, které se souhrnně nazývají leštění. Úběr materiálu je u těchto operací minimální, odstraňují se pouze stopy (risky) po předcházejícím obrábění určujícím přesnost rozměrů a tvarů, která se leštěním nezlepší. Z povrchu se kromě mikronerovností odstraňují nečistoty, vrstvičky oxidů a jiných chemických sloučenin. Odstraňování vrcholků nerovnosti se obvykle provádí ve třech krocích:

- hrubování brousíci zrna pevně vázanými na textilní podklad (brousící plátna, pásy, kotouče)

- jemné leštění zrný volně rozptýlenýma v kapalině (oleje), nebo leštící pastě (tuky, vosky), které se nanášejí na textilní kotouče nebo pásy
- dolešťování bez brusiva přitlakem textilního kotouče nebo pásu, za vyšších rychlostí dochází třením k zahřátí (změknutí) a plastické deformaci (rozleštění) vrcholků nerovností.³

2.1.4.1 Nástroje

Pro leštění rovinných ploch se používá jako nástroj lamelový kotouč, který je tvořen z pásků tkaniny různých materiálů a tuhosti, k co nejlepšímu kontaktu s upravovanou plochou. Povrch leštíme buď obvodem, nebo bokem kotouče. Látkové kotouče se vyrábějí z materiálů: technická tkanina, molino, flanel, hedvábí, kepr apod. Tuhost látkových kotoučů je závislá na vzdálenosti prošití tkaniny.



Obr. 2.9 Ukázky leštících kotoučů¹³

Leštící pasty jsou určeny pro jemné leštění filcovými a hadrovými kotouči, aplikují se nanášením na rotující leštící kotouč. Leštící pasta tuhá se přitlačí na leštící nástroj (kotouč), poté zahřátá pasta uvolní brousící zrna (korund, karbid křemíku, smírek), které ulpí na pracovní ploše a je možno leštit všechny druhy kovových a některých plastových materiálů. Leštící pasta je směs abraziv rozptýlených v tuhém tukovém základu. Všechny leštící pasty jsou klasifikovány jako látky bezpečné, netoxické a prakticky nedráždivé. Jsou šetrné k životnímu prostředí.¹¹

2.1.4.2 Stroje

Leštění rovinných ploch se provádí ručně nebo strojně. K strojnímu leštění se obvykle používá víceúčelový lapovací stroj a ruční leštění se provádí pomocí běžné ruční brusky.



Obr. 2.10 Bruska pro ruční leštění ¹⁶

2.1.5 Tryskání

K úběru materiálu dochází volnými částicemi abrazivního materiálu, které vysokou rychlostí dopadají na upravovanou plochu a zlepšují její vzhled i drsnost povrchu. Ve většině případů je nosným médiem stlačený vzduch nebo kapalina, kterými se dopravují pracovní částice přestavitelnými tryskami k obrobku.³

Konečnou drsnost povrchu a množství odebraného materiálu je možno ovlivnit mnoha faktory:

- druhem a zrnitostí brusiva
- tlakem nosného média
- vzdáleností trysky od povrchu
- úhlem sklonu trysky vůči povrchu
- rychlostí vzájemného působení trysky a součásti
- počtem průchodů
- překrytím stop (příčný posuv, kmitání nebo rotace trysky)

Důležitou roli hraje vhodné použití abraziva. Nejhrubší operace se provádějí tříděným křemičitým pískem. Křemičitým pískem se nejčastěji čistí

odlitky a výkovky. Dalším druhem abraziva jsou tříděná zrna brousících materiálů. V neposlední řadě se používají kovové částice jako litinová zrna, ocelová drť, jemné třísky apod.



ocelová drť



ocelový granulát



nerezový materiál



syntetické abrazivo - korund

Obr. 2.11 Ukázka různých druhů abraziva²⁰

Proces tryskání probíhá bez tepelného ovlivnění a dochází i k částečnému zpevnění povrchu. Dosažitelná drsnost povrchu je $R_a = 0,1$ až $0,8 \mu\text{m}$ podle zrnitosti posledního použitého brusiva. Rozměrová přesnost je dána předcházející výrobní operací, tryskáním se nezlepší.³

2.2 BEZTRÍSKOVÉ DOKONČOVACÍ METODY

Spočívají v úpravě povrchové vrstvy plastickou deformací. Tato deformace probíhá do několika setin až desetin milimetrů, čímž dochází ke zlepšení parametrů povrchu.

Pokud probíhá za studena, dochází ke zpevnění, vyvolání tlakových zbytkových pnutí a v některých případech i zlepšení drsnosti povrchu zatlačením vrcholků nerovností. Zlepšení mechanických vlastností obrobku se dosáhne vyvoláním tlakových zbytkových pnutí do větší hloubky pod povrchem, čímž se eliminujeme nepříznivý vliv předcházejících operací. Součást má vyšší únavovou pevnost, odolnost proti otěru i korozi, vyšší tvrdost apod. Zhotovenou součást můžeme hodnotit, jako by byla vyrobena z kvalitnějšího materiálu s delší životností. V tom spočívá hlavní přínos těchto metod i důvod jejich stále širšího uplatnění ve strojírenské praxi.

Zcela opačný účinek má plastická deformace za tepla (např. u závěrečné fáze leštění bez brusiva). Ohřátí povrchové vrstvy sice usnadní rozleštění vrcholků nerovností a dosažení lesklého povrchu, ale vyvoláním takových pnutí, příp. strukturních změn v povrchové vrstvě, že vzroste pravděpodobnost vzniku trhlin a snížení životnosti součásti.³

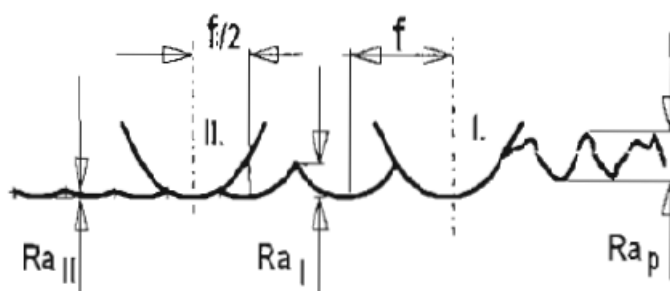
2.2.1 Vyhlazování

Tato dokončovací metoda využívá nejjednoduššího způsobu vyvolání plastické deformace za studena v povrchové vrstvě součásti. Pevný tvářecí element je přitlačován tlakem na plochu obrobku při vzájemném jejich pohybu. Dochází ke smyku nástroje po obrobku.

Nástroj tvoří pracovní tělíska různých geometrických tvarů, která jsou připevněna do držáku, který umožňuje upnutí nástroje.

Konečnou drsnost povrchu a hloubku zpevnění především ovlivňuje:

- materiál a tvar tvářecího tělíska
- přítlačná síla
- rychlost pohybu
- posuv
- počet pojezdů
- chlazení a mazání (oleje, emulze)

Obr. 2.12 Schéma vyhlazování ³

2.2.1.1 Nástroje

Jako materiál pracovních tělísek se v praxi používá kalená ocel (nástrojová, rychlořezná), slinutý karbid, spékáný korund, kubický nitrid bóru, diamant. Nástroje s diamantu umožňují vyhlazovat ocel s tvrdostí až 65 HRC. Významnou roli hraje chlazení, neboť je nutné odvádět teplo vzniklé třením (smykem) mezi stykovými plochami nástroje a obrobku.

Dosažitelná drsnost povrchu je $Ra = 0,1$ až $0,4 \mu\text{m}$ a hloubka zpevněné vrstvy dosahuje hodnoty $0,1$ až $0,5 \text{ mm}$.

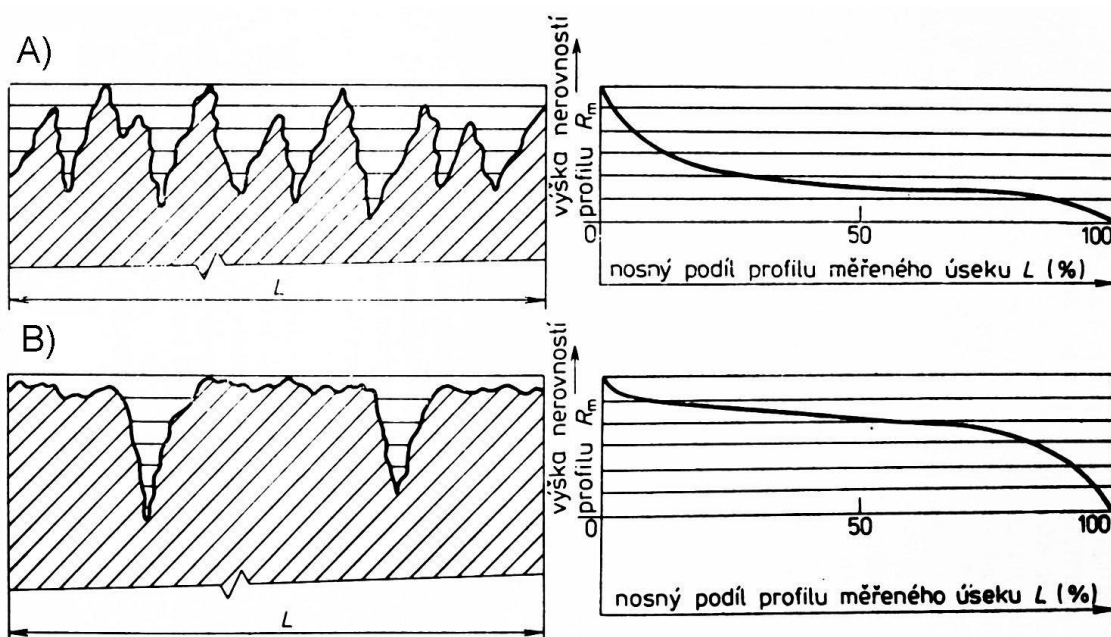
Jednoduchost vyhlazování spočívá v málo náročné konstrukci a výrobě nástroje i možnosti její aplikace na běžných strojích.

2.2.2 Válečkování

Metoda válečkování je beztržková dokončovací metoda, která slouží pro dokončování vnějších i vnitřních rotačních ploch, rovinných i tvarových ploch, závitů, zápichů nebo drážek. Princip metody válečkování je valení otočného tvářecího tělíska, které je přitlačováno silou k upravovanému povrchu součásti. Na povrchu dochází k plastické deformaci, která zasahuje do větších hloubek než u jiných dokončovacích metod. Válečkováním má za následek zlepšení mikrogeometrie povrchu a přesnost rozměrů je vyšší.

Tab. 2.7 Velikost nosného podílu profilu při odlišných technologiích obrábění ⁴

Způsob obrábění	Drsnost povrchu Ra [μm]	Nosný podíl [%]
Broušení na čisto	0,6 - 2,5	40
Jemné broušení, honování, lapování	0,16 - 0,6	80
Superfinašování	0,04 - 0,1	90
Válečkování	0,2 - 0,4	80 až 90



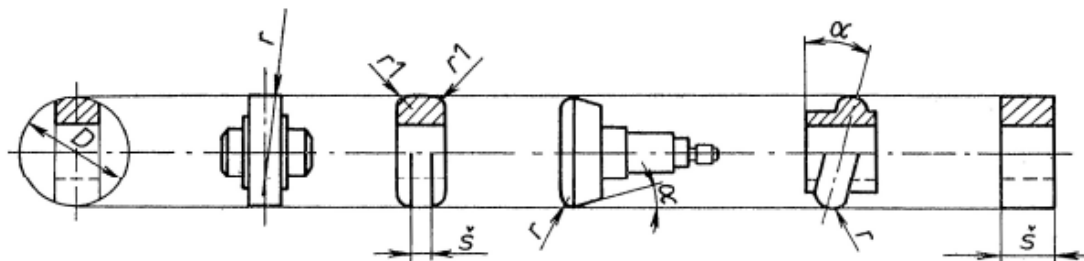
Obr. 2.13 Tvar skutečného profilu drsnosti povrchu a nosná křivka této plochy
A) po třískovém obrábění B) po válečkování ⁴

2.2.2.1 Tvářecí elementy

Tvářecí nástroj, především jeho funkční plochy, které jsou ve styku s dokončovaným povrchem obrobku, se podílejí rozhodující měrou na konečné kvalitě válečkované plochy. tvářecí tělíska jsou vyráběna z různých materiálů (kalená ocel, slinuté karbidy), často se ještě povlakuji materiálem, který zlepšuje kluzné vlastnosti.

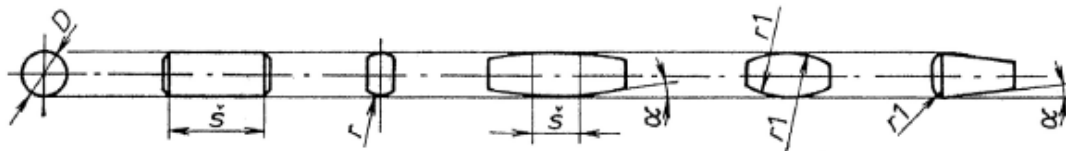
Tvářecí prvky dělíme do dvou skupin:

Společným znakem této skupiny je středový čep, který zachycuje jednotlivé složky tvářecí síly. Tvářecí prvky mají tvar kotoučů, kladek, válečků apod.



Obr. 2.14 Tvářecí prvky naneseny středovým čepem ⁴

Tvářecí tělíska se odvalují po vodící dráze nástroje a jednotlivé složky tvářecí síly jsou zachycovány vodící drahou. Tvářecí prvky v této skupině mají tvar soudečků, válečků, kuželíků apod.



Obr. 2.15 Tvářecí prvky odvalované po vodící dráze ⁴

2.2.2.2 Pracovní podmínky při válečkování

Pracovní podmínky při válečkování se dají ovlivňovat několika faktory. Správná volba těchto podmínek je důležitá pro produktivní válečkování a vysoký stupeň zpevnění a vyhlazení dokončovaného povrchu.

Přítlačná síla

Snaha o zvolení optimální hodnoty přítlačné síly, která má zásadní vliv na hloubku plastické deformace, zpevnění povrchu a drsnosti povrchu R_a . Přítlačná síla nesmí překročit hodnotu, která vede k poškození povrchu. Přítlačná síla pro malé válečkovací nástroje se pohybuje v rozmezí 100 – 2500 N.

Rychlost válečkování

Rychlost válečkování je rychlost, kterou se tvářecí element válečkovacího nástroje pohybuje po válečkované ploše. S nárůstem rychlosti stoupá lineárně i teplota. U válečkování rovinných ploch je rychlost určena rychlostí smýkadla nebo stolu pracovního nástroje.

Chlazení a mazání

Chlazením a mazáním obrobku i nástroje snížíme tření v nástroji a prodloužíme jeho životnost. Chlazením snižujeme teplotu nástroje i povrchu obrobku a můžeme použít vyšší rychlosti při válečkování. Zvýšená teplota negativně ovlivňuje celý proces válečkování.

Počet převálečkování

Při převálečkování dochází k opakovanému válečkování již minimálně jednou válečkováného povrchu. Vícenásobným převálečkováním dosáhneme lepšího zpevnění povrchu a taky větší hloubky zpevněné vrstvy. Hodnotu R_a zlepšíme jen při druhém převálečkování, při dalších opakování

už se hodnota Ra nemění. Převálečkování výrazně snižuje produktivitu a zvyšuje výrobní čas.

2.2.2.3 Způsoby válečkování

Statické válečkování

Při statickém válečkování působí na dokončovanou plochu váleček, který se po povrchu odvaluje. Konečné vlastnosti dokončovaného povrchu závisí na průměru aktivního povrchu válečku. Menší průměr zvyšuje hloubku zpevnění, většími průměry se dosahuje povrchů s nižší hodnotou Ra.

Nástroje pro statické válečkování se uplatňují zejména v kusové výrobě, ale i v sériové výrobě pro válečkování rozměrnějších součástí.

Nástroje jsou převážně konstruovány s odpruženým tvářecím prvkem pomocí pružiny, nebo tvářecí síla může být vyvozena hydraulicky. Tvářecí prvky nejčastěji tvoří kuličky, válečky nebo zaoblené kotouče.²

Dynamické válečkování

Při dynamickém válečkování nástroj není v neustálém kontaktu s dokončovaným povrchem součásti, ale v časově omezeném impulzu, při kterém dochází ke vzniku plastické deformace. Silové impulzy mohou být na tvářecí tělísko vyvozeny různými způsoby, obvykle mechanicky pomocí rotujícího trnem nebo kroužkem s vačkovými plochami. Předností dynamického válečkování je získání kvalitní zpevněné vrstvy.^{2,3}

2.2.2.4 Nástroje

Nástrojem pro válečkování rovinných ploch je možné válečkovat téměř jakékoliv formy rovinných ploch. Na nástroj je kladen důraz na univerzálnost použití a nízkou cenu.

Na obr. 2.16 je zobrazen nástroj pro válečkování čelních rovinných ploch s pohledem na detail nástroje ze strany tvářecích elementů.



Obr. 2.16 Nástroj pro válečkování čelních ploch ¹⁴

2.2.2.5 Stroje

Metoda válečkování nevyžaduje žádné speciální stroje. Válečkování se provádí na běžných univerzálních strojích, u rovinného válečkování se používá například frézka nebo obráběcí centrum.

Z důvodů použití běžných obráběcích strojů se nemusí investovat do dalších drahých strojních zařízení. Všechny operace včetně dokončovacích lze provést na jednom stroji při jednom upnutí obrobku. Tím pádem se zkrátí časy pro manipulaci materiálu z jednoho stroje na druhý, což má za následek zlevnění výroby.

2.2.2.6 Výhody válečkování

- vysoká hospodárnost
- krátké časy obrábění
- spolehlivost procesu
- konstantní rozměry
- značná dynamická pevnost
- vysoká hospodárnost
- nízké investiční náklady
- vysoká ekologičnost

Technologie válečkování se dostává v současné době mezi velmi populární způsoby opracování materiálů. V popředí zájmu stojí tato technologie nejen kvůli svým nesporným technickým přednostem, nýbrž i z důvodu nízkých investičních nákladů, které díky značně rychlé amortizaci vedou k velmi dobrému předpokladu vysokého návratu investic.

3 NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ

Nekonvenční metody obrábění (NMO) jsou založeny na využití fyzikálního nebo chemického principu úběru materiálu. Jedná se většinou o bezsilové působení na obráběný materiál, bez vzniku klasických třísek, které známe z obrábění reznými nástroji.

Rostoucí rozsah využívání NMO způsobilo zejména větší požívání materiálů s vysokou pevností, tvrdostí, houževnatostí, materiálů odolných vůči opotřebením apod., které nelze standardními metodami hospodárně obrábět.^{1,7}

Charakteristické znaky NMO:

- rychlost a výkonnost obrábění nezávisí na mechanických vlastnostech obráběného materiálu
- materiál nástroje nemusí být tvrdší než obráběný materiál
- možnost provádět i technologicky složité operace
- možnost zavádění plné mechanizace a automatizace
- zvýšení sériovosti výroby a tím pádem snížení pracnosti daných operací

3.1 ELEKTROEROZIVNÍ OBRÁBĚNÍ

Elektroerozivní obrábění využívá tepelného principu vlivem elektroeroze, kde materiál obrobku je odtavován a odpařován vlivem velké koncentrace energie. Na povrchu součástí zůstávají mikroskopické krátery. Charakteristický znak této metody je periodicky se opakující elektrický výboj.

Obrábění probíhá na dvou elektrodách (anoda, katoda) oddělených jiskrovou mezerou o velikosti 0,01 až 0,5 mm a ponořených v dielektrické kapalině, která má vysoký elektrický odpor. Anodu tvoří nástrojová elektroda a katodu tvoří obrobek. Výboj mezi elektrodami vzniká v místě nejsilnějšího napěťového pole, které umožňuje volný pohyb iontů. Vytváří se ionizovaný (vodivý) kanál, kterým prochází proud mezi anodou a katodou a vzniká plazmatický tok (3000°C až 12000°C). Celý proces odebrání materiálů se pak skládá ze střídajících se impulzních výbojů, které jsou rozmístěny po celé obráběné ploše, a proto dochází k rovnoměrnému úbytku materiálu.

Musíme mít na paměti, že elektroerozi podléhají jen elektricky vodivé materiály, z tohoto důvodu lze metodu využít jen u obrábění vodivých materiálů. Za určitých podmínek lze obrábět i keramické či plastové materiály, které musí ovšem obsahovat příměsi kovových prvků.^{2,3}

Tab. 3.1 Materiály nástrojových elektrod pro elektroerozivní obrábění²

Materiál	Vlastnosti
Grafit	Nejčastěji používaný materiál, je dobře obrobitelný a vykazuje dobré charakteristiky opotřebení. Nevýhodou grafitu je znečištění stroje.
Měď	Má dobrou elektrickou vodivost a příznivé charakteristiky opotřebení. Výhodná pro obrábění karbidu wolframu. Dosahovaná drsnost obrobené plochy je lepší než $Ra = 0,5 \mu\text{m}$.
Měď – wolfram, stříbro – wolfram	Velmi drahé materiály. Používají se pro výrobu hlubokých drážek. Tento materiál nemůže být tvarován po slinování, protože je velmi křehký.
Měď – grafit	Výhodný pro obrábění karbidu wolframu. Je 1,5 až 2 krát dražší než grafit.
Mosaz	Relativně levný a snadno obrobitelný materiál, velké opotřebení.

3.1.1 Elektrojiskrové drátové řezání

Elektrojiskrové drátové řezání se řadí mezi nejrozšířenější nekonvenční metody obrábění rovinných ploch. Metoda umožňuje vyrábět plochy mající přímku jako tvořící přímku. Nástrojovou elektrodu tvoří tenký drát, aby se předešlo jeho nadměrnému opotřebení, odvíjí se pomocí napínacího mechanismu. Drát je obvykle měděný, pro větší průměry se používá mosazný a na velmi jemné řezy molybdenový o průměru 0,03 až 0,07 mm. Mezi elektrodou a obrobkem vznikají elektrické výboje. Nástrojová elektroda tvořena drátem je nástroj, který může odebírat materiál v každém směru a ve spojení s vhodným řídicím systémem je možné přesně obrábět i velmi složité tvary. Systém umožňuje naklopení nástrojové elektrody vzhledem ke svislé ose v rozsahu $\pm 30^\circ$. Pro zajištění automatizovaného procesu obrábění jsou moderní stroje vybaveny automatickým vrtáním díry pro zavedení drátu, automatickým zavedením drátu na počátku práce do vyvrtané díry a adaptivním řízením. Automatického provozu bez obsluhy se dosahuje po dobu až 80 hodin.^{2,7}

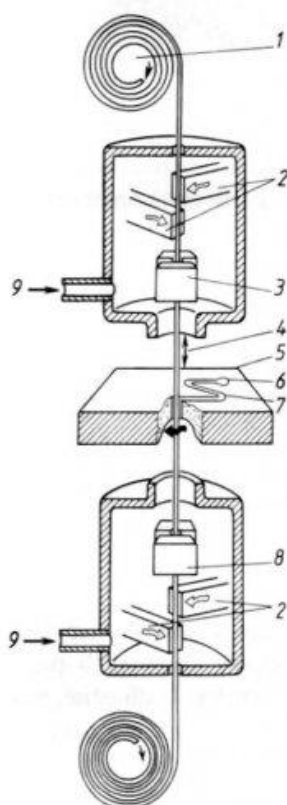
Dosahované parametry

Přesnost vyřezaných tvarů je dána vlastnostmi stroje, přesností vedení a napnutí drátu, přesností a spolehlivostí CNC řídicího systému, stabilitou nastavených pracovních parametrů generátoru a kvalitou přívodu a čištění dielektrika. Je důležité, aby nástrojová elektroda vstupovala do místa řezání dokonale napnutá a vyrovnaná.

Při řezání drátovou elektrodou lze dosáhnout:

- maximální úběr materiálu $35 \text{ až } 200 \text{ mm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$
- rovnoběžnosti řezu do $2 \text{ } \mu\text{m}$ na 100 mm
- jakosti obrobeného povrchu $R_a = 0,15 \text{ až } 0,3 \text{ } \mu\text{m}$

Přesnost rozměrů a tvaru obrobeného povrchu závisí na tepelné stabilizaci stroje, při kolísání teploty $\pm 3 \text{ } ^\circ\text{C}$ je přesnost $4 \text{ } \mu\text{m}$, při kolísání teploty $\pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$ je odchylka $1 \text{ } \mu\text{m}$. Maximální tloušťka řezaného materiálu dosahuje 350 mm .⁷



a)



b)

1 – zásobník drátu, 2 – přívod výbojového proudu, 3 – horní vedení drátu, 4 - napínání drátu, 5 – obrobek, 6 – startovací díra, 7 – řezaný tvar, 8 – dolní vedení drátu, 9 – přívod dielektrika

Obr. 3.1 a) Schéma drátového řezání⁷b) Drátová řezačka Fanuc Robocut α -1iD¹⁰

Drátová řezačka Sodick AP250L

Přesná drátová řezačka firmy Sodick umožňuje dosáhnout drsnosti povrchu v řádech až setin mikrometru. Specifikum tohoto modelu je možnost variantního výběru obrábění ve vodě nebo v oleji. Velkou předností u firmy

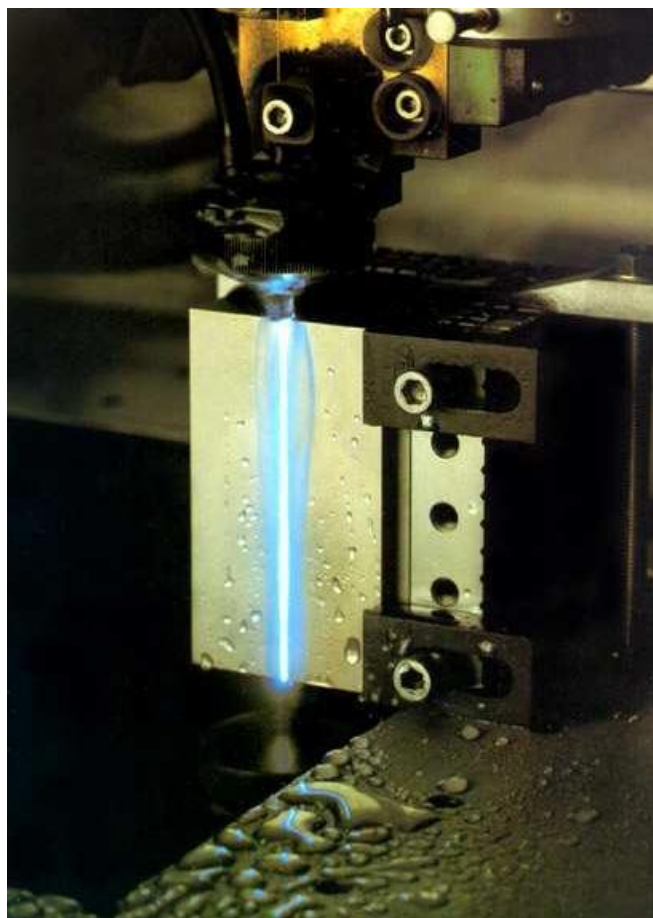
Sodick je, že do svých modelů instalují pohony s lineárními motory, které odstraňují nepřesnosti v obrábění způsobené opotřebením kuličkových šroubů. Při zastavení osy, zůstává lineární motor nehybně zastaven, odpadají nežádoucí vibrace. Pomocí přesné a citlivé regulace lineárního motoru se dosahuje jemného posuvu v nanometrech, ale i rychloposuvu s vysokou dynamikou. Stroj AP250L používá drát o průměru až 0,03 mm a dosahovaná drsnost povrchu je pod 0,1 Ra. Novinkou u firmy Sodick je použití kompaktních válečkových křížových ložisek Cross-Roler, vyznačují se vysokou tuhostí a vynikající přesností. Tepelně nejnamáhanější části jsou provedeny z keramiky, neboť je lehká, dostatečně tvrdá, má vysokou tuhost, nerezaví, má vysoký elektrický odpor a je extrémě odolná vůči vysokým teplotám.



Obr. 3.2 Drátová řezačka Sodík AP250L ⁸

Použití

Metoda se využívá zejména pro zhotovování tvarových a šikmých řezů při výrobě střížných a lisovacích nástrojů s vysokou přesností a jakostí povrchu při minimální šířce řezu ve všech vodivých materiálech. Dále se používá pro dělení a obrábění velmi pevných a tvrdých materiálů jako jsou titanové slitiny, slinuté karbidy, kalené oceli aj.



Obr. 3.3 Pohled na řezný proces ¹⁸

3.1.2 Elektrokontaktní obrábění

Elektrokontaktní obrábění je zvláštním případem elektroerozivního obrábění, při kterém dochází k úběru materiálu elektrickými, nestacionárními kontaktními výboji. Elektrody, které tvoří nástroj a obrobek, jsou zapojeny do obvodu se zdrojem střídavého napětí. Nástrojová elektroda vykonává otáčivý pohyb, čímž se dosahuje mechanického buzení kmitů a zabraňuje se svaření nástroje a obrobku. Po dobu obrábění je obrobek chlazen vodou nebo stlačeným vzduchem. ⁷

Dosahované parametry

Elektrokontaktní obrábění je charakterizováno:

- výkonem obrábění (tj. množstvím odebraného materiálu) až $106 \text{ mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$
- tepelně ovlivněným povrchem do hloubky 0,2 až 5 mm
- velkou energetickou náročností
- vznikem ultrafialového záření

- nízkou kvalitou obrobené plochy

Použití

Elektrokontaktní obrábění se používá pro řezání nálitků, vtokových soustav, opracování svarů apod. Přednost této metody je jednoduchá konstrukce zařízení a vysoká produktivita. Nevýhodou je horší hodnota Ra, nižší tvarová a rozměrová přesnost a velká tepelně ovlivněná oblast.

3.1.3 Anodomechanické obrábění

Z hlediska odebrání materiálu je tato metoda na rozhraní mezi elektroerozivním a elektrochemickým obráběním. Proces probíhá při vysokých teplotách, přičemž roztavený kov je z místa obrábění odstraňován otáčejícím se nástrojem. Pracovní prostor je zaplaven kapalinou (vodní sklo), která plní funkci izolátoru s chladícím účinkem. Výboj nastává v místě, kde nástroj svým otáčením naruší izolační vrstvu. Další složkou úběru je elektrochemické rozpouštění, protože jsou vytvořeny podmínky elektrolýzy.

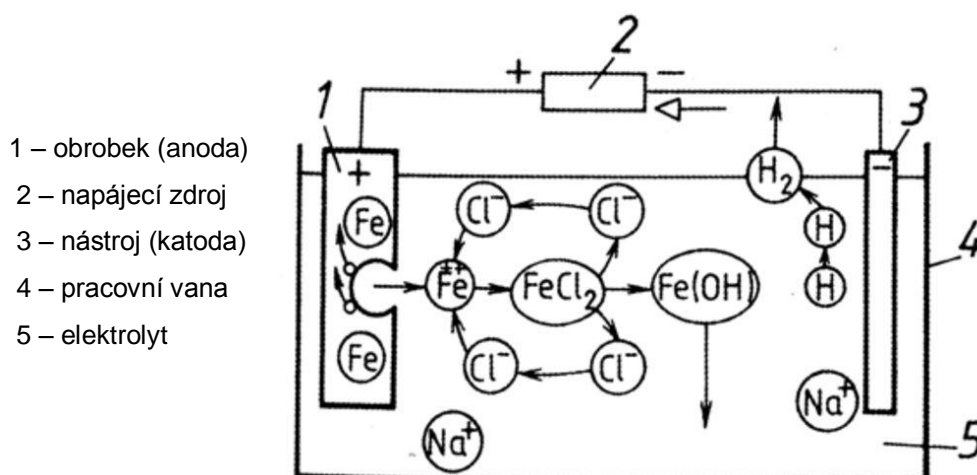
Jako nástroj se používá ocelový kotouč, pás nebo drát a je zapojen na katodu a obráběná součást na anodu. Anodomechanické obrábění se využívá zejména pro rozřezávání tvrdých a těžko obrobitelných součástí a pro tvarové broušení nástrojů ze slinutých karbidů.²

3.2 ELEKTROCHEMICKÉ OBRÁBĚNÍ

Elektrochemické obrábění je metoda beztržiskového obrábění elektricky vodivých materiálů. Metoda využívá působení elektrického proudu na elektrolyt, podstatou je jev zvaný elektrolýza.

Princip metody

Obrobek (anoda) spolu s nástrojovou elektrodou (katoda) jsou ponořeni do elektrolytu a dochází na něm k reakci, kde průchodem elektrického proudu dochází k slučování kationtů elektrolytu s anionty obráběné součásti a postupně rozrušují a ubírají kov z povrchu obráběné součásti. Proudící elektrolyt z povrchu součástí odplavuje nesoudržné a narušené částice. Úběr materiálu závisí na pracovní mezeře mezi elektrodami (0,05 až 1mm), na teplotě, rychlosti proudění a složení elektrolytu.

Obr 3.4 Princip elektrochemického obrábění⁹

Jako elektrolyt se nejčastěji používá NaCl, NaClO₃, HCl, H₂SO₄ a NaOH. Elektrolyt má za úkol odvádět z povrchu obráběné součásti teplo a produkty vzniklé chemickými reakcemi, zajistit vedení proudu a také má schopnost rozpouštět anodu.^{2,9}

Použití

Princip elektrochemického obrábění se využívá v různých odvětvích technologií obrábění:

- obrábění proudícím elektrolytem
 - hloubení tvarů a dutin forem
 - odstraňování otřepů
 - dělení materiálů
- s mechanickým odstraňováním
 - broušení
 - lapování
 - honování
- povrchové obrábění bez odstraňování produktů vzniklých chemickými reakcemi
 - leštění
 - povrchové značení

U jednoduchých tvarů dosahujeme přesnosti rozměrů až $\pm 0,01$ mm a u složitějších tvarů je to hodnota $\pm(0,05 \div 0,2)$ mm při hodnotě $R_a = 0,2 \div 2$ μm .

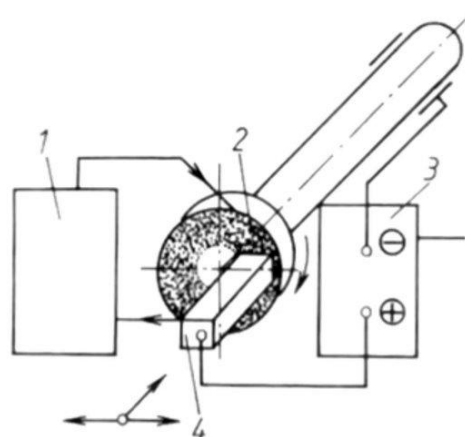
3.2.1 Elektrochemické broušení

U této metody broušení je obráběný materiál odebrán z 85 až 90% anodickým rozpouštěním a z 10 až 15% mechanickým účinkem zrn brousícího kotouče. Pracovní mezera je určena velikostí zrn brousícího kotouče. Jako nástroj se nejčastěji používá elektricky vodivý brousící kotouč, např. se zrna diamantu uloženými v niklové nebo bronzové vazbě.

Mezi výhody této metody je obrábění bez silových a tepelných účinků, bez otřepů a malé opotřebení brousícího kotouče.

U elektrochemického broušení se dosahuje jakosti opracovaného povrchu $R_a = 0,012$ až $0,25\mu\text{m}$ při rychlosti úběru materiálu až $1,5\text{ mm}^3\cdot\text{min}^{-1}$.⁹

- 1 – zásobník elektrolytu
- 2 – nástroj (vodivý brousící kotouč)
- 3 – napájecí zdroj
- 4 – obrobek



Obr 3.5 Princip elektrochemického broušení⁹

3.2.2 Elektrochemické lapování

Pro elektrochemické lapování se nejčastěji používají ocelové nebo litinové lapovací kotouče. Do pracovního místa se spolu s elektrolytem přivádějí také volná brousící zrna. Princip metody zůstává stejný jako u konvenčního lapování.

Elektrochemickým lapováním dosahujeme jakosti opracované plochy až $R_a = 0,1$ až $0,5\mu\text{m}$ a přesnost rozměrů $\pm 0,05\text{ mm}$.

3.2.3 Elektrochemické leštění

Základem elektrochemického leštění je anodické rozpouštění výstupků a nerovností povrchu materiálu v elektrolytu při průchodu stejnosměrného proudu. Nástroj tvoří katodu, a je vyráběn obvykle z olova (olovo je nerozpustné v elektrolytu) a musí mít větší plochu, než má obrobek. Podle materiálu obrobku a požadované jakosti obrobenej plochy se volí nejvhodnější elektrolyt (HCl, H_3PO_4 nebo H_2SO_4).

Elektrochemické leštění se uplatňuje zejména při dokončovacím obrábění vnitřků nádob (cisteren) užívaných v potravinářském průmyslu, které jsou vyrobeny z korozi-vzdorné oceli, dále k obrábění fólií a tenkostěnných trubek načisto.

Elektrochemickým leštěním dosahuje jakosti obrobené plochy až 40 až 50% R_a původního povrchu, lze dosáhnout hodnoty $R_a < 1 \mu\text{m}$. Při rychlosti úběru materiálu 0,5 až 0,8 $\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$.^{2,9}

3.3 CHEMICKÉ OBRÁBĚNÍ

Chemické obrábění je řízené odleptávání vrstev materiálu od několika setin až několika desetin milimetrů z povrchu obrobku, založené na chemické reakci obráběného materiálu s pracovním prostředím, nejčastěji kyselinou nebo hydroxidem. Místa, která nemají být obrobena se natírají lakem nebo pryskyřicí, tzv. maskou.

Metoda je ekonomicky výhodná při úběru malých tlouštěk materiálu z obrobků velkých plošných rozměrů a složitých tvarů.^{2,9}

3.3.1 Chemické rozměrové leptání

Tato metoda je někdy označována jako chemické frézování.

Beztřísková a bezsilová metoda obrábění, kde materiál obrobku je ve vrstvách odstraňován chemickou reakcí. Na plochy, které nemají být obráběny se nanáší speciální povlak z polyvinylových nebo polyamidových pryskyřic. Tvar obrobku se přenáší podle šablon. Leptání se provádí ponořením obrobku do leptacího roztoku.^{2,9}

Pracovní podmínky

- rychlost obrábění: 0,01 až 0,4 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$
- maximální hloubka odebírané vrstvy je až 10 mm (závisí na odolnosti masky)
- maximální doba leptání 8 až 10 hodin (nezávisí na celkové ploše obrábění, ale na odolnosti masky proti narušení chemickou látkou)
- obrobek je nutné vkládat do leptací lázně pod úhlem 45°

Použití

Tato metoda se využívá na obrábění slitin hliníku, hořčíku a titanu, dále konstrukční uhlíkové oceli, korozivzdorné oceli, mědi, mosazi aj. Drsnost povrchu závisí na obráběném materiálu a dosahujeme hodnot $R_a = 0,4$ až 6,3 μm .

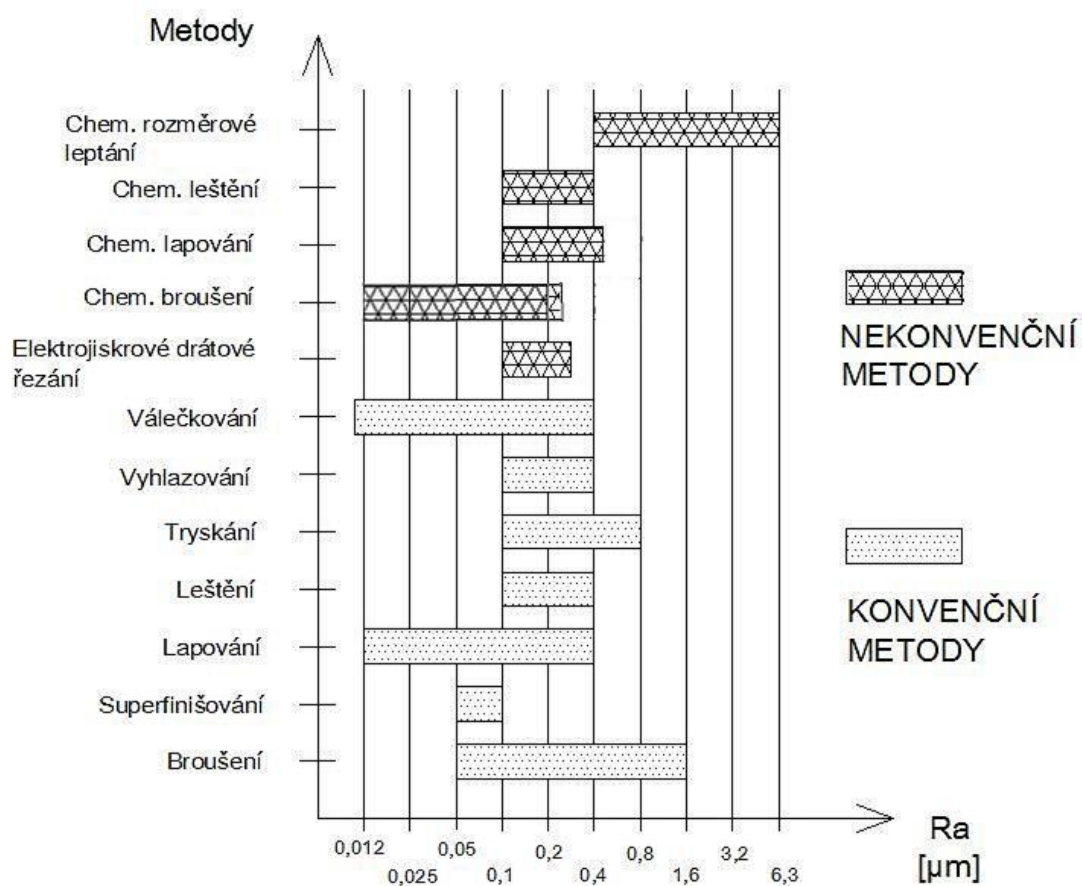
Slouží k výrobě mělkých, tvarově složitých reliéfů o velké ploše. Používá se na výrobu nosníků v leteckém průmyslu, potahů křidel z hliníků apod. Vhodná pro obrábění tenkostěnných trubek (nedochází k deformaci), tvarově složitých a málo tuhých součástí (obtížné upnutí).^{2,9}

4 POROVNÁNÍ DOKONČOVACÍCH METOD

Jednotlivé metody je možno posuzovat podle několika hlavních kritérií, jakými jsou výsledná kvalita povrchu, tvarová a rozměrová přesnost, rychlost výroby a v neposlední řadě také finanční hledisko. Každá metoda má svoje specifika a vhodnost použití pro daný materiál. Jednotlivé dokončovací metody jsou přehledně seřazeny v tabulce (Tab. 4.1) včetně jejich rozměrové přesnosti IT a struktury povrchu Ra.

Z hlediska struktury povrchu a přesnosti rozměrů se jako nejpřesnější dokončovací metoda jeví lapování ($Ra = 0,012 - 0,4 \mu\text{m}$ a IT 1 - 5) a superfinišování ($Ra = 0,05 - 0,1 \mu\text{m}$ a IT 1 - 3).

Mezi nekonvenčními metodami je nejpoužívanější a nejrozšířenější elektrojiskrové drátové řezání s dosahovanou drsností povrchu $Ra = 0,1$ až $0,3 \mu\text{m}$, které se používá zejména při výrobě střížných a lisovacích nástrojů.



Obr. 4.1 Srovnání dokončovacích metod dle struktury povrchu Ra^{2, 3, 7, 9}

Tab.4.1 Porovnní dokončovacích metod ^{2, 3, 7, 9}

Přehled vybraných technologií pro dokončovací operace rovinných ploch

	Technologie	Struktura povrchu Ra [μm]	Přesnost rozměru IT [-]
KONVENČNÍ METODY			
<i>Třískové dokončovací metody</i>	Broušení	0,05 až 1,6	3 až 7
	Superfinašování	0,05 až 0,1	1 až 3
	Lapování	0,012 až 0,4	1 až 5
	Leštění	0,1 až 0,4	3 až 7
	Tryskání	0,1 až 0,8	-
<i>Beztrískové dokončovací metody</i>	Vyhlazování	0,1 až 0,4	-
	Válečkování	0,01 až 0,4	3 až 5
NEKONVENČNÍ METODY			
<i>Elektroerozivní obrábění</i>	Elektrojiskrové drátové řezání	0,1 až 0,3	-
<i>Elektro - chemický princip</i>	El.-chem. broušení	0,012 až 0,25	-
	El-chem. lapování	0,1 až 0,5	-
	El.-chem. leštění	0,1 až 0,4	-
<i>Chemický princip</i>	Chemické rozměrové leptání	0,4 až 6,3	-

ZÁVĚR

Dokončování rovinných ploch je neodmyslitelnou součástí strojírenské výroby. Díky stále se vyvíjejícím a zdokonalujícím technologiím, dochází ke zlepšení vlastností obrobku, zefektivnění výroby, snížení výrobních nákladů a v poslední době taky zvýšení ekologie výroby.

Práce obsahuje celou řadu technologií pro dokončování rovinných ploch. Jsou zde popsány konvenční a nekonvenční metody, které jsou ve strojírenské praxi nejhojněji využívány. Aby bylo možné jednotlivé metody mezi sebou porovnat, je potřeba si určit kritéria hodnocení. Proto je u každé metody uvedena drsnost povrchu Ra, dosahovaná přesnost rozměrů IT, jakost povrchové vrstvy a důležitým faktorem je taky vzhled povrchu.

Mezi konvenčními metodami je nejpoužívanější broušení díky své dostupnosti a univerzálnosti použití. Superfinašování a lapování se používá pro velmi přesné dokončování rovinných ploch, ale je zde zapotřebí speciálních strojů a nástrojů, prodlužují se výrobní časy, to vše se promítne do konečné ceny výrobku. Metoda leštění zlepšuje pouze vzhled součástí a na rozměrovou přesnost nemá vliv. Válečkování (metoda bez úběru materiálu) zlepšují mechanické vlastnosti povrchové vrstvy (mikrogeometrie povrchu) a přesnost rozměrů je vyšší.

Nekonvenční (progresivní) metody obrábění jsou stále častěji využívány, protože jejich použití není závislé na mechanických vlastnostech obráběného materiálu (tvrdost, křehkost, obrobitelnost). V moderním strojírenství neustále vznikají nové materiály, které jsou konvenčními metodami takřka obrobitelné. U obrábění rovinných ploch je potřeba zmínit především elektrojiskrové drátové řezání, kde je dosahováno vysoké jakosti obrobeného povrchu. Elektrochemické obrábění (elektrochemické – broušení, lapování, leštění) kombinuje konvenční metody s nekonvenčními. Nevýhodou nekonvenčních metod je vysoká energetická náročnost a taky vyšší pořizovací cena strojů i nástrojů. Naproti tomu výhodou je univerzálnost použití a obrobitelnost velmi tvrdých materiálů.

Pro správnou volbu dokončovací metody se musí brát v úvahu vliv předchozího obrábění, vlastnosti obráběného materiálu, požadovaná výsledná kvalita povrchu a finanční náročnost operace. Ve strojírenském průmyslu je nespočet dokončovacích metod, které se stále vyvíjejí a zdokonalují, tento trend se dá očekávat i do budoucna.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BRYCHTA, J. et al. Nové směry v progresivním obrábění. 1. vyd. Ostrava: Ediční středisko VŠB – TUO, 2007. 251 s. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [2] KOČMAN, K.; PROKOP, J. Technologie obrábění. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
- [3] MÁDL, J. et al. Technologie obrábění: 3. díl. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. 81 s.
- [4] VEJSKEBR, J., ŠPETA, Z. Dokončování a zpevňování povrchu strojních součástí válečkováním. Praha: SNTL, 1984.
- [5] ZEMČÍK, O. Technologická příprava výroby. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. 158 s. ISBN 80-2142219-X.
- [6] FRIEDRICH, U. Nová generace superfinišovacích zařízení. [online]. 2007 [cit. 2011-04-19]. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nova-generace-superfinisovacich-zarizeni>>.
- [7] ŘASA, J; KEREČENINOVÁ, Z. Nekonvenční metody obrábění. [online]. 2007 [cit. 2011-04-19]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni>>.
- [8] Www.mmspektrum.com [online]. 2010 [cit. 2011-05-24]. Drátová řezačka pro nadstandardní povrchy. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/dratova-rezacka-pro-nadstandardni-povrchy>>.
- [9] ŘASA, J; KEREČENINOVÁ, Z. Nekonvenční metody technologie. [online]. 2007 [cit. 2011-04-19]. Dostupný z WWW: <www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-2-2> .
- [10] Www.mmspektrum.com [online]. [cit. 2011-05-24]. MM průmyslové spektrum. Dostupné z WWW: <http://www.mmspektrum.com/multimedia/image/67/6739_big.jpg>.
- [11] Www.brusivojimi.com [online]. 2008 [cit. 2011-04-19]. Leštící pasty a nástroje. Dostupné z WWW: <<http://www.brusivojimi.com/lestici-pasty-a-nastroje/>>.
- [12] Www.tatje.com [online]. [cit. 2011-04-19]. Dostupné z WWW: <http://www.tatje.com/uploads/pics/wolters1_02.jpg>.

- [13] Www.brolle.cz [online]. [cit. 2011-04-19]. Výroba a prodej leštících kotoučů. Dostupné z WWW: <<http://www.brolle.cz/obr/centr.jpg>>.
- [14] Www.brightbright.com [online]. [cit. 2011-04-19]. Katalog nástrojů. Dostupné z WWW: <<http://www.brightbright.com/BBT2006.pdf>>.
- [15] Www.gontermann-peipers.de [online]. [cit. 2011-04-19]. Firemní stránky. Dostupné z WWW: <<http://www.gontermann-peipers.de/produkte/gussprodukte/laeppwerkzeuge/>>.
- [16] Www.elektricke-naradi.cz [online]. [cit. 2011-05-17]. Katalog elektrického nářadí. Dostupné z WWW: <<http://www.elektricke-naradi.cz/data/products/>>.
- [17] Www.stroje-23.maxportal.cz [online]. [cit. 2011-05-20]. Dostupné z WWW: <http://stroje-23.maxportal.cz/foto/original/fotka_37272.jpg>.
- [18] Www.metalexmfg.com [online]. [cit. 2011-05-22]. Metalex - firemní stránky. Dostupné z WWW: <<http://www.metalexmfg.com/edm.html>>.
- [19] Www.diama.cz/ [online]. [cit. 2011-05-20]. Firemní stránky DIAMA. Dostupné z WWW: <<http://www.diama.cz/vyrobky.html>>.
- [20] Www.piskovacky.cz/ [online]. [cit. 2011-05-20]. Pískovací zařízení. Dostupné z WWW: <<http://www.piskovacky.cz/abraziva-seznam.php>>.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Význam
A_D	mm^2	průřez odebírané třísky
CNC	-	Computer Numerical Control
D	mm	maximální průměr
F_C	N	řezná síla
l_g	mm	geometrická délka styku
NMO	-	nekonvenční metody obrábění
SK	-	slinutý karbid
T	mm	výška brusného kotouče
a_e	mm	pracovní (radiální) záběr
a_p	mm	zadní (axiální) záběr
d	mm	průměr kotouče
f_a	mm	axiální posuv stolu na jednu otáčku
f_r	mm	radiální posuv
k_C	MPa	měrná řezná síla
n	min^{-1}	otáčky
v_C	m.s^{-1}	řezná rychlost
v_{ft}	m.s^{-1}	tangenciální rychlost obrobku
v_W	m.min^{-1}	obvodová rychlost obrobku