

Doc. Ing. Zdenko Lipa, CSc. – Prof. Ing. Alexander Janáč, CSc.

DOKONČOVACIE SPÔSOBY OBRÁBANIA

© Doc. Ing. Zdenko Lipa, CSc., Prof. Ing. Alexander Janáč, CSc.

Lektori: Doc. Ing. Jozef Zongor, CSc.
Prof. Ing. Ján Hrubec, DrSc.

Vydala Slovenská technická univerzita v Bratislave vo Vydavateľstve STU, Bratislava,
Vazovova 5.

Schválila Vedecká rada Materiálovotechnologickej fakulty STU v Trnave, na základe edičného plánu fakulty schváleného dňa 23.2.1999 VR MtF STU, pre študijný odbor Technológia strojárskkej výroby.

ISBN 80-227-1324-4

Predhovor

Predkladané skriptá majú názov *Dokončovacie spôsoby obrábania* v zhode s názvom predmetu, ktorý sa prednáša v 5. ročníku denného inžinierskeho štúdia odboru *Technológia strojárskkej výroby a zamerania obrábanie*.

V zhode s názvom predmetu, ktorý je už v podstate klasický, je urobený aj výber látky na výučbu. Pre napísanie takýchto skript nás primäla aj skutočnosť, že zmienenej problematike dokončovacích spôsobov obrábania sa v odbornej a učebnicovej literatúre nevenovala taká pozornosť, aká by mala vyplývať z významu týchto dokončovacích spôsobov obrábania, ktoré v značnej miere určujú aj kvalitu výroby strojárskych súčiastok. Toto sa týka nielen našej domácej, ale aj zahraničnej odbornej a učebnicovej literatúry. Hrubovacie (výkonové, silové) obrábanie je viac rozpracované ako dokončovacie (jemné, presné) obrábanie, a preto poskytuje aj bohatší materiál a vďačnejšiu tému na publikačné (učebnicové) spracovanie. Predsa však existuje niekoľko publikácií, o ktoré sa pri spracovávaní uvedenej tematiky možno oprieť. Neprezradíme žiadne tajomstvo, ak uvedieme, že v tomto smere nám bola veľmi užitočná kniha Ing. Jozefa Gašpárka, CSc., ktorá má taký istý názov ako naše skriptá. Hoci kniha vyšla pred 20 rokmi, v mnohom ohľade je ešte stále aktuálna už i preto, že autor sa pri jej spracovaní snažil podchytiť všetko moderné a progresívne v danej oblasti. Predsa však niektoré informácie boli vývojom už prekonané. Takéto informácie do nášho textu skript sme samozrejme nezaradili. Náš text sa od textu uvedeného autora líši aj tým, že sme viac pozornosti venovali najpresnejším spôsobom dokončovacieho obrábania, ako je napr. superfinišovanie.

Výber textu do akýchkoľvek učebníc sa do určitej miery riadi aj profesionálnym záujmom a bádateľskou činnosťou autorov. Aj preto je v našom texte podstatne viac miesta venovaného napr. superfinišovaniu oproti honovaniu, čo u Gašpárka je naopak. Navyše sme sa snažili uviesť do nášho textu aj naše výsledky výskumu (napríklad už do uvedeného textu o superfinišovaní).

Text skript spracovali doc. Ing. Zdenko Lipa, CSc., ktorý sa venoval najmä kapitolám, kde nástroj nemal definovanú geometriu a prof. Ing. Alexander Janáč, CSc., ktorý sa venoval najmä kapitolám, kde nástroj mal definovanú geometriu.

Text skript veľmi pozorne a zodpovedne posúdili prof. Ing. Ján Hrubec, DrSc. z MtF STU Trnava a doc. Ing. Jozef Zongor, CSc. zo SjF STU Bratislava. Autori obom recenzentom

d'akujú za vynaložené úsilie a pripomienky na zlepšenie textu. Ďakujeme aj Vydavateľstvu STU za vkusnú tlač.

Skriptá sú určené poslucháčom, ktorí už absolvovali predmety *Technológia obrábania* a *Teória obrábania*, a preto autori predpokladajú u čitateľa znalosti uvedené v učebniciach a skriptách pre vyššie uvedené predmety. Zároveň predložené skriptá majú isté styčné body s predmetom *Progresívne metódy obrábania*, pre ktoré napísal skriptá prof. Ing. Ján Hrubec, DrSc. Snažili sme sa vyhnúť tým pasážam textu, ktoré sú vykladané prof. Ing. J. Hrubcom, DrSc. v uvedenom predmete.

Záverom chceme popriať čitateľom našich skript veľa trpezlivosti a zdaru pri ich štúdiu.

Doc. Ing. Zdenko Lipa, CSc.

Prof. Ing. Alexander Janáč, CSc.

autori

V Trnave 9.9.1999

Úvod

U nás sa tradične strojárská technológia delila na niekoľko oblastí. Najčastejšie bolo udávané jej delenie na:

- odlievanie
- tvárnenie
- obrábanie
- tepelné spracovanie
- zváranie
- montáž

Nebudeme sa na tomto mieste zaoberať opodstatnenosťou uvedeného delenia, jeho úplnosťou, či preurčenosťou. V poslednom období sa však presadzuje iné, všeobecnejšie (aplikovateľné nielen v strojárskej technológii) delenie na:

- zmeny štruktúry materiálu
- zmeny tvaru premiestnením materiálu
- zmeny tvaru odobratím materiálu
- spojovanie materiálu (aspoň 2 súčiastok)
- rozdeľovanie materiálu (na aspoň 2 súčiastky)
- opracovanie povrchu.

Sú však aj iné modifikácie tohto delenia. Nás však bude zaujímať, kam sa zaradia dokončovacie spôsoby obrábania. Pri prvom uvedenom delení je to jednoznačné. Patria do obrábania, ktoré sa delí na hrubovacie (výkonové, ktoré sa hodnotí najmä objemovým výkonom obrábania, t.j. množstvo odobratého kovu za jednotku času) a dokončovacie (presné, ktoré sa hodnotí najmä kvalitou získaného povrchu a presnosti tvaru, polohy plôch a rozmerov). Pri druhom uvedenom delení dokončovacie spôsoby obrábania budú patriť do poslednej uvedenej oblasti, do skupiny technológií zabezpečujúcich opracovanie povrchu.

Podľa nového delenia je dokončovacím spôsobom obrábania daný väčší význam, lebo opracovanie povrchu je samostatnou oblasťou. Do popredia sa dostáva popri materiálovom inžinierstve aj nová disciplína - *povrchové inžinierstvo*. Táto novo sa rozvíjajúca disciplína čerpá najmä z tribológie (produktu aplikovaného výskumu), pretože základná vedná disciplína,

ktorú by sme mohli nazvať (aj ju tak niektorí bádatelia nazývajú) fyzika povrchov, je zatiaľ len v štádiu vývoja (trenie ešte neprebádala, opotrebeniu sa zatiaľ nevenuje, pre tvrdosť zatiaľ ešte nestanovila ani fyzikálnu jednotku a podobne).

Pri dokončovacích spôsoboch obrábania môžeme ešte hovoriť aj o mikrotechnológiách i nanotechnológiách a v poslednej dobe aj o pikotechnológiách. Pojem povrchu je v skutočnosti fikcia, idealizácia na rozhraní medzi súčiastkou a prostredím. Toto rozhranie totiž nie je pevne či presne stanovené. Toto rozhranie sa v určitých malých medziach časovo mení. Môžeme hovoriť o tenkej povrchovej, či lepšie povedané podpovrchovej vrstve (vzniknutej napr. oxidáciou, mechanickým spevnením a pod). Takáto tenká vrstva na povrchu súčiastky môže mať rôzne vlastnosti, aj iné ako základný materiál (na ktorom vrstva je). Takáto vrstva nemusí byť len jedna, môže ich byť viac a môžu existovať aj medzivrstvy (najmä medzi základným materiálom a prvou vrstvou). Môže ísť aj o vrstvy prirodzené (vzniknuté napr. oxidáciou) alebo umelé. Takýmto vrstvám sa zvyklo hovoriť povlaky. Povlaky teda môžu byť umelé alebo prirodzené, jedno alebo viacvrstvé. A teraz už môžeme vysloviť, aký je rozdiel medzi mikro a nanotechnológiami. Tenké vrstvy možno odoberať zo súčiastky, alebo ich tam aj pridávať. Ak je pridaná alebo odobraná vrstva rádovo v mikrometroch, ide o mikrotechnológie. Ak je pridaná alebo odobraná vrstva rádovo v nanometroch, ide o nanotechnológie atď. Vrstva v pikometroch (v rámci pikotechnológii) znamená, že ide o vrstvy hrúbky už len jedného, či niekoľko málo atómov.

Pretože pracovné podmienky v mikrotechnológiách, nanotechnológiách, pikotechnológiách sú podstatne iné ako v (makro)technológiách, môžeme tiež hovoriť špeciálne o mikroobrobiteľnosti, nanoobrobiteľnosti, na rozdiel od (makro)obrobiteľnosti. Pretože (makro)obrobiteľnosť sa chápe ako relatívna veličina vzhľadom na stanovený a všeobecne uznaný porovnávací (tzv. etalónový) materiál, mikro a nanoobrobiteľnosť zatiaľ stanovovať nemôžeme, pretože nie je definovaný (určený) porovnávací materiál (vrstvy, povlaky). Existujú na to však už bádateľské programy a zdá sa, že čoskoro tieto záležitosti bude možné stanovovať.

Dokončovacie spôsoby zhotovovania povrchov sú doménou nielen obrábania. Povrchy možno upravovať napr. kalením, cementovaním, naváraním, spevňovať valčekom, spevňovať guľkou rozkmitanou na ultrazvukovú frekvenciu, upravovať elektrónovým lúčom, laserom, pôsobiť elektroiskrovo, elektrolyticky, povrchy možno nanášať plazmou, elektromagnetickým poľom, či inak nanášať rôzne vrstvy, ktoré môžu mať diametrálne

rozdielne niektoré vlastnosti od podkladového materiálu (napr. elektrická vodivosť, či nevodivosť, tepelná vodivosť, oteruvzdornosť a i). A pritom sme nespomenuli všetky možné spôsoby technologického pôsobenia na povrch súčiastiky. Možné sú i nanášania rôznych náterov, ochranných fólií a pod. Existujú ešte aj tzv. presné spôsoby liatia, kovania, lisovania a podobne. Tieto však nateraz ešte nemôžu z hľadiska presnosti dosť dobre konkurovať presným spôsobom obrábania. Všetky spôsoby vytvárania povrchov (vrátane integrácie so zhotovovaním tvaru prípadne i štruktúry materiálu) sú však predmetom neustáleho bádania a zdokonaľovania.

Nakoniec pár poznámok k histórii vytvárania povrchov. Vzhľadom na vyžadované menšie silové pôsobenie (než napr. u zhotovovania tvarov) možno sa oprávnene domnievať, že tieto niektoré mechanické metódy v ručnom prevedení stáli už na začiatku civilizácie, už na začiatku technického pôsobenia človeka (bez ohľadu na to, či budeme myslieť biblického Adama alebo človeka diluviálneho). Ale mnohé metódy dokončovania povrchov sú produktom až dvadsiateho storočia. Napríklad superfinišovanie vzniklo v r. 1934, keď Wallace, Swigert a iní v USA prišli na nápad vytvoriť umelé zabehávanie obežných dráh valivých ložísk (pre zvýšenie ich životnosti a odstraňovanie nedostatkov po brúsení, ktoré samozrejme svojím vysokým teplotným zaťažením spôsobovalo niekedy až drobné trhliny v obrúsenej ploche v dôsledku existencie ťahových zvyškových napätí). Umelé zabehávanie napokon uvedení autori prepracovali v priebehu niekoľko málo rokov na vysokopresnú a spoľahlivú metódu dokončovacieho obrábania.

1. Miesto a účel dokončovacích spôsobov v obrábaní. Klasifikácia dokončovacích spôsobov obrábania.

S rastom technickej úrovne vyrábaných strojov a zariadení kladú sa vyššie požiadavky na materiály, z ktorých sa tie stroje a zariadenia zhotovujú, pričom sa využívajú nové, pevnejšie a húževnatejšie materiály a zároveň sa rozširuje množstvo súčiastok, pri ktorých sa vyžaduje vysoká akosť povrchu. Preto sa v praxi stále viac uplatňujú tvarovo náročné súčiastky s predpísanou vysokou akosťou povrchu a s úzkymi rozmerovými toleranciami. Objavuje sa problém opracovávania veľmi tvrdých a ťažkoobrobiteľných materiálov s vysokými požiadavkami na tvarovú i rozmerovú presnosť a aj kvalitu povrchu. Uvedená problematika sa rieši tzv. dokončovacími spôsobmi obrábania. Vysokou presnosťou tvaru, rozmerov, polohy i kvality povrchu sa umožnila sériová výroba vymeniteľných súčiastok. Súčiastky s kvalitným povrchom lepšie znášajú dynamické zaťaženie, lepšie odolávajú opotrebeniu, viac vzdorujú korózii, čím sa zvyšuje funkčná spôsobilosť, spoľahlivosť i životnosť zložitých celkov, a tým aj ekonomická výhodnosť celých strojov a zariadení.

Základné charakteristiky dokončovacích spôsobov obrábania sú odvodené od fyzikálnych zákonov a ich aplikácii v technickej praxi. Každý technologický spôsob (metóda) sa vyznačuje fyzikálnym alebo chemickým pôsobením na objekt technologického spracovávanía. Dokončovacie spôsoby obrábania môžu byť zahrnuté medzi spôsoby označované ako mikrotechnológie a nanotechnológie. Pod týmito pojmi sa myslia také výrobné technológie, pri ktorých sa dosahuje presnosť rozmerov v mikrometroch, resp. v nanometroch. U nanotechnológii sa teda odoberá alebo pridáva (povlakuje) materiál v rozmedzí atómovej alebo molekulovej štruktúry. V oboch prípadoch (mikro i nanotechnológii) sa teda postupuje v zásade dvoma spôsobmi. Buď ide o odoberanie príslušnej vrstvy povrchu, alebo ide o pridávanie (povlak) vrstvy povrchu v uvedených rozmerových reláciách. Cieľom dokončovacieho obrábania je zlepšenie tvaru, rozmerov i kvality povrchu. Pri dokončovaní spravidla odoberáme len malé triesky - mikrotriesky (ak sa o trieskach vôbec dá hovoriť, lebo trieska je z geometrického hľadiska teleso, ktorého rozmery majú byť odvoditeľné od podmienok obrábania. V opačnom prípade ide len o odoberané amorfné častice, iskry, kvapky roztaveného kovu a podobne). Tieto malé triesky (alebo malé častice odobratého kovu) kladú malý rezný odpor, spôsobujú len nízke deformácie obrobku, nástroja i

obrábacieho stroja, a tak zaručujú veľkú presnosť obrobku. Dosahovaná drsnosť povrchu býva veľmi nízka, menej ako $Ra = 0,8 \mu m$. Dokončená plocha má vysokú akosť, rovnomerný vzhľad, ba niekedy je až zrkadlovo lesklá, čo však nie je vždy nutné, lebo drobným ryhovaním získaný matný povrch (samozrejme tiež po dokončovaní) lepšie drží tzv. mazací film, čím sa znižuje trenie i opotrebenie takýchto navzájom sa kontaktujúcich (pohybovo) plôch.

Ďalším znakom dokončovania je vysoká presnosť rozmerov pri dodržaní odchýlok tvaru a polohy (ovalita, hranatosť, vlnitosť, kužeľovitost', rovinnosť, kruhovitosť, priamosť, súosovosť, rovnobežnosť, kolmosť a podobne).

Jednotlivé dokončovacie spôsoby obrábania možno rozdeliť do štyroch skupín. Prvú skupinu tvoria spôsoby, pri ktorých sa pracuje s nástrojmi s pevne stanovenou (definovanou) geometriou rezného klinu. Tieto možno ešte rozdeliť na spôsoby používajúce nástroje pracujúce s jedným rezným klinom, resp. pracujúce s viacerými reznými klinmi (teda 2 podskupiny). Takto do prvej podskupiny prvej skupiny dokončovacích spôsobov obrábania patria: jemné sústruženie, jemné vyvrtávanie a zaškrabávanie. Do druhej podskupiny prvej skupiny dokončovacích spôsobov obrábania patria: vyhrubovanie, vystružovanie, jemné frézovanie, preťahovanie (i s kalibračnými zubami) a pretlačovanie (i s kalibračnými zubami). Druhú skupinu tvoria dokončovacie spôsoby obrábania pracujúce s nástrojmi s neurčitou geometriou rezného klina. I tu môžeme uvažovať dve podskupiny a to spôsoby používajúce pevne uložené zrná (reprezentujúce rezné klíny) a voľne uložené zrná. Do prvej podskupiny druhej skupiny dokončovacích spôsobov obrábania patria bežné brúsenie, jemné brúsenie, (niekedy sa zvykne rozlišovať v závislosti od zrnitosti brúsneho kotúča brúsenie na čisto, jemné brúsenie, najjemnejšie brúsenie) honovanie a superfinišovanie. Do druhej podskupiny druhej skupiny dokončovacích spôsobov obrábania patria lapovanie a leštenie (ak zrná nie sú prilepené na leštiace kotúče glejom a i., resp. nie sú viazané v spojive lapovacieho kotúča). Do tretej skupiny dokončovacích spôsobov obrábania patria rozličné kombinované spôsoby, ako sú leštenie kotúčmi, leštenie pásmi, chemické a elektrochemické leštenie, kefovanie a omielanie. Štvrtú skupinu tvoria spôsoby beztrieskového obrábania (pôsobenie len tlakom), ako sú guľkovanie, valčekovanie, brokovanie, kalibračné preťahovanie a pretlačovanie, hladenie zaoblenými diamantami. Dôležitým parametrom obrábania prvej a druhej skupiny je rezná rýchlosť. V tretej a štvrtej skupine hovoríme len o rýchlosti leštenia, kefovania, valčekovania a pod. Výsledkom dokonalého spôsobu dokončovacieho obrábania je vysoká kvalita povrchu, veľká presnosť geometrických tvarov a dodržanie rozmerov s úzkymi

toleranciami. Tieto určujú technologickú úroveň daného spôsobu obrábania. K tomu treba ešte zvažovať nákladovosť (čo najnižšiu) a výrobnosť (čo najvyššiu), a tak sa dostávame k hospodárnosti daného spôsobu obrábania. Uvedená klasifikácia dokončovacích spôsobov obrábania nie je úplná, lebo sa stále objavujú nové, dokonale ešte nepreskúmané princípy, ktoré sa len overujú, ako vplyv ultrazvuku na superfiniš a i., magnetického poľa na leštenie a i., využitie laserov, elektrónových lúčov a podobne. Tieto spôsoby zatiaľ predstavujú doplnkovú piatu skupinu. Dokončovacie procesy sa rozvíjajú i vývojom nových rezných materiálov (DIA, KNB, povlakované zrná, legované zrná, usmernené mono-zrná, polykryštalické zrná a pod.)

2. Jemné sústruženie, jemné vyvrtávanie, vystružovanie, používané parametre, dosahované výsledky

2.1 Základné pojmy podľa ISO 3002-1

Plochy na obrobku:

- obrábaná plocha je plocha na obrobku, ktorá má byť obrobená rezaním
- obrobená plocha je získaná prechodom rezného nástroja
- prechodová plocha je tá časť povrchu, ktorá je vytvorená na obrobku pôsobením reznej hrany počas nasledovného zdvihu, otáčky nástroja alebo obrobku, alebo nasledovnej reznej hrany

Prvky nástroja:

- rezná hrana je tá časť hrany, ktorá má vykonať rezanie
- nástrojová hlavná rezná hrana S je tá časť reznej hrany, ktorá začína v bode, kde nástrojový uhol nastavenia reznej hrany κ_r je rovný nule a ktorá má slúžiť na vytváranie prechodovej plochy na obrobku. V prípade, že nástroj má ostrý hrot, hlavná rezná hrana začína na tomto hrote; v prípade, keď hodnota κ_r nedosiahne nulu v žiadnom bode, potom celá rezná hrana je hlavnou reznou hranou (napr. v prípade rovinného frézovania)
- nástrojová vedľajšia rezná hrana je tá časť reznej hrany, kde nástrojový uhol nastavenia reznej hrany κ_r je rovný nule, ale v smere od hlavnej reznej hrany; vedľajšia rezná hrana vykonáva dokončovaciu prácu na obrobenej ploche: nezúčastňuje sa pri vytváraní prechodovej plochy, niektoré nástroje môžu mať niekoľko vedľajších rezných hrán (napr. v prípade upichovania)
- hrot je relatívne malá časť reznej hrany nachádzajúca sa na spojnici hlavnej a vedľajšej reznej hrany: môže byť zaoblený alebo priamy
- polomer hrotu r_E je polomer zaoblenia reznej hrany na hrote, meraný v nástrojovej základnej rovine
- polomer zaoblenia reznej hrany r_n je polomer reznej hrany, meraný v nástrojovej normálovej rovine

Pohyby nástroja a obrobku:

- hlavný pohyb - je to pohyb vykonávaný obrábacím strojom alebo ručne a zabezpečuje vzájomný pohyb medzi nástrojom a obrobkom: pri sústružení je to otáčavý pohyb obrobku, pri vŕtaní a frézovaní je to otáčavý pohyb nástroja, pri hobľovaní je to pozdĺžny pohyb stola, hlavný pohyb spolu s posuvom umožňujú viacnásobné alebo plynulé odrezávanie triesok počas niekoľkých otáčok alebo zdvihov, vo všeobecnosti hlavný pohyb spotrebuje najväčšiu časť z celkového výkonu potrebného pri obrábaní
- rezná rýchlosť v_c - je to okamžitá rýchlosť hlavného pohybu uvažovaného bodu na reznej hrane vo vzťahu k obrobku
- posuvový pohyb - je to pohyb vykonávaný obrábacím strojom alebo ručne zabezpečujúci ďalší relatívny pohyb medzi nástrojom a obrobkom, ktorý spolu s hlavným pohybom umožňuje opakované alebo plynulé odrezávanie triesky z obrábaného povrchu, tento pohyb môže byť postupný alebo plynulý, spotreba energie je menšia ako pri hlavnom pohybe, pri určitých operáciách obrábania, ako rezanie závitov alebo pretáhanie, posuvný pohyb nie je potrebný, utváranie povrchu je vykonávané sadou zubov, ktoré sú usporiadané vzostupným spôsobom
- rýchlosť posuvu v_f - je to okamžitá rýchlosť posuvového pohybu v uvažovanom bode na reznej hrane vo vzťahu k obrobku: keď je posuv prerušovaný, napríklad pri hobľovaní, rýchlosť posuvu nie je definovaná
- výsledný rezný pohyb - je to pohyb vychádzajúci zo súčasného hlavného pohybu a posuvového pohybu
- výsledná rezná rýchlosť v_c - je to okamžitá rýchlosť výsledného rezného pohybu uvažovaného bodu na reznej hrane vo vzťahu k obrobku

2.2 Jemné sústruženie

Charakteristickým znakom jemného sústruženia (a vôbec jemného obrábania, t.j. jemného sústruženia, frézovania ...) je malý prierez triesky odoberaný relatívne veľkou reznou rýchlosťou (oproti bežnému obrábaniu). Jemným sústružením odoberáme prídavok 0,3 až 0,5 mm na priemer niekoľkými zábermi s hĺbkami rezu 0,1 až 0,25 mm (a posledný záber pokiaľ je to možné aj s menšou hĺbkou rezu v stotínach, resp. tisícinách mm). Posuv býva 0,05 až 0,2

mm. Rezná rýchlosť 150 m/min až 1200 m/min (SK do 250 m/min, DIA 800-1000 m/min, RK až 1200 m/min). Vysoká rezná rýchlosť má priaznivý vplyv na akosť povrchu, pretože dynamickým účinkom umožňuje hladké odrezávanie kryštálov materiálu pri malej hĺbke deformovanej vrstvy. Malý posuv na otáčku zvyšuje kvalitu povrchu, malá hĺbka rezu vylučuje vznik väčších rezných odporov, ktoré by mohli spôsobiť geometrické nepresnosti. Tým sa tiež obmedzuje aj vznik tepla v procese rezania.

Geometria rezného klina nástroja sa má robiť tak, aby nástroj umožňoval správny vznik triesky malého prierezu a aby pracoval bez nebezpečenstva chvenia. Zvyčajne býva na hrote zakončený plôškou, pretože zaoblený hrot má väčší sklon k chveniu. Plochy vytvárajúce prienikom rezné hrany majú byť kvalitné (lapované dia), čím sa zabezpečí dokonalá ostrosť reznej hrany, jej vysoká reznosť, aj vysoká kvalita obrobeného povrchu. Volia sa také uhly, ktoré kolmo na obrábanú plochu spôsobujú malé sily. Geometriu rezného klina volíme tak, aby bolo $\gamma_0 = 5 - 10^\circ$, $\alpha_0 = 6 - 15^\circ$, $\lambda_s = 0 - 5^\circ$. Pri sústružení kalených ocelí ($H_{RC} = 60$ až 64) volíme záporný uhol čela. Jeho hodnota býva $\gamma_0 = -10^\circ \div -45^\circ$. Pri sústružení veľmi pevných a veľmi tvrdých materiálov sa používajú povlakované rezné doštičky (TiC, TiN ...). Ak má byť akosť sústruženého povrchu vysoká, treba aby stopy po nástroji netvorili nežiaduce ryhy na obrobenom povrchu (lomená hlavná rezná hrana alebo hladiaca plôška $0,8 \div 2$ mm u úzkeho hladiaceho noža, široký hladiaci nôž a pod.)

Tvar nástroja a rezné podmienky volíme tak, aby každé miesto na obrábanom povrchu (vrstve) prišlo do styku s nástrojom len raz, a to pri vytváraní triesky. Ak toto dodržíme, tak povrch po oddelení triesky sa nepodrobuje ďalším mechanickým vplyvom (tlakom, deformáciám, poškrabaniu) a neostávajú na ňom nežiaduce stopy.

Pre jemné sústruženie možno použiť aj bežné rezné kvapaliny, ako sú 1,5 - 2,5 % vodné roztoky (olejov, mydla, baraxu ai.) alebo emulzie. Možno použiť i nástroje s RO (okrem SK, DIA, RK...) Stroje na jemné sústruženie musia byť dostatočne tuhé, lebo pracujú pri vysokých otáčkach za sťažených kinematických pomeroch. Ich nedostatočná tuhosť by vplyvom možného chvenia spôsobila zhoršenie tvaru a nižšiu kvalitu povrchu. Jemné sústruženie je dokončovacia operácia pre klzné a točivé uloženia. Vyznačuje sa vysokou trvanlivosťou nástroja, dostatočnou produktivitou, reprodukovateľnosťou, stabilitou a pomerne nízkymi výrobnými nákladmi. Drsnosť jemne osústruženého povrchu dosahuje veľmi malé hodnoty ($R_a = 0,1 \div 0,8 \mu m$), povrch je rovnomerný a býva až zrkadlovo lesklý. Jemným sústružením dosiahneme aj vysokú presnosť rozmerov pri dodržaní geometrického tvaru (ovalita,

hranatosť, kužeľovitosť, súosovosť, kolmosť a pod.), pričom sa dosahuje presnosť 6 až 7 triedy podľa ISO (IT 6 - 7).

2.3 Ultrapresné sústruženie

Pre potreby najmä optického priemyslu sa vyvinuli spôsoby sústruženia veľmi presných súčiastok s hladkým (priam zrkadlovolesklým) povrchom. Takéto sústruženie sa zvykne nazývať ultrapresné. Hĺbky rezu a posuvy sa pohybujú v podmikronovej oblasti (v oblasti nanometra). Strojom je tzv. ultrapresný sústruh s veľkými nárokmi na čistotu prostredia, teplotnú stálosť (temer na hraniciach možností terajších klimatizačných zariadení), je veľmi tuhej konštrukcie, zamedzujúcej chvenie. Nástrojom bývajú diamantové nože alebo z kubického nitridu bóru s geometriou vyplývajúcou z požiadaviek tvaru obrábaných plôch. Obrobky musia spĺňať požiadavku, aby ich kryštalická stavba umožnila získať extrémne nízku drsnosť (Al, Ni, Au, Pt, Cu, Mo, mosadz, Si a i.).

2.4 Jemné vyvrtávanie

Vyvrtávací nôž (osadzovaný do vyvrtávacej tyče) nahradzuje výhrubník a výstružník. Prednosťou vyvrtávacieho noža sú menšie náklady a možnosť jeho použitia na opracovanie väčšieho rozsahu otvorov s rozličnými priermi. Preto sa vyvrtávanie miesto vyhrubovania a vystružovania používa tam, kde by sa veľký počet výhrubníkov a výstružníkov zabezpečoval nehospodárne. Na vyvrtávanie nožom potrebujeme však skúseného pracovníka, pretože presnosť rozmerov nie je daná nástrojom, ale závisí od nastavenia noža, obrobku i presného merania vyvrtaného otvoru.

Jemné vyvrtávanie sa používa na obrábanie predbežne opracovaných (vyvrtaných) otvorov presnosti IT 7 ÷ 6 a kde sa požaduje drsnosť obrobenej plochy menšia ako $R_a = 0,8 \mu\text{m}$. Prídavky na obrábanie sa volia malé (max 0,3 ÷ 0,6 mm na priemer), odoberajú sa na 2 ÷ 4 zábery s malou hĺbkou rezu 0,1 ÷ 0,5 mm a s malým posuvom 0,02 ÷ 0,12 mm. Pracuje sa

reznými rýchlosťami vyššími (bežne 250 - 350 m/min). V praxi možno jemným vyvrtávaním dosiahnuť presnosť IT 4 až 5 a drsnosť povrchu $R_a = 0,1 - 0,7 \mu\text{m}$. Výnimočne pri použití nástroja z diamantu možno dosiahnuť drsnosť až $R_a = 0,025 \mu\text{m}$. Hospodárne dosiahnutá presnosť rozmerov je v medziach $5 \div 8 \mu\text{m}$, ovalita $3 \div 5 \mu\text{m}$, kolmost' čela na os otvoru $10 \div 30 \mu\text{m}$ na 100 mm dĺžky, osové vzdialenosti $5 \div 20 \mu\text{m}$.

Geometria rezného klina vyvrtávacieho noža sa volí tak, že γ° býva $5 \div 20^\circ$, α° býva $5 \div 15^\circ$, κ_r býva $60 \div 90^\circ$, menšie uhly sa neodporúčajú, lebo nimi sa zväčšuje radiálna zložka reznej sily, ktorá zvyšuje priehyb tyče a spôsobuje chvenie, čím sa zhorší drsnosť a presnosť otvoru. Často sa vybrusujú i tvarovače triesok a podbrusujú chrbtové plochy. Vyvrtávať možno na sústruhoch, vrtačkách, vyvrtávačkách, jed nouúčelových a špeciálnych strojoch s požiadavkami obdobnými ako u jemného sústruženia.

2.5 Vystružovanie

S vystružovaním sme sa už zoznámili postačujúco v predmete Technológia obrábania. Preto spomenieme len jednu špecialitu, a to vystružovanie výstružníkom s jedným rezným klinom. Tento sa zvyčajne konštruje ako nastaviteľný pomocou nastavovacích skrutiek. Vyrábajú sa na otvory priemeru 10 - 80 mm. Nastavovacie skrutky pôsobia proti smeru vtlačania reznej platničky obrobkom do hlavy nástroja, alebo sú na tento smer kolmé. Reznú platničku udržiavajú v správnej polohe dve alebo tri tvrdokovové vodiace lišty. Výstružníky s jedným rezným klinom majú prídavok až 0,8 mm (bežné výstružníky 0,1 až 0,4 mm v závislosti od priemeru otvoru). Rezná rýchlosť býva $3 \div 30 \text{ m/min}$. Posuv $0,15 \div 2 \text{ mm}$. Všetko podľa druhu obrábaného i rezného materiálu. Výstružníkom s jednou reznou hranou sa získa drsnosť $R_a = 0,15 \div 0,2 \mu\text{m}$ (u normalizovaných výstružníkov $R_a = 0,4$ až $0,8 \mu\text{m}$) a dá sa dosiahnuť presnosť IT 5 \div 6 (bežne u vystružovania býva IT 7 \div 8). Pri požiadavke vysokej akosti povrchu musíme pri vystružovaní zabezpečiť dokonalú filtráciu a čistotu reznej kvapaliny, pretože prípadné drobné častice by sa mohli dostať na vodiacu časť a značne tak poškrabať opracovaný povrch. Ako rezné kvapaliny možno používať rôzne emulzie a tiež oleje. Petrolej pre svoju biologickú závadnosť už nie je vhodný.

3. Jemné frézovanie, zaškrabávanie, používané parametre, dosahované výsledky.

3.1 Základné pojmy podľa ISO 3002-1

Pozri kapitolu 2.1

3.2 Jemné frézovanie

Jemným frézovaním sa získavajú povrchy (rovinné plochy, drážky, osadenia a i.) vyhovujúce vysokým nárokom na presnosť tvaru a akosť povrchu. Preto vytvárame také podmienky, aby sme plochu obrábali podľa možností len jedným rezným klinom pri maximálnej reznej rýchlosti, minimálnom posuve a pomerne malej hĺbke rezu. Podmienkou jednoklinového nástroja splníme použitím frézovacej hlavy, do ktorej upneme len jeden nôž alebo jednu reznú platničku. Mnohoklinové frézovacie hlavy sú výkonnejšie, ale neposkytujú taký kvalitný povrch ako hlava s jedným nožom. Okrem toho sú viacklinové hlavy náročné na nastavenie nožov alebo platničiek a na ich údržbu. Jemné frézovanie si vyžaduje rovnomerný chod stroja i nástroja. Preto treba eliminovať nepriaznivý vplyv nárazov, spôsobených prerušovaným záberom rezných klinov. Preto na pracovné vreteno frézovačky je vhodné umiestniť zotrvačnik, ktorého najvýhodnejšia poloha je v blízkosti nástroja. Pri nízkych otáčkach vretena (do 50 min^{-1}) je však účinnosť zotrvačnikov malá.

Najčastejšie spôsoby jemného frézovania pomocou frézovacích hláv s platničkami zo SK sú nasledovné:

- a) s väčším počtom (30 až 60) kusov jemnorezných nožov
- b) s jedným širokým jemnorezným nožom
- c) s malým počtom (2 až 5) kusov širokých jemnorezných nožov
- d) s väčším počtom (20 až 30) kusov jemnorezných nožov umiestnených na obvode hlavy a súčasne s malým počtom (tak 2) širokých jemnorezných nožov upevnených na čele frézovacej hlavy

e) s väčším počtom (20 až 30) kusov jemnorezných nožov umiestnených na obvode hlavy a súčasne s jedným širokým jemnorezným nožom upevnenom na čele frézovacej hlavy

Hĺbka rezu ad a) je 0,3 až 1 mm, hĺbka rezu ad b) je 0,05 až 0,2 mm. Posuv na zub ad a) je 0,3 až 0,5 mm/zub a posuv na zub ad b) je 0,5 až 6 mm. Hrubovacie nože ad d) majú posuv 0,1 až 0,3 mm/zub a hladiace nože 2 až 5 mm/zub. Doporučená rezná rýchlosť 130 - 200 m/min (u kvalitnejších nových rez. materiáloch a nástrojoch i viac). Uhol čela môže byť i malý záporný (-6°) až menší kladný (18°). Uhol chrbta býva v bežných hodnotách ($3 - 12^\circ$). Pri obrábaní pevnejších ocelí i liatiny rezná rýchlosť podstatne poklesne (asi 50 %), posuv poklesne len mierne u ocelí a u liatin mierne stúpa. Kvalita povrchu pri jemnom frézovaní závisí od tuhosti stroja, ďalej od obrábaného materiálu, geometrie nástroja, rezného materiálu a rezných pomerov frézovania. Kvalitné povrchy zhotovujeme pri vyšších rezných rýchlostiach, malých hĺbkach rezu a malých posuvoch. Stredná aritmetická odchýlka drsnosti R_a pri jemnom frézovaní sa pohybuje v hodnotách $R_a = 0,4$ až $1,6 \mu\text{m}$. Presnosť geometrického tvaru je 0,01 až 0,04 mm. Jemným frézovaním môžeme zhotoviť súčiastky (príslušné plochy) v stupňoch presnosti IT 7 až IT 8. Trvanlivosť nástrojov býva počítaná vyššia (od 30 min hore). Liatinu a neželezné kovy obyčajne frézujeme za sucha. Pri ostatných materiáloch môžeme použiť $4 \div 5$ % emulziu alebo špeciálne kvapaliny ponúkané petrolejárskymi spoločnosťami. Rezná kvapalina zlepšuje akosť i presnosť a zvyšuje trvanlivosť nástrojov.

Dobrý priebeh rezného procesu sa získava aj vyklonením osi frézy (frézovacej hlavy) v smere posuvu. Požaduje sa tak 0,1 mm/m. Pri tomto vyklonení vznikajú na obrobenom povrchu malé prehnutia, ktoré však vyváži vysoká akosť povrchu a dobrý priebeh rezného procesu.

Napokon uvedieme odporúčané rezné pomery pri frézovaní jedným nožom.

Odporúčaná rezná rýchlosť je $v = 120$ až 240 m/min . Odporúčaná hĺbka rezu 0,03 až 0,1 mm. Odporúčaná posuv 1,5 až 2,5 mm. Tým by sme pojednanie o jemnom frézovaní ukončili.

3.3 Zaškrabávanie

Zaškrabávanie je občas ešte používané ako dokončovacie ručné obrábanie. Jeho význam klesá, lebo je vytláčané strojovými spôsobmi obrábania (najmä niektorými spôsobmi brúsenia). Zaškrabávaním sa postupne odstraňujú vyvýšeniny a nerovnosti obrábanej plochy hlavne na vodiacich plochách obrábacích strojov, upínačov, meradiel a podobne.

Zaškrabávanie je zdĺhavé a drahé. Nástroje na zaškrabávanie sú ploché, lyžicové, zahnuté alebo trojhranové škrabáky. Ich rezné hrany sa jemne brúsia a lapujú. Nerovnosti pred zaškrabávaním a po ňom zisťujeme primeriavacími platňami alebo hranolmi, ktoré majú presne obrobené plochy. Tieto plochy primeriavacieho náradia natrieme tenkou vrstvou farbiva (berlínska modrá) rozptýleného v oleji, priložíme na zaškrabávanú plochu a jemným brúsivým pohybom nafarbíme vyvýšené plôšky. Zafarbené miesta postupne škrabákom odstránime. Toto opakujeme dovtedy, kým nedosiahneme požadovanú akosť plochy (pre drsnosť Ra 0,2 až 0,4 μm - trieda 1 - sa počíta 24 až 32 dotykových plošiek na 1 cm^2). Po každom zafarbení meníme smer škrabania. Tým dostaneme charakteristický vzhľad zaškrabávanej plochy. Na akosť 1. triedy (24 - 32 plošiek) sa zaškrabávajú plochy meracích prístrojov, na akosť 2. triedy (Ra 0,4 - 0,6 μm ; 14 ÷ 22 plošiek;) kontrolné náradie, na akosť 3. triedy (Ra 0,6 - 0,8 μm ; 9 ÷ 12 plošiek) plochy vedení obrábacích strojov. Pri ploche zaškrabanej na 25 stykových plošiek nie sú odchýlky od ideálnej roviny väčšie než 0,003 mm.

4. Bežné brúsenie a jemné brúsenie, používané parametre a dosahované výsledky

4.1 Všeobecné definície a označenia podľa ISO 3002-5

- Termínom stôl sa označuje pohyblivá časť brúsiaceho stroja vzhľadom na základ brúsiaceho stroja. Na stôl brúsky sa upevňuje obrobok alebo brúsiaci vretenník. Pri brúsení do okrúhla sa obrobok otáča rovnomerne okolo vlastnej osi. Okrem hlavného pohybu ostatné pohyby vykonáva stôl.
- Priemer brúsiaceho kotúča a obrobku: d_s , d_w .
- Dĺžka obvodu brúsiaceho kotúča a obrobku: πd_s , πd_w .
- Šírka brúsiaceho kotúča meraná rovnobežne s osou kotúča: b_s .
- Plochy na brúsiacom kotúči:
 - geometrická plocha brúsiaceho kotúča: časť povrchu brúsiaceho kotúča upravená na odoberanie materiálu
 - aktívna plocha brúsiaceho kotúča je časť geometrickej plochy brúsiaceho kotúča efektívne ubierajúca materiál počas obrábania.
- Tvar brúsiacich kotúčov:
 - geometrický tvar brúsiaceho kotúča: krivka vytvorená priesečníkom geometrickej plochy brúsiaceho kotúča a roviny obsahujúcej os rotácie brúsiaceho kotúča
 - aktívna časť brúsiaceho kotúča: krivka vytvorená priesečníkom aktívnej plochy brúsiaceho kotúča a roviny obsahujúcej os rotácie brúsiaceho kotúča
- Rozmery aktívnej časti brúsiaceho kotúča:
 - Dĺžka aktívnej časti brúsiaceho kotúča l_D je dĺžka krivky aktívnej časti brúsiaceho kotúča. Pri zapichovacom brúsení s tvarovým brúsiacim kotúčom s viacerými aktívnymi časťami je dĺžka krivky aktívnej časti brúsiaceho kotúča daná súčtom dĺžok kriviek všetkých aktívnych častí brúsiaceho kotúča.

- Šírka aktívnej časti brúsiaceho kotúča b_D je dĺžka kolmej projekcie aktívnej časti brúsiaceho kotúča po os rotácie brúsiaceho kotúča. Daná je pri brúsení obvodom brúsiaceho kotúča.
- Hlavný bod pri brúsení D je bod aktívnej časti brúsiaceho kotúča na stanovenie súradnicového systému: definované sú v ňom základné veličiny, zložky síl a rýchlosti. Hlavný bod má byť umiestnený v rovine obsahujúcej os rotácie kotúča kolme na smer hlavného posuvu. Hlavný bod delí aktívnu časť brúsiaceho kotúča na dve rovnaké časti:
- Pohyby a rýchlosti pri brúsení

Všetky pohyby a rýchlosti sa určujú v istom čase vo zvolenom bode aktívnej časti brúsiaceho kotúča, obyčajne v hlavnom bode D. Ak sa za hlavný bod zvolí iný bod, je potrebná presná špecifikácia.
- Hlavný rezný pohyb a príslušné veličiny:
 - Hlavný rezný pohyb je otáčavý pohyb brúsiaceho kotúča.
 - Rezná rýchlosť v_c : je tangenciálna rýchlosť brúsiaceho kotúča v bode zvolenom na ploche styku meraná vo vzťahu k držiaku brúsiaceho kotúča (odporúčaná jednotka m/s).
 - Obvodová rýchlosť brúsiaceho kotúča v_s : je tangenciálna rýchlosť na obvode brúsiaceho kotúča meraná na jeho najväčšom priemere vo vzťahu k držiaku brúsiaceho kotúča (odporúčaná jednotka m/s).
 - Frekvencia otáčania brúsiaceho kotúča n_s : je počet otáčok brúsiaceho kotúča za jednotku času meraný vo vzťahu k držiaku brúsiaceho kotúča (odporúčaná jednotka s^{-1}).
- Posuv a príslušné veličiny:
 - Posuv je pohyb, ktorý spolu s hlavným pohybom umožňuje odrezávanie triesky. Zložky posuvu sú plynulé alebo prerušované (na jeden zdvih, úber alebo otáčku), dané sú otáčaním obrobku vo vzťahu k stolu alebo pohybom stola vo vzťahu k základu obrábacieho stroja.
 - Hlavný posuv je plynulý posuvný pohyb s najväčšou posuvnou rýchlosťou pri brúsnych operáciách. Pri niektorých brúsnych operáciách sa môže smer hlavného posuvu meniť, vtedy je potrebná špecifikácia.
 - Otáčavý pohyb obrobku; (kruhový posuv obrobku) otáčavý pohyb obrobku je rotácia obrobku okolo svojej osi vo vzťahu k stolu pri brúsení do okrúhla.
 - Obvodová rýchlosť obrobku v_w je okamžitá rýchlosť obvodovej časti obrobku v zvolenom bode vo vzťahu k stolu (odporúčaná jednotka mm/s).

- Frekvencia otáčania obrobku n_w pri brúsení do okrúhla je počet otáčok obrobku za jednotku času vo vzťahu k stolu (odporúčaná jednotka s^{-1}).
- Pohyb stola a príslušné veličiny:
 - Posuv stola je pohyb súčasti obrábacieho stroja, na ktorý je upevnený obrobok alebo brúsiaci vretenník, vo vzťahu k jeho základu. Posuv stroja je priamočiary alebo otáčavý. Priamočiary posuv stola je podľa orientácie na brúsiaci kotúč axiálny, radiálny a tangenciálny.
 - Axiálny posuv stola je pohyb stola v zvolenom bode v smere rovnobežnom s osou brúsiaceho kotúča.
 - Axiálna rýchlosť posuvu stola v_{fa} je rýchlosť axiálneho posuvu stola vo vzťahu k základu obrábacieho stroja (odporúčaná jednotka mm/s alebo $\mu m/s$).
 - Axiálny posuv stola f_a je premiestnenie stola vo vzťahu k základu obrábacieho stroja axiálnym posuvným pohybom merané za otáčku obrobku alebo za jeden zdvih. Pri brúsení do okrúhla je odporúčaná jednotka mm/ot obrobku alebo $\mu m/ot$. Pri rovinnom brúsení môže byť axiálny posuvný pohyb prerušovaný, uskutočňovaný na konci každého zdvihu. Vtedy ide o axiálny posuv na zdvih alebo axiálny prírastok posuvu stola na zdvih (odporúčaná jednotka mm/zdvih alebo $\mu m/zdvih$).
 - Radiálny posuvný pohyb je pohyb stola vo zvolenom bode v smere kolmom na os brúsiaceho kotúča. Radiálna rýchlosť posuvu stola v_{fr} je rýchlosť radiálneho posuvného pohybu vo vzťahu k základu obrábacieho stroja (odporúčaná jednotka mm/s).
 - Radiálny posuv stola f_r je premiestnenie stola vo vzťahu k základu obrábacieho stroja radiálnym posuvovým pohybom merané za otáčku obrobku alebo zdvihu, úberu. Pri brúsení do okrúhla je odporúčaná jednotka mm/ot alebo $\mu m/ot$. Pri rovinnom brúsení je radiálny posuvný pohyb prerušovaný, uskutočňuje sa odoberaním ďalšej vrstvy materiálu. Vtedy ide o prírastok radiálneho prísuvu (odporúčaná jednotka mm/úber alebo $\mu m/úber$).
 - Tangenciálny posuvný pohyb stola - je smer pohybu stola rovnobežný s vektorom hlavného rezného pohybu brúsiaceho kotúča v bode D.
 - Tangenciálna rýchlosť posuvu stola v_{ft} je rýchlosť tangenciálneho posuvného pohybu vo vzťahu k základu obrábacieho stroja.
 - Tangenciálny posuv stola f_t je premiestnenie stola vo vzťahu k základu obrábacieho stroja tangenciálnym pohybom stola merané za otáčku obrobku alebo zdvihu. Pri brúsení do okrúhla je odporúčaná jednotka mm/ot alebo $\mu m/ot$.

- Otáčavý posuvný pohyb stola je pohyb stola okolo svojej osi.
- Frekvencia otáčania stola n_m je počet otáčok stola za jednotku času vo vzťahu k základu obrábacieho stroja (odporúčaná jednotka s^{-1}).
- Hlavný posuvný pohyb stola - zložka plynulého pohybu stola s najväčšou rýchlosťou vo zvolenom bode.
- Prírastok posuvu je prerušované premiestnenie brúsiaceho kotúča kolmo na obrobený povrch na odstránenie ďalšej vrstvy materiálu po celej obrobenej ploche (odporúčaná jednotka mm/zdvih alebo $\mu m/zdvih$).
- Pomer rýchlosti q je pomer medzi reznou rýchlosťou s rýchlosťou posuvu vo vzťahu k základu obrábacieho stroja meraný v smere tangenty vo zvolenom bode:

Pri brúsení do okrúhla:

$$q = \frac{v_c}{v_w}$$

Pri rovinnom brúsení:

$$q = \frac{v_c}{v_f}$$

- **Názvoslovie bežných brúsnych operácií**

Základné operácie brúsenia sú definované podľa týchto kritérií:

- typ obrobeného povrchu,
- aktívna časť brúsiacich kotúčov,
- vzájomný vzťah obrobku a brúsiaceho kotúča,
- smer hlavného posuvného pohybu obrobku vo vzťahu k brúsiacemu kotúču,
- vzájomný vzťah tangenciálnych rýchlostí brúsiacich kotúčov a obrobkov v zvolenom bode,
- špeciálne vlastnosti

- Tvar obrobeného povrchu a metódy jeho vytvárania:
 - rovinné brúsenie - je brúsenie, ktorého výsledkom je rovinná plocha,
 - brúsenie do okrúhla - je brúsenie, ktorého výsledkom je rotačný povrch,
 - brúsenie na otočnom stole - je brúsenie s rotačným posuvom,
 - tvarovacie brúsenie - je označenie brúsnych operácií, ktorých výsledkom nie je ani plochý, ani valcový povrch, napríklad brúsenie závitov, ozubených kolies atď.,
 - kopírovacie brúsenie - je tvarové brúsenie, pri ktorom sa obrobok tvaruje kontrolovanou zmenou posuvu (kopírovanie, NC stroje, atď),
 - brúsenie tvarovacími brúsiacimi kotúčmi - je operácia, pri ktorej profil brúsiaceho kotúča určuje konečný profil obrobku.

- Aktívna časť brúsiacich kotúčov:
 - obvodové brúsenie - je brúsenie obvodom brúsiaceho kotúča.
 - čelné brúsenie - je brúsenie čelom brúsiaceho kotúča kolmým alebo šikmým na os kotúča.

- Vzájomná poloha brúsiaceho kotúča a obrobku:
 - vonkajšie brúsenie - je brúsenie vonkajšieho povrchu obrobku.
 - vnútorné brúsenie - je brúsenie vnútorného povrchu obrobku.

- Hlavný pohyb posuvu stola vo vzťahu k brúsiacemu kotúču:
 - axiálne brúsenie - je brúsenie s hlavným posuvom stola rovnobežným s osou kotúča.
 - tangenciálne brúsenie - je brúsenie s hlavným posuvom stola rovnobežným s vektorom obvodovej rýchlosti brúsiaceho kotúča v zvolenom bode D
 - radiálne brúsenie - je brúsenie s hlavným posuvom stola v zvolenom bode D orientovanom radiálne k brúsiacemu kotúču
 - zapichovacie brúsenie môže byť - obvodové zapichovacie brúsenie s plynulým radiálnym posuvom stola a čelné zapichovacie brúsenie s plynulým axiálnym posuvom stola.

- Vzájomný vzťah orientácie rýchlosti brúsiaceho kotúča a obrobku v zvolenom hlavnom bode D:
 - protibežné brúsenie je brúsenie s opačným smerom tangenciálneho pohybu brúsiaceho kotúča v zvolenom bode vo vzťahu k základu obrábacieho stroja
 - súbežné brúsenie je brúsenie s rovnakým smerom tangenciálneho pohybu brúsiaceho kotúča a obrobku vo vzťahu k základu obrábacieho stroja v zvolenom bode D

- **Doplňkové názvoslovie:**

- vratné brúsenie je brúsenie s prírastkom posuvu stola na obidvoch koncoch zdvihu.
- striedavé brúsenie je brúsenie s jednostranným prírastkom posuvu stola
- rezanie brúsiacim kotúčom je obvodové brúsenie na delenie materiálu
- zapichovacie brúsenie je obvodové brúsenie s relatívne malou rýchlosťou posuvu a veľkou stykovou plochou
- šikmé brúsenie je rovinné brúsenie alebo brúsenie do okrúhla s osou brúsiaceho kotúča, ktorá nie je rovnobežná s osou obrobku alebo povrchu obrobku, ani kolmá na ňu.

Šikmé brúsenie môže byť zapichovacie alebo tangenciálne.

Koeficient brúsenie G je pomer objemu materiálu odobratého z obrobku a objemového opotrebenia brúsiaceho kotúča za istú časovú jednotku

$$G = \frac{V_w}{V_s}$$

4.2 Základné údaje o brúsení

Brúsenie je najrozšírenejší spôsob dokončovacieho obrábania kovov. Brúsne zrná sú z technologického hľadiska malé rezné klíny, rozložené nepravidelne s rozličným prevýšením po obvode i čele brúsiaceho kotúča. Ich veľkosť pri jemnom brúsení sa pohybuje od 60 do 300 μm . Zásadný rozdiel medzi brúsením a frézovaním okrem iných odlišností je vo veľkosti prierezu odoberanej vrstvy a neurčitej geometrii rezných klinov prevažne so záporným uhlom čela. Prierez triesky pri brúsení kolíše v rozmedzí 0,0001 ÷ 0,0002 mm^2 . Stredná hrúbka triesky s kotúčom s veľkosťou zrna 300 μm je 0,6 až 10 μm .

Rezná rýchlosť je prakticky obvodová rýchlosť brúsiaceho kotúča, táto rýchlosť je oproti doteraz rozoberaným spôsobom jemného obrábania 20 až 60 krát vyššia, a preto je prierez triesky odrezávaný jedným brúsnym zrnom veľmi malý. Veľká rezná rýchlosť do určitej miery eliminuje aj nepriaznivý vplyv veľmi záporného uhla čela (veľmi veľkého uhla rezu). Rezná rýchlosť býva 25 - 35 m/s u bežného (i jemného) brúsenia. Obvodová rýchlosť obrobku (kruhový posuv) býva 60 až 200 krát menšia ako rýchlosť kotúča (u jemného brúsenia je to

polovica z bežného brúsenia) a obyčajne má opačný zmysel a udávame ju v m/min. Bežne 20 - 40 m/min. u jemného brúsenia 10 - 20 m/min. Veľká tvrdosť brúsnych zŕn a veľké rezné rýchlosti umožňujú brúsiť všetky známe kovové i nekovové materiály. Brúsenie je jediným hospodárnym spôsobom obrábania kalených ocelí. Možno ním dosiahnuť pomerne ľahko kvalitný povrch a vysokú geometrickú presnosť tvaru i rozmeru. V dôsledku vysokých rezných rýchlostí a negatívnych uhlov čela vyvíja sa v mieste rezu veľa tepla a odrezávané triesky sa ohrievajú na vysoké teploty 800 až 1200 °C. Časť vyvinutého tepla prechádza do povrchovej vrstvy obrobenej plochy a zohrieva ju. Obrobený povrch sa preto do určitej hĺbky rozruší a na kalených súčiastkach môžu vznikať jemné trhlinky. Tepelným ovplyvnením vznikajú na povrchu súčiastky pomerne značné napätia (500 - 2000 MPa). Pri brúsení ide do obrobku okolo 75 % vyvinutého tepla, čo je veľká nevýhoda.

4.3 Brúsne nástroje

Brúsny nástroj je teleso pozostávajúce z brusiva (t.j. brúsnych zŕn), spojiva a pórov. Do pórov pri brúsení vnikajú častice z brúseného kovu (mikrotriesky). Niekedy ako brúsny nástroj pôsobí dvojica prítlačný kotúč (napr. liatinový) a voľný brúsny prášok (tiež býva brúsna suspenzia alebo brúsna pasta). Brúsne zrná pôsobia ako rezné klíny, ich počet je neurčitý (má však isté medze), preto takýmto nástrojom vravíme tiež mnohoklinové nástroje. Taktiež geometria rezných zŕn je náhodná a preto takýmto nástrojom vravíme tiež nástroje s nedefinovanou geometriou.

Nástroje na brúsenie rozdeľujeme na:

- brúsiace i rezacie kotúče a brúsne segmenty (hranolovitého tvaru, možno nimi vyložiť tzv. brúsnu hlavu - používa sa pri vertikálnom rovinnom brúsení).

Ďalej sa budeme zaoberať brúsiacimi kotúčmi. Brúsiaci kotúč je charakterizovaný svojím tvarom, ktorý je opísaný charakteristickými rozmermi, medzi ne patrí: vonkajší priemer brúsiaceho kotúča, šírka brúsiaceho kotúča, priemer upínacieho otvoru i s príslušnými vybrániami a pod. Ďalej je brúsiaci kotúč charakterizovaný druhom brúsnych zŕn, ich zrnitosťou (veľkosťou zŕn) tvrdosťou brúsiaceho kotúča, štruktúrou (čiže pórovitosťou či veľkosťou pórov) a spojivom. K zrnitosti ešte pripomeňme, že je to podľa medzinárodného

označovania (FEPA F) číslo, udávajúce počet ôk na dĺžku anglického palca na triediacom site, cez ktoré už také veľké zrno neprepadne.

Treba rozoznávať medzi tvrdosťou brúsneho zrna a tvrdosťou brúsneho nástroja. Tvrdosť brúsneho zrna je odolnosť proti vnikaniu cudzieho telesa (skúšobného hrotu) do brúsneho zrna. Tvrdosť brúsiaceho kotúča je odolnosť proti vylúpeniu brúsneho zrna z väzby (spojiva) brúsiaceho kotúča. Táto hodnota sa pri brúsnych nástrojoch uvádza. Zisťuje sa špeciálnymi prístrojmi vytryskaním presne stanoveného množstva brúsnych zrníek (daného druhu) pomocou stlačeného vzduchu na zisťovaný brúsiaci kotúč. Na zisťovanom brúsiacom kotúči tak dostaneme jamku, zmeriame jej hĺbku a tejto hĺbke pomocou špeciálnych tabuliek prisúdime písmeno (hlbším jamkám na začiatku abecedy, plytším jamkám z konca abecedy). Štruktúra (pórovitosť) sa zisťuje presávaním vzduchu cez zisťovaný brúsiaci kotúč v osobitnom prístroji. Zisťuje sa čas prestupu vzduchu a podľa neho sa kotúč zatriedi do 16. stupňov (16. stupeň je najpórovitejší). Ešte k druhu brusiva treba poznamenať, že tam písmeno znamená druh brusiva (napr. A znamená tavený oxid hlinitý) a číslo za písmenom znamená koncentráciu toho brusiva (A 99 znamená 99 % taveného oxidu hlinitého a 1 % nečistôt). Ďalej A 98 M znamená legovanie s Mn, A98T legovanie s titanom, A97Z legovanie zirkónom, A97P znamená polotrieštivý korund, čiže zrná majú schopnosť pri zvýšení rezných síl vplyvom ich otupenia sa nevylamovať celé z väzby, ale trieštiť sa a získavať nové ostré hrany a ostať ešte ďalej vo väzbe a môcť ďalej pracovať. Ďalej A97M je hnedý korund veľmi jemnej štruktúry získaný po odliatí rýchlym ochladením. Pri karbide kremíka SiC znamená C 49 to, že je 99 % SiC a 1 % nečistôt (predposledné číslo je namiesto deviatky štvorka, aby nevznikol omyl s koncentráciou pri Al_2O_3). Brúsne nástroje, ktoré majú spojivo z umelých živíc (B), majú schopnosť tzv. samoostrenia vo veľmi širokom pásme pracovných podmienok. Samoostrenie znamená, že brúsne zrná sa samočinne vylamujú z väzby brúsneho nástroja (pri jeho práci), čím sa dostávajú z činnosti nižšie položené brúsne zrná. Takýto brúsny nástroj nestráca reznú schopnosť, i keď sa opotrebuje (zmenšujú sa jeho vonkajšie rozmery). Bežné brúsne nástroje (napr. s keramickým spojivom - V) otupovaním rezných zrn strácajú zvyčajne reznú schopnosť, ktorú treba obnoviť. Zatupenú vrstvu brúsnych zrn treba z brúsneho nástroja odstrániť, čiže brúsiaci kotúč orovnať. Orovnávať možno rôznymi typmi orovnávačov (obťahovacie kamene, liatinové klady), ale najkvalitnejšie je orovnávanie s diamantovými orovnávačmi jednokameňovými (s jedným diamantom upevneným v držiaku) viackameňovými

alebo rôznymi tvarmi mnohokameňových orovnávačov používajúcich diamantové úlomky a prípadne i prach (prachové orovnávače).

Aj samoostriace brúsiace kotúče treba niekedy orovnávať, čo ale nie je kvôli obnovovaniu reznej schopnosti, ale kvôli obnovovaniu tvaru (profilu), napríklad pri zápchovom brúsení, keď je dôležitý presný tvar profilu brúsiaceho kotúča. Brúsiace kotúče so spojivom z umelých živíc majú oproti iným brúsiacim kotúčom široké pásmo podmienok, kedy môžu pracovať režimom samoostrenia, majú však nevýhodu, že si zle uchovávajú profil (vplyvom samoostrenia sa akosi deformuje). Aj brúsiace kotúče, ktorých póry sú zanesené mikrotrieskami, treba orovnať. Na zvýšenie životnosti brúsiacich kotúčov s keramickým spojivom sa niekedy používa ich impregnácia sírou (u spojiva „B“ grafitom). Spojivo sa nasýti sírou, čo má efekt stvrdnutia väzby i efekt mazania, a to má blahodarný vplyv na zníženie opotrebovania brúsiaceho kotúča.

Označovanie brúsiacich kotúčov

Tabuľka č. 1

Druh brusiva	Zrnitosť	Tvrdosť	Štruktúra	Spojivo
Tavený oxid hlinitý biely A99B	veľmi hrubá 8 - 12	veľmi mäkkáE - G	veľmi hutná 1 - 2	keramické V
Tavený oxid hlinitý farbený (červený) A99	hrubá 14 - 24	mäkká H - K	hutná 3 - 4	umelé živice B
Tavený oxid hlinitý ružový A98	stredná	stredná	polohutná	silikátové S
Tavený oxid hlinitý legovaný mangánom A98 M	30 - 60 jemná	L - O tvrdá	5 - 6 pórovitá	magnezitové O
titánom A98 T	70 - 120	P - S	7 - 8	šelakové E
zirkónom A98 Z	veľmi jemná	veľmi tvrdá	veľmi	gumové R
Tavený oxid hlinitý polotrieštivý A97 P	150 - 240 zvlášť jemná	T - W ' zvlášť tvrdá	pórovitá 9 - 12	
Tavený oxid hlinitý hnedý A96	260 - 600	X - Z	zvlášť	
Karbid kremíka zelený C49			pórovitá	
Karbid kremíka sivý C48			13 - 16	
Karbid kremíka čierny C47				

Príklad označenia: A99 60 K 9 V

Ako brusivo sa používajú i ďalšie, najmä syntetické supertvrde materiály, ako je umelý diamant a kubický nitríd bóru a ako voľné brusivo i karbid bóru.

Prírodné diamanty vznikli v zemskej kôre pri vysokých tlakoch a teplotách zmenou hexagonálnej kryštálovej mriežky uhlíka na kubickú. Prírodné diamanty sa triedia do 5 akostných skupín. Prvé dve skupiny sa používajú v šperkárstve na výrobu (brúsenie) briliantov, tretia skupina sú kvalitné diamanty technického použitia, štvrtá skupina sú menejkvalitné diamanty (s rôznymi drobnými nečistotami) technického použitia a piata skupina sú diamantové úlomky (bort) a prach tiež použiteľné v technike. Diamanty bývajú číre alebo nečistotami sfarbené až do čiernej. Veľkosť diamantov sa hodnotí karátmi (1 ct 0,2 g). Má nasledovné vlastnosti: merná hmotnosť $3,48 \div 3,56 \text{ g/cm}^3$, mikrotvrdosť $100 \div 600 \text{ MPa}$ (v rôznych kryštalografických rovinách sa mení, má tzv. vektorovú tvrdosť), modul pružnosti $7,09 \div 9,11 \cdot 10^5 \text{ MPa}$, pevnosť v ohybe cca 294 MPa, súčiniteľ tepelnej vodivosti $2000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, súčiniteľ teplotnej rozťažnosti $0,9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Diamant má mikrotvrdosť asi 3x väčšiu ako karbid bóru, asi 3,5 x väčšiu ako SiC a asi 4x väčšiu ako kvalitný tavený Al_2O_3 a asi 5x väčšiu ako bežný Al_2O_3 . Použitie prírodných diamantov postupne klesá a je nahrádzané diamantami syntetickými.

Syntetické diamanty (monokryštály) sa vyrábajú z grafitu niekoľkými spôsobmi. Najrozšírenejší spôsob je pôsobenie statického tlaku min. 6 GPa a teploty min 2000 K v trvaní minimálne niekoľko sekúnd. Sú známe aj spôsoby výroby detonáciou (až 100 GPa), veľmi krátky čas (niekoľko μs). Vzhľadom na pomerne nízke teploty oxidácie (a tým straty kubickej mriežky) už od 700 °C, nie sú vhodné na obrábanie materiálov, pri ktorých by boli vystavené vysokému tepelnému namáhaniu.

Syntetické diamanty sa vyrábajú ako syntetický diamantový prášok preosievavý (DSP) určený pre hrubovacie a dokončovacie operácie brúsnymi nástrojmi s živicovým spojivom (fenolformaldehydové umelé živice). Takéto zrno musí mať ihlicovitý tvar a členitý povrch, aby sa dobre upevnilo v živicovom spojive. K tomuto účelu sa zrná diamantu povlakujú kovovým povlakom neelektrickým usadzovacím procesom (napr. za mokra Ni, za sucha Cu). Povlak tvorí 50 až 55 % hmotnosti zrna. Účelom povlaku je:

- a) zväčšenie objemu a lepšie uchytenie vo väzbe so živcou
- b) tvorba plášt'a, zabraňujúceho rozpadu diamantu
- c) pohlcovanie tepla (živičné spojivo neznáša teploty nad 230 °C)

Takéto nástroje sú vhodné na brúsenie spekaných karbidov i spojení karbid - oceľ. Majú dobrú samoostriacu schopnosť.

Polykryštalický diamant sa vyrába z monokryštálov čistých alebo v zmesi so spojivom, spekaním diamantového prášku do kompaktných telies. Niekedy sa však vyrába priamo z grafitu na polykryštalický kompakť pri tlakoch nad 9 GPa a 2000 °C, čo predurčuje rozmery vysokotlakového nástroja i jeho životnosť. Výhodou polykryštalického diamantu je jeho veľkosť, izotropnosť (nemá vektorovú tvrdosť, ale vo všetkých smeroch má tvrdosť rovnakú) a menšia náchylnosť k tvorbe trhlín. Zvláštnu časť tu tvoria syntetické diamanty so zvýšenou pevnosťou pre rezné nástroje s definovanou geometriou reznej časti.

Pracovné vlastnosti diamantových nástrojov možno hodnotiť objemovým výkonom obrábania V alebo merným obrusom G ($G = \frac{V}{O}$, kde O je opotrebenie za časovú jednotku) alebo oboma kritériami (najčastejšie, čím sa to stáva optimalizačnou úlohou).

Kubický nitrid bóru (KNB) je syntetický materiál vyrobený podobnou technológiou ako syntetické diamanty, premenou hexagonálnej mriežky nitridu bóru na mriežku kubickú. Má obvykle 56,4 % a 43,6 % B. Jeho fyzikálne vlastnosti sú riaditeľné podľa východiskových zložiek a parametrov syntézy. Mernú hmotnosť má $3,4 \div 3,5 \text{ g.cm}^{-3}$, strednú tvrdosť 9100 MPa a tepelnú stálosť 1500 - 1600 °C. Má výrazne nižšie adhézne a difúzne opotrebenie s ohľadom na železo a jeho zliatiny, čím sa hodí na ich brúsenie. Monokryštaly KNB majú oproti diamantom hladšie plochy a ostrejšie hrany. Zrná sa triešťa za vzniku nových rezných hrán pri vysokom namáhaní, čo je dôsledkom skrehnutia kryštálov KNB pri teplotách nad 900 °C. Podobne ako dia brusivo aj KNB pri použití spojiva z umelých živíc treba pokovovať (niklom). Nepokovované sa používajú v kovovom spojive. Kotúče s KNB majú asi dvojnásobný výkon oproti kotúčom z SiC, resp. Al_2O_3 , pri temer polovičnej teplote rezania a podstatne nižších rezných silách. Dobre držia tvar a sú vhodné aj na tvarové brúsenie. Používajú sa najmä na brúsenie a ostrenie nástrojov z RO, vodiacich listů obrábacích strojov, ložísk a podobne.

Kotúče z KNB vzhľadom na spôsob spracovania a získanú štruktúru sa môžu podobáť wurzitu i sfaleritu, a tak môžeme hovoriť o wurzitickom i sfaleritickom NB. Wurzifický NB sa

používa na menej náročne nástroje. Nástroje z KNB (i diamantu) sa označujú podobne ako u Al_2O_3 a SiC , ale s určitými odlišnosťami (napr. udávaním koncentrácie...) Nástroje z KNB môžu byť nielen z monokryštálov, ale i polykryštalické. Polykryštalický KNB možno získať spekaním prášku KNB pri tlaku nad 5 GPa a teplote nad 1400 °C. Touto metódou sa vyrábajú rezné doštičky pod viacerými obchodnými označeniami ako Amborite, Kompozit a i. Polykryštalický KNB môže byť vytvorený priamo z hexagonálneho nitridu bóru pri tlakoch nad 12 GPa a teplotách nad 1500 °C. Pri nižších teplotách tesne nad 1500 °C môže vzniknúť wurzifický nitrid bóru.

Okrem uvedených druhov KNB sa vyrábajú aj nástroje z KNB spevnené disperznými časticami (napr. TiC), takéto nástroje lepšie odolávajú opotrebovaniu (adhéznemu i abrazívnemu) a používajú sa nielen ako rezné nástroje, ale aj ako nástroje na orovnávanie brúsiacich kotúčov.

4.4 Výber dokončovacích operácií

Akosť súčiastok, najmä tých, ktoré sú dynamicky namáhané (hlavne veľkými rýchlosťami a veľkým zaťažením), je výraznou mierou závislá od stavu povrchu po obrobení. Tento stav povrchu je určený spevnením alebo poklesom mechanických vlastností materiálu povrchových vrstiev, zvyškovými napätiami v nich a drsnosťou. Stav povrchových vrstiev vplýva hlavne na:

- a) odolnosť proti opotrebeniu
- b) spoľahlivosť a stálosť uloženia
- c) pracovnú pevnosť súčiastok pri striedavom namáhaní
- d) odolnosť proti koróznym vplyvom
- e) únavovú pevnosť
- f) kontaktnú pevnosť

Tým sa vysvetľujú vysoké nároky na akosť povrchu a povrchových vrstiev a výber dokončovacích operácií obrábania, ktoré ju majú zabezpečiť. Vychádza sa pritom:

- a) z vyžadovaných vlastností súčiastky charakterizovaných najmä

- presnosťou rozmeru
 - presnosťou tvaru
 - drsnosťou obrobenej plochy
 - fyzikálno-mechanickými vlastnosťami povrchovej vrstvy (spevnenie, opaly, zvyškové napätia)
- b) z technologických charakteristík dokončovacích metód dovoľujúcich reprodukovateľnosť zabezpečenia vyžadovaných vlastností súčiastky
- c) z ekonomických ukazovateľov dokončovacích operácií

Výber dokončovacích operácií je dôležitý aj vtedy, ak ide nielen o dynamicky namáhané súčiastky, ale aj súčiastky pracujúce v nepriaznivom prostredí.

Brúsenie niekedy býva dokončovacou operáciou výroby súčiastok. Treba konštatovať, že brúsenie je dokončovací spôsob, ktorý je schopný zabezpečiť veľmi dobrú presnosť rozmeru, tvaru i polohy plôch, ako aj vyžadovanú akosť povrchu. Avšak termomechanický účinok nevhodne zvolených rezných podmienok na povrchové vrstvy zakalených alebo nízkopopustných oceľových súčiastok býva príčinou vzniku ťahových zvyškových napätí, ktoré znižujú únavovú pevnosť, koróziuvzdornosť i oteruvzdornosť súčiastok.

Nerovnomerná plastická deformácia i nerovnomerný ohrev a s tým spojené i fázové premeny (toto všetko prebieha súčasne) vytvárajú napät'ové polia, ktoré sa rozkladajú do väčších hĺbok spravidla presahujúcich príslušné medzioperačné prídavky. Tieto prídavky však majú byť väčšie ako hĺbka poškodennej vrstvy predchádzajúcim obrábaním (napr. hrubovacím brúsením).

4.5 Podmienky a výsledky brúsenia

Pozdĺžny posuv pri bežnom (hrubovacom) brúsení vonkajšej a vnútornej valcovej plochy (i kužeľovej) býva $0,3 \div 0,75$ šírky brúsiaceho kotúča. Dĺžka prebehu cez súčiastku má byť $1/2$ šírky brúsiaceho kotúča. Pozdĺžny posuv pri bežnom brúsení rovinných plôch býva $4 \div 12$ m/min. Rezná rýchlosť a kruhový posuv sú v tabuľke č. 2:

Rezné rýchlosti a kruhové posuvy pre rôzny charakter brúsenia

Tabuľka č.2

Operácie brúsenia	Hrubovanie	Brúsenie načisto	Jemné brúsenie	Najjemnejšie brúsenie
rezná rýchlosť v_c [m/s]	26 - 28	26 - 28	26 - 28	12 - 18
kruhový posuv v_{fk} [m/min] pre materiály				
liatina	22 - 26	18 - 22	-	-
nekalené ocele legované	20 - 22	15 - 18	10 - 12	6 - 7
Kalené ocele	20 - 22	15 - 18	10 - 12	6 - 7
Bronz mosadz	26 - 30	22 - 24	-	-
Hliník	26 - 30	22 - 24	-	-

Tabuľka platí pre vonkajšie brúsenie. Pre vnútorné brúsenie treba reznú rýchlosť o niečo znížiť (15 - 20 m/s) a kruhový posuv zvýšiť o 10 - 30 %.

Hĺbka rezu býva 0,02 mm na zdvih stola. U tuhých obrobkov sa necháva prídavok pre brúsenie načisto 0,02 - 0,05 mm. U málotuhých obrobkov sa hrubovanie rozdelí do dvoch častí. V druhej časti hrubovania sa odoberie prídavok 0,06 mm nanovo orovnaným kotúčom a pre prácu načisto sa ponechá 0,02 mm.

Pri brúsení načisto brúsiace kotúče majú mať zrnitosť 60 ÷ 100, tvrdosť J až L. Pozdĺžny posuv má byť 1/3 šírky brúsiaceho kotúča. Kotúče majú byť užšie. Hĺbka rezu nemá presiahnuť 0,005 mm. Menší úber zabezpečí väčšiu presnosť. Brúsiaci kotúč musí byť vyvážený a starostlivo orovnaný (správne treba vybrať veľkosť diamantu, má byť asi 1/3 karátu na 150 mm priemeru brúsiaceho kotúča, orovnávať zamokra).

Pri jemnom brúsení šírka brúsiacich kotúčov je taká istá ako u brúsenia načisto. Ich zrnitosť však má byť 280 až 320 (to je už zrnitosť honovacích kameňov). Posuvová rýchlosť nemá prekročiť 0,3 m/min, hĺbka rezu má byť 0,001 až 0,002, prídavok môže byť max 0,01 mm. Brúsiaci kotúč musí byť starostlivo orovnaný (za intenzívneho chladenia) s posuvovou

rýchlosťou 0,1 m/min a očistený kefou. Pri jemnom brúsení sa musí použiť filtračné zariadenie na čistenie reznej kvapaliny.

Pri najjemnejšom brúsení šírka brúsiacich kotúčov je menšia ako u jemného brúsenia, aby neboli veľké rezné sily hlavne u málotuhých obrobkov. Spojivo kotúčov býva z umelých živíc (B) alebo gumové (R). Ich zrnitosť má byť 400 až 600 (to je už zrnitosť superfinišovacích kameňov). Posuvová rýchlosť môže byť 0,5 m/min. Prídavok na najjemnejšie brúsenie býva 0,002 - 0,005 mm. Kotúče sa orovnávajú diamantovými kladkami o zrnitosti 80 - 100 pri hĺbke rezu orovnávania 0,005 - 0,01 mm. Štíhle obrobky je potrebné pri brúsení podopierať lunetou (zabránenie chveniu).

Pri bežnom (hrubovacom) brúsení dosahujeme presnosť IT 5 ÷ 10 a pri jemnom brúsení IT 3 - 4. Pri bežnom brúsení dosahujeme drsnosť Ra 0,2 ÷ 0,8 µm a pri jemnom brúsení Ra 0,025 ÷ 0,2 µm.

4.6 Vývojové smery v brúsení

Vývojové smery v oblasti brúsenia sa orientujú na prechod k vyšším rezným rýchlostiam, používaniu nových brúsnych materiálov, uplatneniu automatického riadenia (adaptívne riadenie sledovacími meradlami na drsnosť i rozmeru plochy, kinematické obohatenie procesu a i). Dôležitým výsledkom vývoja je rýchlostné brúsenie. Vyznačuje sa vysokou efektívnosťou a poskytuje presné a kvalitné povrchy. Už zvýšenie reznej rýchlosti na 50 m/s umožnilo zvýšiť produktivitu brúsenia o 30 %. Preto sa vo vývoji pokračovalo. V súčasnosti rýchlostné brúsenie používa obvodové rýchlosti brúsiaceho kotúča (rezné rýchlosti) 60 ÷ 120 m/s a laboratórne aj viac (supersonické brúsenie). Vyššie rezné rýchlosti vo všeobecnosti znižujú opotrebenie brúsiaceho kotúča, znižujú zložky reznej sily F_p i F_c a tým aj prácu potrebnú na brúsenie. Priaznivo pôsobia na úber materiálu i na kvalitu povrchu a aj na presnosť tvaru (zmenšenie strednej hrúbky triesky odoberanej jedným zrnom). Zväčšenie reznej rýchlosti skracuje čas spolupôsobenia v oblasti kontaktu brúsiaci kotúč - obrobok, v dôsledku toho v povrchovej vrstve súčiastky môže vzniknúť i tlakové zvyškové napätie. Vznik tlakových zvyškových napätí v povrchových vrstvách pri dokončovacom brúsení je dôsledkom

prevládajúceho pôsobenia síl nad vplyvom teplôt. Pri zväčšovaní hĺbky rezu sa teplota rezania zvyšuje, v dôsledku čoho prevládajú ťahové zvyškové napätia.

Aj pri rýchlostnom brúsení má význam brúsenie načisto. Zmenšovaním hĺbky rezu sa mení i gradient zvyškových napätí a môže dôjsť aj k zmene ich zmyslu (z ťahových na tlakové).

Efekt zvýšenia reznej rýchlosti možno využiť dvoma spôsobmi:

- a) zvýšením reznej rýchlosti a zachovaním kruhového posuvu (obvodovej rýchlosti súčiastky).

Objemový výkon brúsenia sa tým nezmení, ale znížia sa rezné sily, zlepši sa rozmerová i tvarová presnosť a drsnosť brúsenej plochy, zmenší sa opotrebenie brúsiaceho kotúča, predĺži sa trvanlivosť činnej plochy brúsiaceho kotúča, resp. činných zŕn brúsiaceho kotúča) i životnosť kotúča. Zväčšením trvanlivosti činných zŕn brúsiaceho kotúča sa zníži časový podiel orovnávania pripadajúci na 1 obrobok (zníženie vedľ. času). Nižšie rezné sily spôsobia skrátenie vyiskrovaného času (zníženie hlavného času);

- b) zvýšením reznej rýchlosti so súčasným zvýšením kruhového posuvu (obvodovej rýchlosti súčiastky) sa zvýši objemový výkon (ale nie tvarová a rozmerová presnosť brúsenia).

Možno dosahovať až výkony porovnateľné so sústružením, frézovaním atď. Preto sa môžu hrubovanie sústružením, resp. frézovaním, a dokončovanie brúsením spojiť do jednej operácie brúsenia (pri jednom upnutí na rovnakom stroji a rovnakým nástrojom - brúsiacim kotúčom). Dosiahne sa tak podstatné skrátenie hlavných a vedľajších časov. Týka sa to brúsenia súčiastok, kde plochy hrubované i dokončované nie sú tepelne spracované (kalené a pod.);

Ak medzi hrubovaním a dokončovaním je tepelné spracovanie, efekt integrovania hrubovania a dokončovania do jednej operácie nemožno uskutočniť (podľa toho sa predmetné brúsenie ako spojenie hrubovania a dokončovania zvykne nazývať integrálne brúsenie, je však zaužívaný aj termín brúsne obrábanie alebo intenzívne brúsenie).

Uvedené metódy rýchlostného brúsenia si vyžadujú špeciálne brúsiace kotúče, špeciálne brúsky i špeciálne rezné kvapaliny. Brúsiace kotúče pre rýchlostné brúsenie musia mať zvýšenú odolnosť proti roztrhnutiu (odstredivá sila rastie s kvadrátom rýchlosti). Takéto brúsiace kotúče majú špeciálne spojivá. Sú zosilnené k otvoru, pretože na jeho obvode je kotúč najviac namáhaný. Taktiež brusivo je špeciálne (legované). Kotúče musia byť dynamicky vyvážené a nevyváženosť nesmie prekročiť hodnotu 1 μm . Pri rýchlostiach nad 80 m/s sa osvedčili tiež kotúče zložené zo segmentov. Všetky kotúče (100 % kontrola) musia byť vyskúšané na obvodovú rýchlosť o 50 % vyššiu, než je prevádzková uvedená na štítku kotúča. Brúsky pre

rýchlostné brúsenie musia byť robustnej konštrukcie (ide o veľké rezné výkony), musia mať vysokú statickú a dynamickú tuhosť, silnejšie elektromotory. Remenice a rotory musia byť dynamicky vyvážené. Brúsne vreteno musí byť špeciálne uložené. Pracovné vreteno by malo mať plynulú reguláciu otáčok. Kryty brúsiacich kotúčov sú špeciálne (samozatváracie, vyložené penovou hmotou). Drobné úlomky z prípadne roztrhnutého kotúča, ktoré kryt nezachytí, musia byť bezpečne zachytené celkovým krytovaním brúsky.

Veľký vývin tepla pri rýchlostnom brúsení kladie nároky na rezné kvapaliny, ktoré sa špeciálne vyvinuli pre tento účel. Musí byť tiež zabezpečená jej dobrá filtrácia. Má byť eliminovaný aj vznik značného množstva olejovej hmly, ktorá pri rýchlostnom brúsení vzniká (filtrácia, odlučovanie). Pre rýchlostné brúsenie sa preto žiada plné zakrytovanie brúsok.

5. Leštenie, hladenie, používané parametre, dosahované výsledky

5.1 Leštenie

Leštením odstraňujeme drobné nerovnosti, tým sa docieli zrkadlový lesk a vysoká akosť povrchu ($R_a 0,1 \div 0,8 \mu\text{m}$). Leštenie môže byť mechanické, elektrochemické a chemické. Mechanickým leštením dosahujeme vysokú hladkosť povrchu pôsobením leštiaceho nástroja na opracovávaný povrch. Leští sa tvrdými brúsnymi materiálmi upevnenými na nejakom nositeli, prípadne voľne sa vznášajúcimi alebo vrhanými určitým smerom.

Leštenie kotúčmi je najrozšírenejší spôsob leštenia. Kotúče bývajú plstené, bavlnené (lisované), látkové (zošívané), drevené, kovové, plastické. Brúsne zrná sú najčastejšie prilepené (napr. glejom). Zrná majú veľkosť $30 - 100 \mu\text{m}$. Niekedy sa používa leštiaca pasta z mikropráškov $7 \div 14 \mu\text{m}$. Pastu tvorí brusivo s kriedou, viedenským vápnom, olejmi a pod. Rezná rýchlosť býva $20 - 30 \text{ m/s}$ na leštičkách rôznej konštrukcie (prípadne i ručným pridržiavaním).

Leštenie kefami vykonávame na čistenie od opalov, okovov, hrdze, farby. Kefové kotúče majú činnú časť z jemných drôtených vlákien kovových, ale i štetín prírodných alebo syntetických (silon, nylon a pod.). Drôtky môžu byť voľné alebo pevne fixované (ihlofrézy). Obvodová rýchlosť kotúčov býva $10 \div 60 \text{ m/s}$, najlepšia kvalita býva pri rýchlosti 25 m/s . Prítlačná sila kefy je $30 - 120 \text{ N}$. Čas kefovania $10 \div 50$ sekúnd. Kefovať možno na brúskach, vrtačkách, leštičkách, u prvých je spravidla ručné pritláčanie nástroja na obrobok. K lešteniu patrí aj omielanie v bubnoch. Bubny môžu byť otáčavé alebo vibračné. Dosahuje sa drsnosť $R_a 0,1 - 0,4 \mu\text{m}$. Do bubna sa vkladajú leštené súčiastky a leštiaca zmes (brúsny prášok, úlomky keramiky, oceľové telieska, voda a podobne). Omielacie bubny bývajú kovové (zvárané) alebo drevené. Môžu byť valcové, kužeľové, niekoľkostranné ($6 \div 8$). Oceľové majú gumovú, drevenú alebo plastickú výstelku. Obvodová rýchlosť omielacieho bubna býva $50 - 60 \text{ m/min}$. Vibračné bubny sa neotáčajú, ale natriasajú (vibrujú), tu vibračné zrýchlenie musí byť väčšie ako tiažové zrýchlenie (inak by sa náplň s bubnom pohybovala ako monolitná masa a

omielanie nenastane. Omielanie trvá 2 - 6 hod (ale naraz sa opracúva veľa súčiastok, preto to nie je nevýkonné). Ďalej je to leštenie pásmi. Pás v tvare nekonečného prstenca sa natáhuje na dva kotúče, z ktorých jeden je hnací. Leštené súčiastky sa k pásu pritláčajú. Leštenie pásmi má oproti lešteniu kotúčmi výhodu vo väčšej pracovnej ploche. Pásky sa vyrábajú z tkanín prirodzených i umelých. Na ne je nanosená vrstva (až 3 mm) brusiva (glejom a i.). Rýchlosť pásu môže byť $10 \div 40$ m/s. Prítláčny tlak je 0,03 - 0,09 MPa. Dosahovaná drsnosť je $0,1 \div 0,4$ μm (Ra). K mechanickému lešteniu by sme mohli priradiť i pieskovanie, brokovanie, balotínovanie (sklené guľôčky v kvapaline) a pod.

Elektrochemické leštenie predpokladá súčiastku (ako kladný pól) ponorenú do elektrolytu (kyseliny napr. H_2SO_4 a i.). Záporný pól je elektróda (katóda). Doba leštenia je niekoľko minút (1 - 10). Teplotu elektrolytu upravujeme ohrievačmi (elektrický, parný a i.) na 60 - 90 °C. Prúdová hustota býva 20-200 A/dm². Dosahované hodnoty drsnosti bývajú $0,1 \div 0,4$ μm (Ra) a výnimočne aj 0,05 μm . Elektrochemické leštenie ... platňuje najmä pri leštení tvarovo náročných súčiastok (lopatky turbín, zápusťkové dutiny, tvárniace nástroje a pod.). Výhodné je tiež pri leštení ťažkoobrobiteľných a veľmi tvrdých materiálov. Súčiastka pred elektrochemickým leštením má byť odmastená (benzínom, acetónom) a po elektroleštení umytá, zneutralizovaná a sušená.

Pri chemickom leštení súčiastku ponoríme na určitý čas (niekoľko minút) do nádrže s chemickým aktívnym roztokom (rôzne kyseliny H_2SO_4 a i.). Každá skupina kovov si vyžaduje iný aktívny roztok. Leštiaci roztok pripravíme tak, že do daného množstva vody vlejeme tenkým prúdom a za stáleho miešania dané množstvo kyseliny sírovej a po ochladnutí na 30 - 40 °C doplníme ostatné kyseliny i prísady. Dosahovaná drsnosť je $\text{Ra} = 0,2 \div 0,4$ μm . Chemické leštenie sa používa hlavne ako vhodná a lacná povrchová úprava obrobkov z ocelí, neželezných kovov a zliatin. Výrobné náklady sú však vysoké. Výhodou chemického leštenia je rýchlosť a jednoduchosť procesu (1/4 času mechanického leštenia). Aj pri chemickom leštení treba súčiastky predtým odmastiť a po leštení popremývať v chladnej i teplej vode a sušiť.

5.2 Hladenie

K mechanickému lešteniu alebo hladeniu by sme mohli priradiť aj spôsoby vytvárania hladkého povrchu len samotným tlakom nástroja vyvolávajúcim deformácie povrchových vrstiev. Iba stručne si ich spomenieme (podrobnosti sú v predmete Progresívne metódy obrábania). K týmto spôsobom patrí aj pretláčanie kalibračnými trňmi (pretláčacia rýchlosť $2 \div 7$ m/min, dosahovaná presnosť IT $5 \div 7$, drsnosť Ra $0,1 \div 0,8$ μ m, ako mazadlá sa používajú rôzne druhy olejov, minerálne, rastlinné, mydlové roztoky a i., používané stroje sú preťahovačky alebo lisy).

Ďalej tam patrí valčekovanie. Ako činné časti valčekovacieho nástroja sa používajú otočne uložené valčekovacie kladky. Možno valčekať súčiastky hriadeľového typu (vonkajšie i vnútorné plochy) ba i rovinné súčiastky. Valčekať možno v podstate všetky kovy do pevnosti 1400 MPa. Treba však, aby valčekané plochy mali splnené isté požiadavky na predchádzajúcu operáciu. Vstupná drsnosť má byť $1,6 \div 4$ μ m (Ra). Brúsené alebo honované plochy nie sú na valčekovanie vhodné. Rýchlosť valčekovania je tak do 200 m/min. Posuv valčeka má byť $0,3 \div 0,5$ mm šírky valcovej časti (u umelých zaoblení valčekov $0,1 \div 0,2$ mm na otáčku, u veľkých zaoblení až 1,8 mm na otáčku). Pri valčekovaní býva prítlačný tlak asi dvojnásobok medze prietlačnosti valčekaného materiálu. Mazadlami najčastejšie sú rôzne minerálne alebo rastlinné oleje alebo ich zmesi. Prítlačný tlak určuje presah polohy nástroja voči rozmeru predbežne opracovanej plochy. Tento býva 0,07 - 0,15 mm. Najväčší vplyv na výsledok valčekovania býva na prvom prechode valčekom, preto by mal tento postačovať. Dosahovaná presnosť je IT $6 \div 8$ a drsnosť Ra = $0,1 \div 0,4$ μ m. Valčekovanie sa spravidla vykonáva na sústruhu. Ak miesto valčeka je v nástroji guľka, ide o guľkovanie. Výhodou je, že ide o guľky používané do guľkových ložísk, ktoré v širokom sortimente vyrábajú ložiskové fabriky.

6. Honovanie, honovacie stroje, honovacie nástroje

6.1 Základné údaje o honovaní

Honovanie je jemné rezanie mnohoklinovým nástrojom z brúsnych zŕn (určitej jemnejšej zrnitosti) presne neurčených tvarov a geometrie, pevne udržovaných v spojive. Honovaním sa dosahuje vysoká akosť povrchu a rozmerová i tvarová presnosť. Je to proces hromadného mikrorezania materiálu tisíckami brúsnych (môžeme povedať i honovacích) zŕn pri výdatnom mazaní a chladení reznou kvapalinou. Plocha obrobku je v stálom styku s nástrojom, pričom vzniká periodická zmena smeru priamočiareho vratného pohybu nástroja za súčasného otáčavého pohybu buď nástroja alebo obrobku. Charakteristickým znakom plochy obrobenej honovaním sú jemne križujúce sa stopy po reznom nástroji. Rezným nástrojom sú jemnozrné brúsne tyčinky nazývané honovacie kamene, pripevnené na držiakoch honovacej hlavice a pritláčané na stenu opracúvaného povrchu. Honovaním sa dokončujú obvyčajne valcové otvory strojových súčiastok, u ktorých sa vyžaduje vyššia akosť povrchu a užšie tolerancie presnosti tvaru a rozmerov (ktoré sa spravidla brúsením dosiahnuť už nedajú). Typické strojové súčiastky, ktoré sa najčastejšie honujú, sú hydraulické a pneumatické valce, motorové valce a pod. Honovaním možno obrábať kalené i nekalené ocele, liatinu, farebné i ľahké kovy, SK, grafit, sklo a iné. Pri honovaní pracuje naraz 100 až 1000 krát viac brúsnych zŕn ako pri brúsení. Ich rezná rýchlosť je 50 - 100 krát menšia a tlak nástroja 6 - 10 krát nižší než pri brúsení. Stredná teplota rezania je 8-10 krát nižšia než pri brúsení. Hĺbka deformovanej vrstvy býva v rozmedzí 0,006 - 0,002 mm. Hĺbka amorfnej (procesom ovplyvnenej a znehodnotenej vrstvy) je len asi 0,0005 mm. Honovanie má oproti brúseniu niekoľko predností:

- možnosť odstránenia kužeľovitosti a iných odchýlok tvaru po predchádzajúcich operáciách,
- menšie pomocné časy na nastavenie súčiastok,
- zachovanie kolmosti osi otvoru na jeho kolmú rovinu,
- vyššia produktivita práce,
- zníženie nárokov na presnosť a kvalitu povrchu predchádzajúcich operácií,

- nízka vlnitosť povrchu,
- veľmi malá amorfná vrstva,
- vyššia kvalita povrchu,
- väčšia presnosť rozmeru a tvaru,
- nižšie nároky na presnosť a tuhosť stroja,
- možnosť bezproblémového opracúvania tenkostenných súčiastok.

Honovanie má ovšak oproti brúseniu aj niektoré nevýhody:

- nemožno vylepšovať polohu osi honovaného otvoru,
- pri honovaní húževnatých materiálov sa póry honovacieho kameňa rýchlo zanášajú trieskami, čím klesá produktivita práce.

6.2 Honovacie stroje

Honovať možno ručne alebo strojovo. Ručne sa honuje obyčajne na vrtačkách, kde je strojový len otáčavý pohyb nástroja (vo vretene) a ručne sa posúva vreteno alebo obrobok. Dokonalý proces prebieha však na honovačkách. Honovačky bývajú vertikálne a horizontálne. Vertikálne honovačky sa vyrábajú pre max. priemer obrobku 400 mm a zvyčajne dĺžkou 500 mm. Na dlhé súčiastky sa lepšie hodia horizontálne honovačky. Honovacie stroje môžu byť v prevedení normálnom (bez automatizačných prvkov) alebo ako poloautomat, či automat. Hodia sa aj do liniek pre tvrdú automatizáciu. Honovačky sa prevažne používajú vo veľkosériovej a hromadnej výrobe. NC - honovacie stroje sú v zásade možné (zriedkavé). Honovačky môžu byť jednovretenové i viacvretenové (2, 4, 6, 8 ...) Prítlak kameňov na opracovávanú plochu obrobku je najčastejšie zabezpečený hydraulicky alebo pneumatically. Moderné honovacie stroje už zvyknú využívať adaptívne riadenie (majú meradlo na aktívnu, t.j. bez zastavenia stroja, kontrolu rozmerov). Vývoj honovacích strojov je orientovaný v súlade s vývojom a využívaním nových rezných materiálov pre honovanie.

6.3 Honovacie nástroje

Honovací nástroj pozostáva z honovacej hlavy, do ktorej sú pozdĺž jej osi po obvode umiestnené a upevnené (mechanicky - skrutkami v držiaku - pružinami alebo lepením) honovacie kamene. Honovací kameň je hranol s rozmermi šírky a hrúbky podľa veľkosti honovacej hlavice (priemeru honovaného otvoru) a jej dĺžka závisí od dĺžky otvoru. Výrobcovia honovacích kameňov dodávajú bežne kamene od šírky a hrúbky 3 x 3 mm až do 30 x 30 mm a dĺžky od 35 mm do 400 mm. Hlavice bývajú niekedy jednokameňové, zväčša však viackameňové (3, 5, 6, 7). Honovacie kamene bežné sú z Al_2O_3 zrnitosti 120, 240, 320, 400, 500 s keramickým spojivom, stredne až viac pórovité, stredne a až viac tvrdé. Dodávajú sa aj honovacie kamene z SiC (zelené). Novými reznými materiálmi pre honovanie sú diamant a kubický nitrid bóru. Takéto kamene (či lišty) tvoria často teleso s nanesenou vrstvou (cca 3 mm) DIA či KNB. Spojivo kovové, či živичné. Nové kamene (nie DIA, či KNB) nemajú potrebný polomer zaoblenia, zodpovedajúci priemeru otvoru. Preto ich treba upraviť - prispôbiť na rozmer honovaného otvoru. To sa robí orovnávaním alebo diamantovým orovnávačom alebo karborundovým kotúčom. Pochopiteľne, DIA a KNB lišty musia mať z hospodárnych dôvodov v profile rádius opracovávaného otvoru.

Aj honovanie sa zvykne deliť na časť hrubovaciú a časť hladiacu, čo sa odzrkadlí aj na použití honovacieho kameňa (pre hladenie jemnejší). Sú i také konštrukcie honovacích hlavíc, kde sú spolu hrubovacie i hladiace kamene. Pri hrubovaní sú vysunuté hrubovacie kamene, ktoré sa po hrubovaní uvoľnia zo záberu a do záberu sa vťahujú hladiace kamene, ktoré honovanú plochu dokončia. Honovacie hlavice môžu mať tiež vmontované snímače na sledovanie honovacieho rozmeru (sledovacie meradlo).

7. Podmienky honovania, používané parametre honovania, dosahované výsledky

7.1 Podmienky honovania

Hlavné parametre, ktoré určujú pomery pri honovaní, sú výsledná rezná rýchlosť a jej zložky (axiálna a obvodová), uhol skríženia honovacích stôp a špecifický tlak kameňov. Výsledná rezná rýchlosť, v_e (m/min), označovaná ako honovacia rýchlosť, je relatívna rýchlosť, ktorou sa pohybujú častice honovacieho nástroja po povrchu otvoru honovanej súčiastky. Jej veľkosť a smer je daný vektorovým súčtom obvodovej rýchlosti súčiastky v_o (m/min) a osovej, axiálnej rýchlosti v_a (m/min). Platia vzťahy:

$$v_o = \frac{\pi D (n_1 + n_2)}{1000}$$

kde D je priemer otvoru (mm),

n_1 sú otáčky honovacej hlavice (min^{-1}),

n_2 sú otáčky súčiastky (min^{-1}),

n_1, n_2 majú vzájomne opačný zmysel, niekedy býva buď $n_1=0$, alebo $n_2=0$,

$$v_a = \frac{2z \cdot L_z}{1000},$$

kde z je počet dvojzdvihov (min^{-1}),

L_z je dĺžka zdvihu honovacej hlavice (mm),

pričom: $L_z = L + l_1 + l_2 - l$

kde L je dĺžka otvoru (mm),

l_1 je dolný prebeh (mm),

l_2 je horný prebeh (mm),

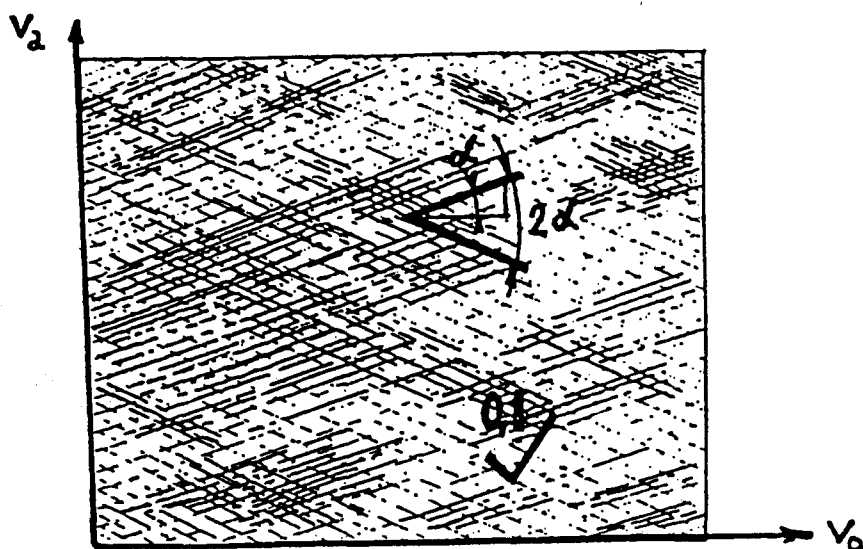
l je dĺžka kameňa,

zvyčajne sa volí: $l_1 = l_2 = \frac{l}{3}$ potom: $L_2 = L - \frac{l}{3}$.

Napokon možno písať: $v_e = \sqrt{v_o^2 + v_a^2}$.

Uhol križenia stôp po honovaní 2α sa dá určiť zo vzťahu:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{v_a}{v_o} = \frac{2zL_z}{\pi D(n_1 + n_2)}.$$



Obr. 1 Križovanie stôp po zrnách pri honovaní

Jeho stredná hodnota je $\alpha = 45^\circ$. Vtedy badať najlepší úber. Odporúčené hodnoty bývajú $v_a = 8 \div 25$ m/min a $v_o = 15 \div 40$ m/min. Pri hrubovaní býva $\alpha = 45^\circ$ a pri dokončovaní $\alpha = 20^\circ$ (niekedy aj menej). Veľkosť merného tlaku kameňov na honovanú plochu vplýva na úber (i produktivitu), opotrebenie kameňa i kvalitu povrchu. Používané hodnoty merného tlaku sú $p = 0,2 \div 1,5$ MPa. Tento tlak sa rozdelí na veľké množstvo zrn tak, že jedno zrno pracuje asi s prítláčnou silou 0,002 N.

Prídavok na honovanie býva od niekoľkých tisícín až po niekoľko stoviek až desiatín mm v závislosti od veľkosti otvoru. Čas honovania býva asi 1 minútu. Honovanie je rezný proces s bohatým chladením a čistením reznou kvapalinou. V minulosti sa používal petrolej alebo zmes petrolej + olej, teraz sa používajú špeciálne rezné kvapaliny zdravotne nezávadné.

7.2 Výsledky honovania

Presnosť geometrického tvaru dosiahnuteľná honovaním sa pohybuje v medziach 2 až 5 μm . Presnosť rozmerov je možná v triedach presnosti IT 2 ÷ 4. Bežne dosahovaná drsnosť pri honovaní je $R_a = 0,4 \mu\text{m}$. Za zvláštnych podmienok možno dosiahnuť drsnosť povrchu $R_a = 0,025 \mu\text{m}$.

Honovanie diamantovými lištami sa uplatňuje v sériovej a hromadnej výrobe (z titulu vysokej životnosti nástroja). Je to vysokoproduktívne a stabilné obrábanie. Bežne sa dá dosiahnuť drsnosť pri honovaní $R_a = 0,4 \mu\text{m}$. Za zvláštnych podmienok možno dosiahnuť drsnosť povrchu $R_a = 0,025 \mu\text{m}$.

Honovanie diamantovými lištami sa uplatňuje v sériovej a hromadnej výrobe (z titulu vysokej životnosti nástroja). Je to vysokoproduktívne a stabilné obrábanie. Bežne sa dá dosiahnuť drsnosť až $0,025 \mu\text{m}$ (R_a). Pretože pri honovaní diamantovými lištami sa vyvíja menej tepla, možno týmto spôsobom honovať aj otvory tenkostenných súčiastok. Čas honovania je 1-2 min. Okrem mnohých predností majú honovacie dia lišty niektoré nedostatky. Neposkytujú takú kvalitu povrchu ako po honovaní s Al_2O_3 resp. SiC. Ďalšou ich nevýhodou je ich pomerne vysoká cena. Rezná schopnosť diamantových lišt je však vyššia ako kameňov z Al_2O_3 napr. SiC, lebo diamantové zrná trčia zo spojiva. Produktivita s dia lištami je asi dvojnásobná, rezné pomery tiež, čas je však polovičný, ale dosiahnutá drsnosť dvojnásobná. Zmeny základných parametrov pôsobia podobne ako pri bežnom honovaní. So vzrastom merného tlaku celkový vývin tepla, rezné sily i úber materiálu narastajú. Vzrast obvodovej rýchlosti zvyšuje vývin tepla. Pri honovaní dia lištami sa používajú rezné kvapaliny s nízkou viskozitou. Konštrukcie honovacích hlavíc i samotných honovačiek u diamantového honovania sú v podstate rovnaké ako u bežného honovania (sú trochu tuhšie). Vývinové smery v dia honovaní sa orientujú na výskum a vývoj nových spojív dia zrn na honovacích lištách (pre

zvýšenie reznej schopnosti). Trvanlivosť nástrojov dia honovanie zvyšuje 50-150 krát. Dia honovanie tiež stabilizuje honovací proces, zabezpečuje dobrú reprodukovateľnosť pri dosahovaní drsnosti i presnosti honovanej plochy. Diamantové honovanie by malo doniesť úsporu niekoľko sto Sk na jeden karát (0,2 g) diamantov. Podobné výsledky ako na honovanie s diamantovými lištami sa dosahujú honovaním s lištami z kubického nitridu bóru (KNB). Ďalším zlepšením najmä produktivity honovania je vibračné honovanie, ktoré tvorí prechod medzi honovaním a superfinišovaním. So superfinišovaním sa zhoduje v charaktere pracovných pohybov a v dosahovaní vysokej akosti povrchu, s honovaním má spoločné veľké úberové hodnoty. Pri vibračnom honovaní sa k predtým spomínanému otáčavému a axiálnemu pohybu pridružuje ďalší pohyb v smere osi s vyššou frekvenciou, ale podstatne nižšou amplitúdou. Prídavný pohyb však ovplyvní uhol kríženia stôp po honovaní. Rýchlosť prídavného pohybu je:

$$v_v = \frac{2Af_v}{1000} \text{ (m/min)}$$

kde A je veľkosť amplitúdy (mm),

f_v frekvencia vibrácií (min^{-1}).

Uhol skríženia stôp 2α počítame zo vzťahu:

$$\text{tg}\alpha = \frac{v_o}{v_v}.$$

Vibračné honovanie môže byť i diamantové. A býva 2 - 20 mm, f_v býva $750 \div 1500 \text{ min}^{-1}$, axiálna rýchlosť hlavice v_a sa znižuje až na 1 - 2 m/min. Ďalej sa používa tiež elektrochemické (elektrolytické) honovanie. Nástroj býva katódou a obrobok anódou. Ako elektrolyt sa používa NaCl, KNO_3 , CaCl_2 a iné. Používané prúdové hustoty sú 5 - 10 A/cm^2 na obrobok a 20 - 30 A/cm^2 na nástroj. Napätie býva okolo 10 V. Používané tlaky na kamene sú menšie, nakoľko prevažuje elektrochemický úber. Úber pri elektrochemickom honovaní je viac ako 4 x väčší, kvalita povrchu však je mierne horšia. Preto pre zabezpečenie vysokej kvality povrchu hrubujeme elektrolyticky a dokončujeme mechanicky (pri vypnutom elektr. prúde).

8. Lapovanie, lapovacie stroje, lapovacie nástroje

8.1 Základné údaje o lapovaní

Lapovanie je proces dokončovacieho obrábania rovinných alebo zakrivených plôch pri ktorom sa obrobok i nástroj prevažne s voľným brusivom po sebe pohybujú a brúsne (môžeme povedať i lapovacie) zrná odoberajú veľmi malé triesky. Kým nástroj pri leštení je pružný, prispôsobivý k leštenej ploche (a tým môže zlepšiť len drsnosť povrchu, nástroj pri lapovaní je tuhý (môže byť i nastaviteľný alebo i rozpínací - vnútorné plochy) a zlepšuje tak i presnosť tvaru i rozmeru. Súčasťou nástroja je aj lapovací prášok alebo pasta. Niekedy sa lapuje s nástrojom s viazaným veľmi jemným zrnom (lapovacie kotúče). Lapovaním možno zhotoviť opticky presné plochy so zrkadlovým leskom. Jeho nevýhodou je pomerne vysoká cena a potreba veľmi presného predchádzajúceho opracovania. Týmto spôsobom sa dokončujú rovinné, valcové i tvarové povrchy z tvrdých i mäkkých materiálov s vysokou presnosťou tvaru a rozmerov i nárokmi na stupeň licovania. Takto sa napríklad zhotovujú základné mierky, meradlá, kalibre, súčiastky automobilov a podobne. Na dôležitých súčiastkach sa lapujú vonkajšie i vnútorné závit, profilové diery, ozubené profily a podobne. Predchádzajúcim spôsobom opracovania býva brúsenie (u rovinných a vonkajších valcových plôch) a u otvorov môže byť jemné vyvrtávanie, vystruhovanie a samozrejme brúsenie.

Lapovací nástroj s voľnými zrnami nie je typický rezný nástroj. Má negatívny tvar lapovanej plochy, vedie v tenkej vrstve medzi styčnými plochami lapovací prostriedok s voľne rozloženými reznými zrnami, ale sám triesky neodoberá.

Lapovať možno ručne (ručný prítlak lapovanej súčiastky na nástroj) alebo strojovo. Lapovaním dosahujeme jedny z najkvalitnejších výsledkov zo všetkých spôsobov obrábania (lepšie alebo aspoň rovnaké výsledky možno dosiahnuť len superfinišovaním s jemnými kameňmi). Nevýhodou lapovania je vysoká prácnosť dokončovania, vysoké porovnateľné náklady na jednotku dokončenej plochy a pri ručnom lapovaní nepohodlná práca súvisiaca s dodávaním lapovacieho prostriedku do medzery medzi nástroj a lapovanú plochu. Preto sa lapovanie nahrádza inými (rovnako presnými), menej prácnyimi spôsobmi, ako sú superfinišovanie a vibračné honovanie.

Osobitným prípadom lapovania je zabrusovanie dvoch navzájom súvisiacich súčiastok bez lapovacieho nástroja, napríklad pri licovaní ventilu do sedla, kohúta do telesa, pri zabehávaní ozubených kolies. Toto je výhodné a presné, vyžaduje si však dokonalé očistenie po lapovaní od zrníek, ktoré by v prevádzke prekážali.

8.2 Lapovacie stroje

Lapovacie stroje podľa ich určenia rozdeľujeme na univerzálne a špeciálne. Univerzálne stroje sú určené na lapovanie rovinných i valcových vonkajších povrchov i otvorov. Lapujú sa na nich ploché platničky, piestne čapy, valčeky, krúžky, puzdrá a im podobné súčiastky, tieto stroje bývajú s vertikálne i horizontálne uloženými lapovacími kotúčmi. Špeciálne lapovacie stroje sú určené na lapovanie určitého druhu súčiastok, napr. bokov zubov ozubených kolies, čiel valčekov ložísk a pod. Špeciálne stroje bývajú automatizované pre maximálne možnú produktivitu lapovania. Z konštrukčného hľadiska možno lapovacie stroje rozdeliť na:

- stroje s jedným hnaným (otočným) a jedným pritlačným (neotočným) kotúčom, obrobky sú v kletke uložené tak, aby sa valili i kĺzali podľa potreby,
- stroje s dvoma hnanými kotúčmi (tu sa používajú i kotúče s viazaným brusivom), z nich sa obvykle jeden pohybuje pomalšie ako druhý. Viazané brusivo býva zvyčajne SiC,
- bezhrotové lapovacie stroje podobné bezhrotým brúskam, kotúče s viazanými zrnami (brúsny i podávací) širšie ako pri bezhrotových brúskach,
- lapovacie stroje na otvory majú podobnú konštrukciu ako honovačky, môžu byť jedno i viacvretenové, nástrojmi sú rozpínacie trne, vreteno môže byť horizontálne i vertikálne.

8.3 Lapovacie nástroje

Lapovať možno i na upravených vrtačkách a i. Najvhodnejším materiálom na lapovacie nástroje je sivá liatina, takýmito nástrojmi možno niekedy pracovať aj za sucha, mazivom je grafit nachádzajúci sa v liatine. Nástroje z mäkkej ocele sú síce výkonnejšie, ale nedržia dobre

geometrický tvar. Veľmi tvrdé materiály možno lapovať s použitím kalených, ba i pochrómovaných nástrojov (dávajú tiež jemný povrch). Olovo i mäkké kovy sú vhodné na lapovanie profilov. Tvrdé drevo a plasty sú vhodné na hrubovanie. Materiál nástroja by mal byť mäkkší ako materiál obrobku, a tak sa používajú nástroje z bronzu, medi, zinku, cínu, ocele a z deficitných kovov, hlavne platované. Tvrdými lapovacími nástrojmi viac plasticky deformujeme, ako režeme a mäkkými naopak. Lapovacie pomôcky sú rozličné pasty, suspenzie, prášky, kde podstatnú zložku tvoria zrná brúsneho materiálu uskutočňujúce vlastný rezný proces. Zrná sú z Al_2O_3 , SiC , dia, B_4C , KNB a podobne, často i legované napr. Ti, Cr a iné. Stredné rozmery zrn sú 1-100 μm u dokončovania do 5 μm . Na jemné lapovanie sa používa aj Fe_2O_3 (viedenská červeň), Ca Mg CO_3 (viedenské vápno). V pastách je okrem olejov aj vazelína, pôsobiaca ako spojivo (oleje ako mazadlo). Dôležitým činiteľom je veľkosť medzery medzi súčiastkou a lapovacím nástrojom. Čím je rozmer zrna menší, tým aj medzera musí byť menšia. Tvrdá pasta vytvára väčšiu medzeru. Pasta by mala byť dostatočne viskózna, pri ktorej nastáva prilepovanie na nástroj a vzniká medzera taká, ako je stredný rozmer zrna. Ak by medzera bola väčšia, nástroj začne preklzovať a úber prudko klesať.

9. Podmienky lapovania, používané parametre lapovania, dosahované výsledky

9.1 Podmienky lapovania a dosahované výsledky

Lapovaním možno dosiahnuť (výnimočne) drsnosť až $0,001\text{ }\mu\text{m}$. Rezné rýchlosti sa pri lapovaní pohybujú od 4 do 400 m/min. Najčastejšie je používaná rýchlosť asi 30 m/min. Jemné lapovanie (dokončovanie) používa nižšie rýchlosti ako hrubovanie. Bežná hodnota prídavkov býva 5 - 20 μm na priemer. Výrobnosť lapovania závisí od veľkosti prídavku, od použitého druhu brusiva, aj od merného tlaku lapovacích nástrojov. Merný tlak býva 0,05 - 0,25 MPa. Rezný pohyb brúsnych zŕn vyvoláva lapovací nástroj, ktorý sa so zreteľom na lapovanú plochu pohybuje v neustále meniacich sa dráhach a je na ňu pritláčaný tlakom. Pohybujúce sa zrná s rozlične orientovanými reznými hranami odoberajú z povrchu veľmi jemné triesky. Tieto triesky i stopy po ich úbere sa dajú dobre pozorovať pod mikroskopom. Pri lapovaní môžeme dosiahnuť pri veľmi jemnom brusive presnosť rozmerov IT 1 ÷ 3, tvarovej presnosti 0,03 ÷ 0,1 μm a drsnosti povrchu $R_a = 0,05 \div 0,005$, ba až $0,001\text{ }\mu\text{m}$, pri hrubovaní to však je IT 5 ÷ 6 a $R_a = 0,1 \div 0,2\text{ }\mu\text{m}$.

Pastu, suspenziu alebo prášok dostávame medzi obrobok a nástroj pri strojovom lapovaní čerpadlom, pri ručnom kvapadlom, prípadne štetcom. Lapovanie môžeme rozdeliť na mechanické, chemické a elektrolytické.

Podstatou mechanického lapovania je prevažne mechanický rezný proces úbertu jemných triesok voľnými brúsnymi zrnami rozptýlenými v pastách alebo suspenziách a pod. Niekedy sa používajú i viazané brúsne zrná. Veľmi efektívne je lapovanie diamantovými práškami. Diamantový prášok má výborne rezné vlastnosti a hodí sa najmä na lapovanie veľmi tvrdých materiálov (napr. SK, keramiky, skla a i.). Tu tiež možno použiť SiC + B₄C. Dia sa nehodí na lapovanie plôch meradiel (aby sa nespotrebovali).

9.2 Zvláštne spôsoby lapovania

Magnetické lapovanie využíva na rezný proces silové pôsobenie magnetického poľa, hlavne u dokončovania zložitých tvarov. Obrábaná súčiastka sa umiestňuje medzi póly elektromagnetov a brusivo je zmes brúsnych a feromagnetických častíc. Elektromagnet striedavo vŕaha a vypúšťa jadro, na ktorom je súčiastka. Pohyby súčiastky dodávajú energiu zrnám k úberu.

Ultrazvukové lapovanie je bežné mechanické lapovanie doplnené ultrazvukovými kmitmi nástroja s frekvenciou $18 \div 22$ kHz. Ultrazvukové kmity zvyšujú úber a skracujú čas lapovania a priaznivo pôsobia aj na presnosť tvaru lapovaného povrchu.

Lapovaním prúdom kvapaliny obrábame povrchy súčiastok voľnými brúsnyimi zrnami, rozptýlenými vo vode, ktoré sa vrhajú veľkou rýchlosťou šikmo na obrobok. Tým sa vyhladia nerovnosti, zvýši sa kvalita povrchu, a odstráni sa prípadné ostrapy. Voda s brúsnyimi zrnami sa vtláča do lapovacej pištole čerpadlom a v pištole sa ešte zrýchľuje stlačeným vzduchom. Zrornosť brusiva musí byť úmerná požadovanej drsnosti povrchu (to platí aj v iných prípadoch). Príliš hrubé zrná nedávajú kvalitný povrch, príliš jemné zahľadia špičky nerovností. Vzdialenosť ústia dýzy pištole od povrchu je asi 40 - 50 mm, tlak vzduch 0,5 - 0,6 MPa.

Podstatou chemického (chemicko-mechanického) lapovania je spojenie procesov chemického pôsobenia s mechanickým úberom. Na ten účel sa do lapovacej pasty pridávajú chemicky aktívne látky, ktoré na povrchu súčiastky vytvoria menej odolnú vrstvičku chemických zlúčenín a táto sa ľahšie obrába. Lapovacie kotúče musia však vedieť odolávať chemickým vplyvom pást (sú napríklad zo skla). Postup je taký, že povrch obrobku navlhčíme petrolejom a nanesieme pastu, ktorá začne pôsobiť, a začneme lapovať, po čase pasta vplyvom chemických zlúčenín obrobku (kovu) nadobúda kovový vzhľad a prudko klesá jej účinnosť, treba ju vymeniť a proces opakovať.

Elektrolytické lapovanie je principiálne anodické rozpúšťanie povrchových vrstiev obrobku pôsobením elektrického prúdu a elektrolytu i mechanickým pôsobením brúsnych zrn. Proces zabezpečuje vysokú akosť povrchu a niekoľkokrát skracuje jeho trvanie. Osvedčuje sa pri lapovaní tvrdých a ťažkoobrobiteľných húževnatých materiálov. Nástroje na lapovanie sú zvyčajne z nevodivého materiálu (najčastejšie lipové drevo). Nástroj odoberá anodickú vrstvičku najviac z vrcholkov mikronerovností. Po jej odstránení znova intenzívne prebieha.

anodický rozklad povrchu, kým v priehlbínach, kde sa vrstvička nenarušila, anodický rozklad sa spomaľuje. Po niekoľkonásobnom opakovaní procesu dostávame hladkú, rovnú a presnú plochu. Nehrdzavejúce ocele sa lapujú v 7 ÷ 10 % vodnom roztoku dusičnanu sodného pri napätí 6 - 12 V a plošnej hustote prúdu $0,3 \div 0,7 \text{ A/cm}^2$. Mosadz lapujeme vo vodnom roztoku fosforečnanu sodného o niečo menšou prúdovou hustotou. Merný tlak nástrojov býva $0,2 \div 0,3 \text{ MPa}$. Pri lapovaní býva súčiastka obyčajne celá ponorená do elektrolytu, ktorý je v nádrži z nehrdzavejúcej ocele.

Rezné nástroje lapujeme na modernizovaných brúskach alebo ostričkách, či špeciálnych strojoch. Nástrojmi na lapovanie sú elektricky vodivé kotúče s kovovou (Cu, Al ...) prípadne s grafitovou väzbou, ktoré sa vyrábajú práškovou metalurgiou. SK lapujeme s dia kotúčmi s kovovou väzbou. Ako elektrolyt možno použiť 5 % roztok dusičnanu sodného.

10. Superfinišovanie, definícia a spôsoby, superfinišovacie stroje a nástroje

10.1 Základné údaje o superfinišovaní

Superfinišovanie je jedna z metód obrábania využívajúca rezné vlastnosti mnohoklinových nástrojov, pričom nástroj (superfinišovací kameň) je prizmatické teleso s viazaným brúsnym zrnom dostatočne jemnej zrnitosti (veľkosti zrn) a tento nástroj je definovanou silou pritláčaný na opracovávanú plochu obrobku, pričom tento nástroj vykonáva rýchly oscilačný pohyb, tzv. základný pohyb s frekvenciou rádovo $10^1 \div 10^2$ Hz a amplitúdou $10^{-1} \div 10^1$ mm. Tento pohyb môže byť v špeciálnych prípadoch kombinovaný s pomalším oscilačným pohybom o frekvencii $10^{-2} \div 10^0$ Hz a amplitúde $10^0 \div 10^3$ mm (prípadne s ultrazvukovým oscilačným pohybom, tzv. rýchlym prídavným pohybom o amplitúde niekoľko mikrometrov), smer tohto pohybu je pozdĺž tvoriacej čiary obrábaného povrchu taký, aby dochádzalo k stálemu plošnému styku funkčnej plochy superfinišovacieho kameňa s opracovávanou plochou obrobku, pričom obrobok pod superfinišovacím kameňom vykonáva rotačný pohyb kombinovaný v niektorých prípadoch s pohybom translačným. Vzniknuté vedľajšie produkty superfinišovania (mikrotriesky, amorfné častice a častice z opotrebenia nástroja) sú odstraňované tzv. vyplavovacou kvapalinou, ktorá poskytuje aj mazacie účinky.

Názov superfinišovanie však nie je všeobecne prijatý. U nás bol donedávna obvyklý ešte starší názov prehladzovanie. V Nemecku sa používajú tri názvy, a to už spomínané superfinišovanie (preferuje ho známa firma na výrobu spf. strojov Supfina), ďalej mikrofinišovanie (preferuje ho iná známa firma na výrobu spf. strojov Thielenhaus) a napokon krátkozdvížne honovanie (Kurzhubhonen). Tento tretí názov sa ujal v nemeckej odbornej a učebnicovej literatúre. Superfinišovanie patrí k najdokonalejším spôsobom dokončovacieho obrábania.

Superfinišovaním možno obrábať takmer všetky materiály, a to liatinu, oceľ každého zloženia i tvrdosti, hliník a jeho zliatiny, meď, pochromované povrchy, sklo, drevo, plasty, cín a pod. Možno ním dokončovať všetky plochy odvodené od anuloidu, včítane hraničných prípadov (valcové a rovinné plochy). Možno superfinišovať vonkajšie i vnútorné plochy, malé i

veľké súčiastky (hriadele turbín, valce pre valcovanie plechov aj pre papierenský priemysel, drobné súčiastky pre zdravotníctvo, meradlá, rezné nástroje, vodiace plochy, súčiastky valivých ložísk a i. Spôsoby superfinišovania sú hrotové superfinišovanie, bezhrotové superfinišovanie zápichom i priebežne, špeciálne superfinišovanie (obežných dráh vonkajších a vnútorných krúžkov valivých ložísk a i.) rovinné superfinišovanie, elektrolytické superfinišovanie, ultrazvukové superfinišovanie a i.

10.2 Superfinišovacie stroje

Superfinišovacie stroje možno rozdeliť na dve skupiny, a to na univerzálne a špeciálne stroje.

Univerzálne stroje sú vhodné na dokončovanie viacerých súčiastok daného typorozmeru. Špeciálne stroje výrobca obvyčajne dodáva na základe špeciálnej objednávky na dokončovanie určitej súčiastky v podmienkach sériovej alebo hromadnej výroby. Bývajú to rozličné poloautomaty a automaty so zariadeniami na aktívnu kontrolu rozmerov súčiastky, automatickým prísunom a odsunom, automatickým pracovným cyklom s prípadným samočinným prepínaním režimov obrábania. Podľa princípu práce rozdeľujú sa superfinišovacie stroje na hrotové, bezhrotové a stroje pracujúce čelom alebo obvodom kotúča, (na superfinišovanie čelných a rovinných plôch, kužeľových a guľových plôch). Používajú sa aj superfinišovacie stroje pracujúce s kmitajúcou brúsnou páskou. Okrem samostatných superfinišovacích strojov existujú aj prídavné superfinišovacie hlavice, ktoré sa inštalujú na hrotovú brúsku alebo sústruh. Prevažná časť prídavných superfinišovacích hlavíc (na upnutie kameňa a pohyby kameňa) je konštruovaná na dokončovanie vonkajších rotačných plôch, prípadne rovinných plôch.

10.3 Superfinišovacie nástroje

Superfinišovacími nástrojmi sú držiaky s pripevnenými (mechanicky skrutkami, prilepenými) superfinišovacími kameňmi. Držiak vykonáva kmitavé pohyby (mechanicky,

pneumaticky, hydraulicky) a súčasne je pritláčaný k obrobnku. Superfinišovacie kamene sú prizmatické telesá hranolovitého tvaru (dĺžka x šírka x výška), spotrebúvajú sa na výšku alebo dĺžku (ich opotrebovávajúci sa rozmer). Karborundové kamene (SiC) volíme na obrábanie materiálov malej pevnosti (liatina, bronz, mosadz, Al, lisované hmoty a pod.) Korundové kamene (Al_2O_3) používame na superfinišovanie pevnejších materiálov (uhlíkové a legované ocele, nástrojové ocele, temperované liatiny, húževnatý bronz a pod.). Možno ich progresívne nahradiť diamantovými a karbonitridovými lištami (ako pri honovaní). Na dokončovanie niekedy sú grafitové spf. kamene. Zrornosť superfinišovacieho kameňa určujeme podľa predpísanej kvality povrchu. Hrubuje sa kameňmi zrnitosti (veľkosti) 22 μm (32), dokončuje sa kameňmi zrnitosti 15, 10, 7, 3 μm .

Korundové kamene majú zvyčajne keramické spojivo. Karborundové kamene majú zvyčajne živичné (bakelit) spojivo. Superfinišovacie kamene musia pracovať v podmienkach samoostrenia, produkty opotrebovania sú vyplavované výdatným prúdom vyplavovacej kvapaliny (špeciálneho zloženia, napr. od fy Castrol a pod.). Tvrdosť a štruktúra (hutnosť) kameňov sú štandardné a nebývajú predmetom zvláštnych požiadaviek.

Významným činiteľom zvyšovania životnosti superfinišovacích nástrojov je ich impregnácia (u korundových sírou u karborundových grafitom). Impregnácia spevní väzbu a zrnká sa tak často nevytlupujú. Životnosť stúpe až štvornásobne, tvrdosť o jeden stupeň (na to treba pamätať a sirovať mäkkšie kotúče).

11. Kinematické pomery superfinišovania

Kinematické pomery zahrnujú v sebe hlavne otázky tvaru dráhy vybraného hrotu nástroja (vybraného superfinišovacieho zrnka), jeho geometrických charakteristík (uhlov dráhy s význačnými smermi) i kinematických veličín (rýchlostí i frekvencií) pohybov pri superfinišovaní. Superfinišovanie je z kinematického hľadiska zložitý proces skladajúci sa z dvoch až šiestich pohybov. My budeme rozoberať prípad jednoduchší a budeme predpokladať, že superfinišovací kameň koná základný kmitavý pohyb s frekvenciou f (min^{-1}) a s amplitúdou a (mm), že ide o superfinišovanie hrotové zápichové, kde superfinišovaná plocha je valcová vonkajšia priemeru D (mm) a superfinišovaná súčiastka koná rotačný pohyb s frekvenciou otáčania (otáčkami) n (min^{-1}). Vzhľadom na existenciu stáleho zdroja kmitavého pohybu (najčastejši býva kľukový mechanizmus) premáhajúceho rezné i trecie sily, základný kmitavý pohyb nástroja môžeme pokladať za harmonický pohyb, a teda diferenciálna rovnica základného kmitavého pohybu superfinišovacieho kameňa je:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + \omega^2 y = 0 \quad (11.1)$$

integráciou tejto diferenciálnej rovnice dostaneme

$$y = a \cdot \sin \omega t \quad (11.2)$$

kde y je okamžitá výchylka (elongácia) superfinišovacieho kameňa,

a je maximálna výchylka (amplitúda) superfinišovacieho kameňa,

ω je kruhová frekvencia,

t je čas superfinišovania.

Kruhová frekvencia je úmerná frekvencii f harmonického pohybu a platí (s ohľadom na dobu kmitu T):

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (11.3)$$

Okamžitá rýchlosť základného kmitavého pohybu sa obdrží z rovnice (11.2) prvou deriváciou podľa času:

$$v_k = \frac{dy}{dt} = \frac{d}{dt} (a \cdot \sin \omega t) = \omega \cdot a \cdot \cos \omega t = 2\pi f a \cos \omega t = \pi f A \cos \omega t \quad (11.4)$$

kde sme preznačili $2a = A$ je veľkosť kyvu, t.j. dvojnásobná amplitúda

Maximálna rýchlosť základného kmitavého pohybu je:

$$v_{k\max} = \omega \cdot a = 2\pi f \cdot a = \pi A f = \pi f A \quad (11.5)$$

Priemerná rýchlosť základného kmitavého pohybu určíme ako podiel veľkosti kmitu (t.j. $4a = 2A$) a doby kmitu T , čiže:

$$v_{k\varnothing} = \frac{4a}{T} = 4af = 2Af \quad (11.6)$$

pričom sme využili fakt, že platí $f = \frac{1}{T}$.

Obrobok menovitého priemeru D koná rotačný pohyb, ktorého obvodová rýchlosť je:

$$v_0 = \pi D n \quad (11.7)$$

Ak by sme požadovali v_0 [m/min], potom by muselo byť $v_0 = \frac{\pi D n}{1000}$ a taktiež, ak požadujeme

$V_{k\max}$ alebo $v_{k\varnothing}$ v m/min, potom by sme museli písať (pre A v mm):

$$v_{k\max} = \frac{2\pi\omega f}{1000} = \frac{\pi A f}{1000}$$

a tiež:

$$v_{k\oslash} = \frac{4af}{1000} = \frac{2Af}{1000}$$

Pri superfinišovaní je ťažko určiť, či hlavný pohyb je kmitavý pohyb nástroja alebo otáčavý pohyb obrobku, lebo môžeme pracovať aj s $v_k > v_0$ a tiež aj s $v_0 > v_k$. Preto proces superfinišovania budeme charakterizovať výslednou reznou rýchlosťou v_e , pre ktorú platí:

$$v_{e\max} = \sqrt{v_{k\max}^2 + v_0^2} = \sqrt{\frac{(2\pi af)^2}{1000^2} + \frac{(\pi Dn)^2}{1000^2}} = \sqrt{\frac{(\pi Af)^2}{1000^2} + \frac{(\pi Dn)^2}{1000^2}} = \frac{\pi \sqrt{A^2 f^2 + D^2 n^2}}{1000} \quad (11.8)$$

$$v_{e\oslash} = \sqrt{v_{k\oslash}^2 + v_0^2} = \sqrt{\frac{(4af)^2}{1000^2} + \frac{(\pi Dn)^2}{1000^2}} = \sqrt{\frac{(2Af)^2}{1000^2} + \frac{(\pi Dn)^2}{1000^2}} = \frac{\sqrt{4A^2 f^2 + \pi^2 D^2 n^2}}{1000} \quad (11.9)$$

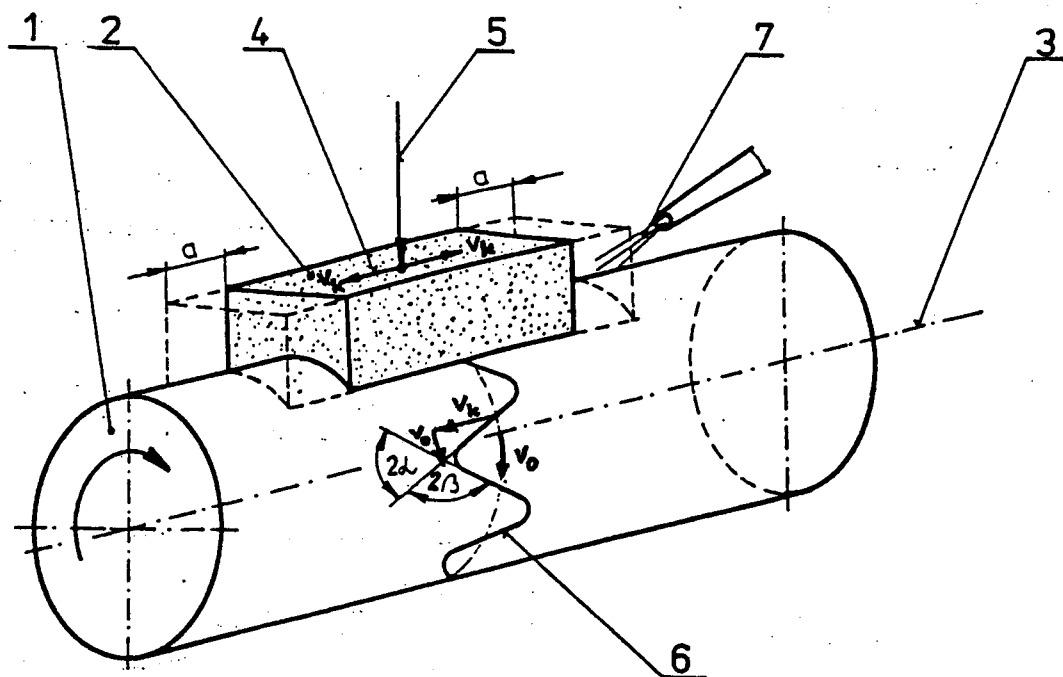
Uhol β je uhol, ktorý zvierá stopa brúsneho zrna (superfinišovacieho zrna) s kolmicou na os súčiastky, a uhol α je uhol, ktorý zvierá stopa superfinišovacieho zrna s osou súčiastky. Pre oba uhly platí: $\alpha + \beta = 90^\circ$ (sú to teda doplnkové uhly). Maximálnu hodnotu uhla kríženia stôp po superfinišovaní určíme podľa obrázku:

$$\operatorname{tg} \beta_{\max} = \frac{v_{k\max}}{v_0} = \frac{2\pi af}{\pi Dn} = \frac{2af}{Dn} = \frac{Af}{Dn} \quad (11.10)$$

Priemernú hodnotu uhla kríženia stôp po superfinišovaní určíme podľa obrázku:

$$\operatorname{tg} \beta_{\oslash} = \frac{v_{k\oslash}}{v_0} = \frac{4af}{\pi Dn} = \frac{2Af}{\pi Dn} \quad (11.11)$$

všeobecne: $\operatorname{tg} \beta = \frac{v_k}{v_0}$



1. Obrobok
2. Superfinišovací kameň
3. Os otáčania obrobku
4. Oscilačný pohyb
5. Prítlak superfinišovacieho kameňa
6. Stopa po jednom brúsnom zrne
7. Vyplavovacia kvapalina

Obr. 2 Kríženie stôp po superfinišovaní

Podobne pre uhol α môžeme písať:

$$\operatorname{tg} \alpha_{\max} = \frac{v_0}{v_{k \max}} = \frac{\pi D n}{\pi A f} = \frac{D n}{A f} = \frac{D n}{2 a f} \quad (11.12)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_{\varnothing} = \frac{v_0}{v_{k \varnothing}} = \frac{\pi D n}{2 A f} = \frac{\pi D n}{4 a f} \quad (11.13)$$

všeobecne: $tg\alpha = \frac{v_0}{v_k}$

Spomínaný uhol kríženia stôp po superfinišovaní (t.j. uhol 2β) je veľmi dôležitý pre samotný proces superfinišovania. Ak je tento uhol príliš malý (a to menší ako 15°), prevláda zalešťovanie povrchu súčiastky a dochádza k poklesu fyzikálnych parametrov opracovanej plochy (neodstránenie amorfnej, t.j. teplom pri brúsení ovplyvnenej vrstvy). Pri uhle $2\beta = 20 \div 60^\circ$ sa zvykne dokončovať (superfiniš tiež delíme na hrubovanie a dokončovanie) a v medziach

$2\beta = 60 \div 90^\circ$ sa zvykne hrubovať. Uhol kríženia stôp väčší ako 120° sa prejavuje vznikom superfinišovania pri súčinnosti voľných zŕn (taký veľký uhol skríženia stôp - a je to vlastne aj uhol krajných polôh namáhania zŕn superfinišovacieho kameňa - spôsobuje predčasné vyľamovanie zŕn z väzby) a dochádza k poklesu geometrických parametrov (geometrickej presnosti) opracovanej plochy. Uhol kríženia stôp po superfinišovaní teda nie je iba čisto kinematickým parametrom superfinišovania, ale má významné vlastnosti tribologické i úberové. Tým pojednanie o kinematických pomeroch pri superfinišovaní končíme.

12. Dynamické pomery superfinišovania

Dynamika superfinišovania sa zaoberá problémami stability uloženia (upnutia) obrobkov, problémami rezných síl i trecích síl a problémami kmitania z hľadiska silového.

Samotné rezné sily sú ľahko odvoditeľné od prítlačnej sily na superfinišovací kameň, ktorá sa dá nastaviť na superfinišovacom stroji. Tým odpadá potreba merania rezných síl pri superfinišovaní a odpadá aj náročný experimentálny i teoretický výskum rezných síl, ktorého nie sú ušetrené iné spôsoby obrábania (napr. sústruženie, ale i brúsenie...).

I keď sme sa vyššie zmienili o pojme rezná sila, predsa však pri superfinišovaní je používanie tohto pojmu problematické. Totiž superfinišovací kameň je mnohoklinový nástroj, ktorého jednotlivé klíny (zrnká) majú pre rezanie veľmi nevýhodnú geometriu (záporné uhly čela značných absolútnych hodnôt), a preto superfinišovací kameň iba trie a zadiera o obrábanú plochu, pričom sa z tejto plochy uvoľňujú častice kovu a predsa teda dochádza k odoberaniu kovu (existuje odoberaná vrstva). To však nevylučuje prípady, keď niektoré superfinišovacie zrnká dokážu rezať, ak majú na to vhodný geometrický tvar a polohu voči obrábanej ploche (splnenie zákona minimálnej hĺbky rezania). Teda proces odoberania materiálu pri superfinišovaní je konglomerátom trenia, deformovania, zadierania (brázdenia) a rezania. Pri tom zadieraní je vytváraná brázda a na jej okraje je vytlačovaný materiál z tejto brázdy. Brázdy sa rôzne krížia (pozri kinematiku superfinišovania) a zrná brázdia v jednom smere pritom spôsobujú uvoľňovanie častíc kovu z okrajov brázd, ktoré boli vytvorené v inom smere i inými zrnami. Preto oddelené častice len v niektorých prípadoch by sme mohli nazvať triesky (resp. mikrotriesky). Triesky totiž sú z geometrického hľadiska telesá s definovanou veľkosťou (rozmermi) svojho prierezu, ktorý je závislý od posuvu, hĺbky rezu, uhla nastavenia hlavnej reznej hrany a stlačenia triesky. Vedľajším produktom obrábania (hlavným produktom je súčiastka) nazveme triesku, resp. inú oddelenú časticu, v tomto prípade časticu, ktorá nemá definovanú veľkosť (rozмеры a tvar) v závislosti od uvedených parametrov. Takúto inú oddelenú časticu nazveme amorfnou časticou (amorfat) a tá môže byť v tvare iskry (pri brúsení), kvapky roztaveného kovu (pri nekonvenčných spôsoboch obrábania), alebo chuchvalca materiálu nedefinovaného tvaru (napr. pri obrábaní liatiny). Na základe uvedeného by sme miesto pojmu rezná sila mali operovať pojmom prítlačná sila, trecia sila, normálová sila a pod.

Pri superfinišovaní pôsobí vonkajší krútiaci moment na kľuke kľukového mechanizmu, ktorý sa najčastejšie používa na kmitací mechanizmus nástroja, môžeme ho nahradiť kmitacou silou F_k , ďalej tam na obrobok pôsobí prítlačná sila F_{pr} od superfinišovacieho kameňa, ktorá pôsobí ako tlmiaci (brzdíaci) faktor. Pôsobí tam aj vonkajší krútiaci moment slúžiaci na otáčanie obrobku, ktorý sa tiež zúčastňuje na tlmení kmitania. Uvedené skutočnosti medzi nástrojom a obrobkom by sme mohli z hľadiska nástroja, jeho kmitavého pohybu, popísať diferenciálnou rovnicou:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} \pm b_e \frac{dy}{dt} + by = F_k \quad (12.1)$$

pričom m je hmotnosť kmitača,

t je čas superfinišovania,

k_e je koeficient tlmenia (brzdenia) trením,

b je koeficient pružného odporu.

Znamienko \pm pri koeficiente tlmenia (brzdenia) trením je preto, lebo rovnica je skalárna a musíme vyjadriť fakt, že trecia sila mení počas pohybu orientáciu, ktorá je vždy opačná vzhľadom na orientáciu rýchlosti kmitavého pohybu.

Rovnicu (12.1) by sme mohli prepísať do tvaru:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{b}{m} y = \frac{F_k}{m} \pm \frac{\sum F_T}{m} \quad (12.2)$$

kde sme člen tlmenia vyjadrili ako sumár trecích síl a napokon môžeme písať:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + \omega^2 y = \frac{Fk}{m} \pm \frac{\sum F_T}{m} \quad (12.3)$$

čím sme ju pripodobnili k rovnici (11.1).

Už sme konštatovali, že superfinišovací kameň pôsobí na obrobok prítlačnou silou F_{pr} a otáčajúci sa obrobok pôsobí na superfinišovací kameň odporovým momentom veľkosti:

$$M_k = F_{pr} \cdot r_t \quad (12.4)$$

vystredenie r_t nám definuje uhol γ vzt'ahom:

$$\sin \gamma = \frac{r_t}{r} = \frac{2r_t}{D} \quad (12.5)$$

kde r je polomer a D priemer obrobku.

Uhol γ nazveme činný uhol superfinišovania. Zaved'me ďalej činný koeficient μ superfinišovacieho kameňa vzt'ahom:

$$\mu = \operatorname{tg} \gamma \quad (12.6)$$

takto tiež môžeme získať obvodovú zložku F_O a normálovú zložku F_N vystredenej prítlačnej sily F_{pr} :

$$F_O = F_{pr} \cdot \sin \gamma = F_{pr} \cdot \frac{\operatorname{tg} \gamma}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \gamma}} = \frac{\mu \cdot F_{pr}}{\sqrt{1 + \mu^2}} \quad (12.7)$$

$$F_N = F_{pr} \cdot \cos \gamma = F_{pr} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \gamma}} = \frac{F_{pr}}{\sqrt{1 + \mu^2}} \quad (12.8)$$

keď sme použili známe goniometrické identity vyjadrení funkcií sínus a kosínus pomocou funkcie tangens.

V uvedených vzt'ahoch (12.4) až (12.8) sme sa zaoberali situáciou v radiálnom reze obrobku. Priestorová situácia pri superfinišovaní je dosť komplikovaná, a preto sme tento problém previedli na dva rovinné prípady. V osovom reze je situácia taká, že obrobok je zaťažovaný kmitacou silou F_k , ktorej veľkosť na povrchu obrobku bude:

$$F_{kmax} = m \cdot a \cdot \omega^2 \quad (12.9)$$

Normálová zložka F_v pritlačnej sily vyvoláva odpor proti kmitavému pohybu nástroja a vzniká tam na povrchu odporová sila:

$$F_x = \mu_x \cdot F_N \cdot \sin \beta \quad (12.10)$$

kde μ_x je koeficient šmykového trenia medzi nástrojom a obrobkom a uhol β je známy uhol kríženia stôp po supefinišovaní.

13. Dosahované výsledky superfinišovania

Dôležitým faktorom ovplyvňujúcim výsledok superfinišovania je mazacia (vyplavovacia) kvapalina. Pre mazacie podmienky reprezentované hrúbkou kvapalinového filmu M_{kf} bol určený nasledovný vzťah:

$$M_{kf} = C \frac{\gamma \cdot v_o}{p_k} \quad (13.1)$$

kde C je bezrozmerná konštanta, ktorej hodnota je závislá od toho, či M_{kf} chceme v milimetroch alebo mikrometroch,

γ je dynamická viskozita mazacej kvapaliny (Pa.s),

v_o je obvodová rýchlosť obrobku (m/s),

p_k je tlak na superfinišovací kameň (Pa).

Pri veľkom tlaku p_k sa superfinišovacie kamene opotrebovávajú viac a prípadne sa i porušia, pri malom tlaku p_k sa otupené zrná superfinišovacieho kameňa zle uvoľňujú, kameň sa nanáša (jeho póry sa zaplnia odobratými časticami obrobku), zadiera a úber z obrobku rýchlo klesá. Dobrá mazacia kvapalina má nielen znižovať trenie medzi nástrojom a obrobkom, ale má i odplavovať odobrané častice obrobku i uvoľnené opotrebené zrná superfinišovacieho kameňa, a tým zvyšovať pracovnú (reznú) schopnosť nástroja a napokon i odvádzať teplo, ktorého však pri superfinišovaní vzniká málo. Preto túto kvapalinu nazývame mazacou, vyplavovacou, reznou a chladiacou. Pri prevádzke (exploatacii) osuperfinišovaných plôch pohybujúcich sa po sebe (napr. vo valivom ložisku) je dôležité, aby medzi oboma po sebe sa pohybujúcimi kovovými povrchmi existoval mazací film. Ide o to, aby sa tam mazací film mal o čo zachytiť a tým nebol tlakom po sebe sa pohybujúcich kovových povrchov z miesta ich kontaktu vytláčaný. Preto nie je výhodná veľmi vysoká hladkosť takýchto plôch (tzv. lesklá hladkosť), ale je vhodné, ak kontaktujúce sa plochy majú drobulinké krížkovanie (tzv. matná hladkosť), ktoré dosiahnu práve vhodnou voľbou kinematiky superfinišovania. Tento aspekt, ktorý superfinišovanie vznáša na opracovaný povrch, má význam celkom zrovnateľný s významom geometrickej presnosti i nízkej drsnosti osuperfinišovanej plochy.

Superfínišovanie je ako dokončovací spôsob obrábania taký spôsob obrábania, kde produktivita nie je prvoradá. Prvoradá je kvalita opracovanej plochy. Avšak využívaním superfínišovania pri hromadných výrobách (napr. výroba valivých ložísk) vynára sa a do popredia dostáva aj otázka produktivity superfínišovania.

Veľkosť prídavku P na superfínišovanie sa zvykne určovať podľa empirického vzťahu:

$$P = 10 \cdot Ra_p + 1 \quad (\mu\text{m}) \quad (13.2)$$

kde Ra_p je vstupná drsnosť (pred superfínišovaním).

Úber (hlbka odoberanej vrstvy) pri superfínišovaní sa nedá nastaviť, a preto sa musí vypočítavať. Hĺbkový úber bude teda zrejme závisieť od času superfínišovania t , tlaku na obrobok p_s (prítlačnej sily F_{pr}), uhlu kríženia stôp pri superfínišovaní 2β a stredného rozmeru hlavnej frakcie zrna superfínišovacieho kameňa d_z , prípadne i vstupnej drsnosti Ra_p . Táto sa pre superfíniš volí v rozmedzí $Ra_p = 0,3 \div 0,4 \mu\text{m}$. Čas superfínišovania má pre hĺbkový úber zvláštny význam. Na začiatku sa kameň zabeháva, čo trvá niekoľko málo sekúnd, počas ktorých úber rastie. V prvých sekundách (zabehnutý kameň už v 2 sekunde) je rýchlosť úberu najväčšia i najväčší úbytok drsnosti i najväčšia rýchlosť opotrebenia superfínišovacieho kameňa. Úber postupne klesá, nezastaví sa, ale stabilizuje (rýchlosť úberu konštantná).

Tlak na obrobok má pre hĺbkový úber dôležité postavenie. Pokiaľ by jeho hodnota bola príliš malá, superfínišovací kameň by sa mohol dostať mimo podmienok (hraníc) samostrenia, nakoľko otupené zrná by sa neodstraňovali, neobnovovali by sa póry a odoberanie materiálu by nemohlo prebiehať. Evidentný by bol iba zalešťovací proces. Pri príliš veľkom tlaku by sa predčasne vylamovali zrná z väzby superfínišovacieho kameňa, čím by dochádzalo ku kombinácii úberu s viazaným i voľným superfínišovacím zrnom (predčasne uvoľnené zrná sú ešte ostré) a klesala by aj kvalita osuperfínišovanej plochy, ba mohlo by dôjsť aj k porušeniu (poškodeniu) superfínišovacieho kameňa.

O význame ďalších faktorov sme sa už zmienili. Úber U možno určiť tradičným vzorcom empiricky zisteným:

$$U = C_u t^{x_1} \cdot p_s^{x_2} \cdot \beta^{x_3} \cdot d_z^{x_4} \quad (13.3)$$

kde x_1, x_2, x_3, x_4 sú exponenty a C_u je konštanta, ktoré sa musia určiť experimentálne. Vzorec (13.3) môžeme prepísať aj tak, aby bol rozmerovo homogénny

$$U = C_u \cdot \left(\frac{t}{t_o}\right)^{x_1} \cdot \left(\frac{p_s}{p_{s0}}\right)^{x_2} \cdot \left(\frac{\beta}{\beta_o}\right)^{x_3} \cdot \left(\frac{d_z}{d_{z0}}\right)^{x_4} \quad (13.5)$$

kde $t_o, p_{s0}, \beta_o, d_{z0}$ sú tzv. etalónové produkty (akési stredné) a umožnia, aby sme mali bezrozmerné faktory. Sú možné aj iné (zložitejšie) vzťahy pre hĺbkový úber. Pracovný proces superfinišovania je veľmi krátky (6 - 60 sekúnd). Prídavok nechaný na úber superfinišovaním býva 3 až 10 μm (na priemer).

Obvodová rýchlosť súčiastky býva $v_o = 15 - 30 \text{ m/min}$, stredná rýchlosť kmitania kameňov $v_{k\emptyset}$ býva $7 \div 30 \text{ m/min}$, veľkosť amplitúdy kmitania $a = 2 \div 6 \text{ mm}$, frekvencia kmitania býva $f = 1500 \div 3000 \text{ min}^{-1}$. Merný tlak superfinišovacích kameňov býva 0,2 - 1,5 MPa. Pozdĺžny posuv býva malý 2 - 4 mm (zdvih pozdĺž súčiastky, s frekvenciou tak 10 - 60 min^{-1}). Pri ultrazvukovom superfinišovaní používame ešte prídavné kmity 20 \div 30 kHz s amplitúdou 5 - 15 μm . Pri elektrolytickom superfinišovaní je elektrolyt 5 - 15 % roztok NaCl s prísadou 0,5 % NaNO_3 , prúd do 70 A, plošná hustota prúdu do 30 A/cm^2 .

Superfinišovaním možno dosahovať drsnosť obdobnú lapovaniu za predpokladu, že použijeme také jemné superfinišovacie kamene, ako sú zrnité príslušné lapovacie pasty. Bežná dosahovaná drsnosť býva 0,08 - 0,12 μm (Ra). Taktiež presnosť rozmerov a tvaru je vysoká a môžeme uvažovať aj o stupni presnosti IT 1. Superfiniš vyžaduje od predchádzajúcich operácií niektoré hodnoty (hranatosť a pod) už takmer v konečných hodnotách. Superfiniš nie je operácia na vylepšenie nedostatkov po predchádzajúcich operáciách a vyžaduje dobrú technologickú disciplínu. Superfinišovanie ako najvhodnejší proces dokončovacieho obrábania je také výhodné, že výrobu niektorých súčiastok (napr. súčiastok valivých ložísk) si inak ako superfinišovaním nevieme ani predstaviť. Superfinišovanie je perspektívny spôsob dokončovacieho obrábania, ktorého význam v priemysle sa bude neustále zvyšovať.

Záver

V súčasnosti je obrábanie stále základnou technológiou na výrobu strojárskych súčiastok. Toto dominantné postavenie si obrábanie bude udržiavať aj naďalej, pretože narastajú požiadavky na rozmerovú presnosť a akosť (kvalitu) povrchu súčiastok. Čo obrábanie „stratí“ v oblasti „milimetrových rozmerov“, napr. na konto zvyšovania kvality procesov tvárnenia, „získa“ v oblasti „mikrometrových rozmerov“. Nové úlohy v obrábaní súvisia aj so zavádzaním nových kvalitnejších (tvrdších, pevnejších) strojárskych materiálov, ako sú vysokopevné, žiarupevné, žiaruvzdorné, oteruvzdorné, antikorózne a iné materiály, ktoré sa spravidla horšie obrábajú, čo na druhej strane podnecuje rozvoj nových rezných materiálov, ale i metód, strojov i prostredia (s reznými kvapalinami, ale i bez nich).

Vývin nových technologických metód v obrábaní podnecuje aj pokroky vo fyzike, fyzikálnej chémii a chémii. Pri ich aplikácii do technologických procesov sa docieľujú prekvapujúce výsledky a mnohé unikátne riešenia, umožňujúce obrábať s takými parametrami a výsledkami, ktoré pred časom nielenže neboli dosiahnuteľné, ale ani mysliteľné.

Dokončovacie obrábanie je perspektívny odbor, ktorý treba spoznávať a rozvíjať v dostatočnom predstihu pred naliehavými potrebami a požiadavkami strojárskej (a nielen strojárskej) praxe.

Doslov

Ak pozorný čitateľ rad za radom dospel až k týmto riadkom, tak si už iste vytvoril názor na obsah predložených skrípt. Dúfame (ak ide o študenta), že pochopil, čo sú a načo sú dokončovacie spôsoby obrábania. Znalejší čitateľ možno v našom texte bude postrádať také, či onaké údaje, avšak treba mať na pamäti, že tieto skriptá vychádzajú zo schváleného učebného programu rovnomenného predmetu na Materiálovotechnologickej fakulte STU, že tu existuje súvis aj s inými predmetmi tejto fakulty, ako sú *Progresívne metódy obrábania*, *Nekonvenčné, Netradičné* (či inak nazvané fyzikálne a chemické) *metódy obrábania* a iné. Len v spojitosti s týmito predmetmi možno získať to, čo zbehlejší čitateľ potrebuje. Snaživejšiemu čitateľovi dostupnosť uvedených skrípt z MtF, či z inej proveniencie iste nebude robiť problémy. Ak sme v nami vymedzenom rámci poskytli čitateľovi postačujúce informácie, splnili naše skriptá svoj cieľ.

V Trnave 18.9.1999

Doc. Ing. Zdenko Lipa, CSc.

Prof. Ing. Alexander Janáč, CSc.

autori

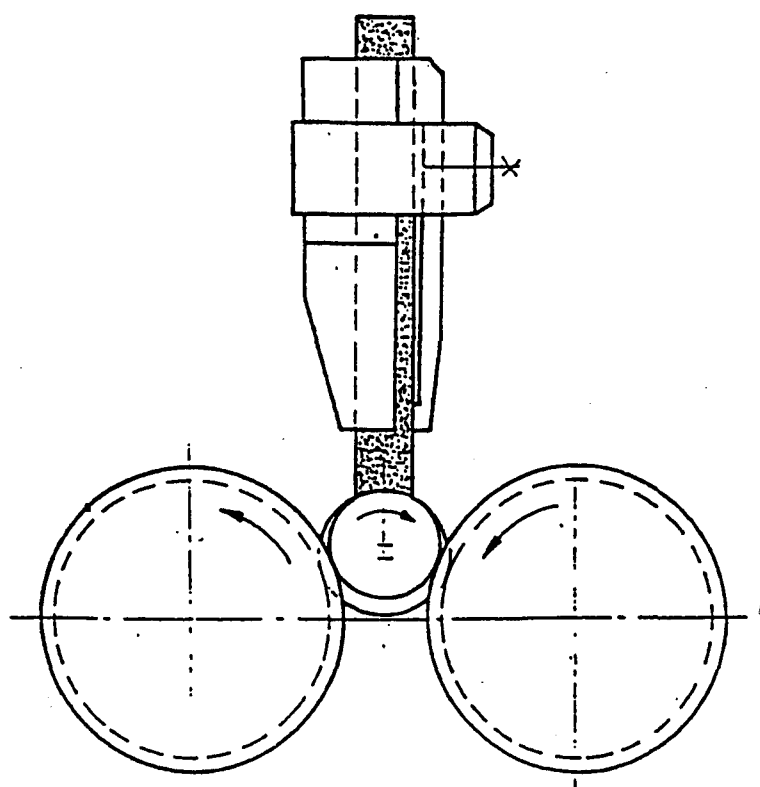
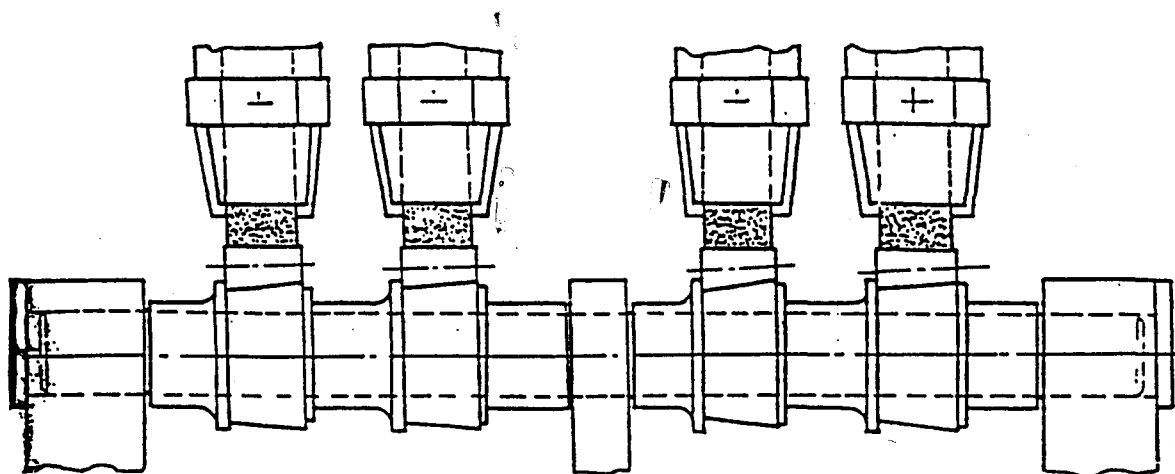
Literatúra

1. Hrubec, J.: Špeciálna technológia II. Progresívne technologické metódy v obrábaní a ich prostriedky. II. vyd. ES SVŠT Bratislava 1990.
2. Havlíček, J. - Kouřil, M. - Spáčilová, J.: Polykryštalické supertvrde materiály pro třískové obrábění. In.: Zborník Nástrojové materiály, Ostrava 1994.
3. Hrubý, V.: Povlaky nástrojových ocelí na báze Cr - Dia a Cr - KNB. In: Zborník Nástrojové materiály Ostrava 1994.
4. Gašpárek, I.: Dokončovacie spôsoby obrábania. ALF Bratislava 1979.
5. Janáč, A. - Kicko, J. - Lipa, Z. - Charbula, J. - Peterka, J.: Technológia obrábania - Návod na cvičenia. Vyd. STU Bratislava 1994.
6. Juříček, V.: Tvarové kotúče z KNB s keramickým spojivom. In.: Zborník Brúsenie III DT ZSV TS Bratislava 1991.
7. Kocman, K.: Speciální technologie. Obrábění. PC DIR Brno 1993.
8. Lipa, Z.: Formulácia a riešenie vybraných problémov teórie superfinišovania. Habilitačná práca MtF STU Trnava 1991.
9. Matějka, B. - Máca, J.: Technológia valivých ložísk. Obrábanie. ALFA Bratislava 1984.
10. Maslov, J. N.: Teorie broušení kovů (upravil a doplnil F. Neckář). SNTL Praha 1979.
11. Míkovec, M.: Obrábění materiálů s velkou pevností a tvrdostí. SNTL Praha 1982.
12. Podjuklová, J. - Kopecký, J. - Novosad, L.: Povlakování materiálů nástrojových. In.: Zborník Nástrojové materiály Ostrava 1994.
13. Skočovský, M. a kol.: Superfinišování vnitřních a vnějších ploch. DTČSVTS Brno 1977.
14. Švaral, Š.: Obrábanie nástrojmi z diamantu KNB. ALFA Bratislava. 1977.
15. Vasilko, K. a kol.: Nové materiály a technológie, ich spracovania. ALFA Bratislava 1990.
16. Prospekty fy.: Pramet, Walter, De Beers, General Electric, Supfina, Thielenhaus a i.
17. Normy STN ISO 3002-1, 3002-2, 3002-3, 3002-4, 3002-5.

Obrazová příloha

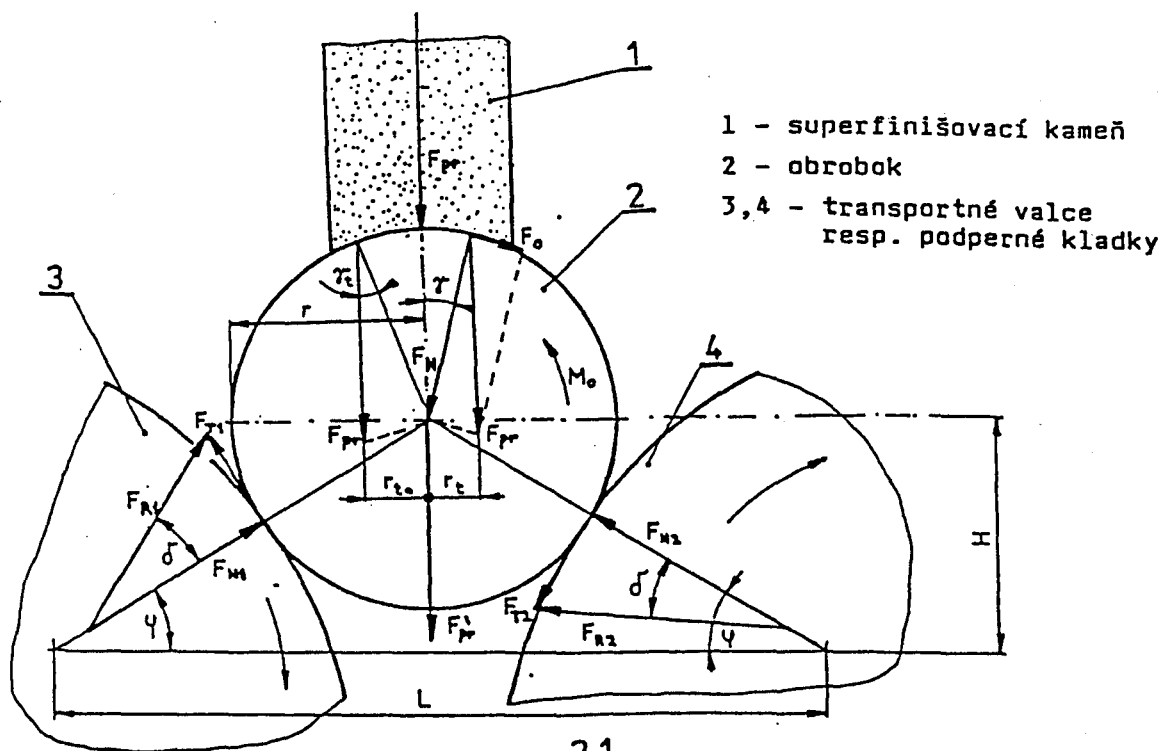
1. POROVNANIE SUPERFINIŠOVANIA S INÝMI SPÔSOBAMI OBRÁBANIA (PODĽA Swigerta jr.)

	SÚSTRUŽENIE	BRÚSENIE	HONOVANIE	LAPOVANIE	SUPERFINIŠOVANIE
SPÔSOB OBRÁBANIA					
TEORETICKÝ PROFIL					
OBROBENÝ POVRCH					
PROFIL OBROBENÉHO POVRCHU					

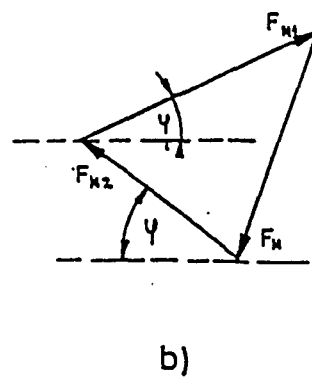
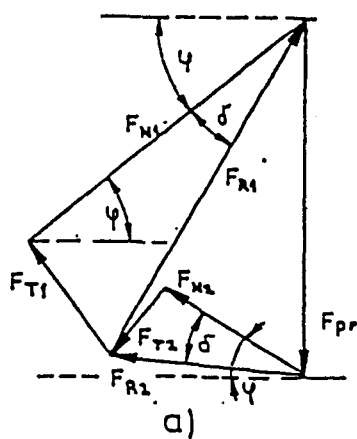


2. Princíp zápichového superfinišovania kužeľíkov

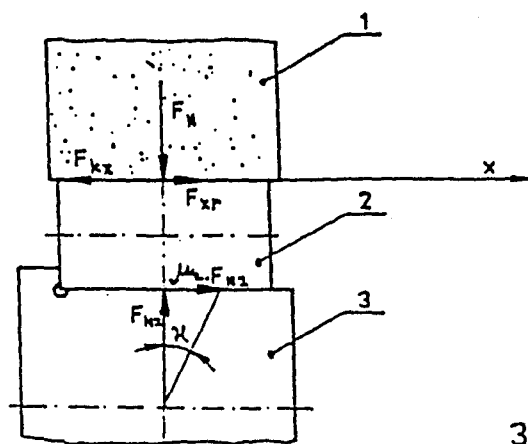
3. Dynamické pomery superfinišovania



3.1.
Silové pomery

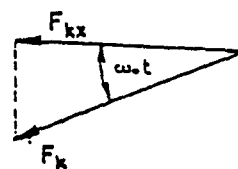
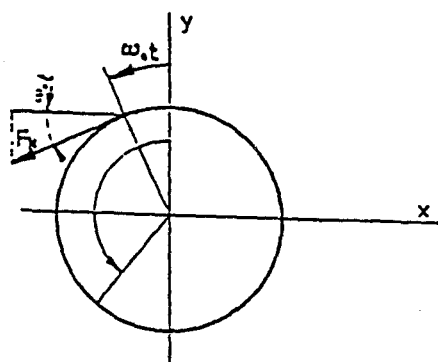


3.2.
Rozklad síl

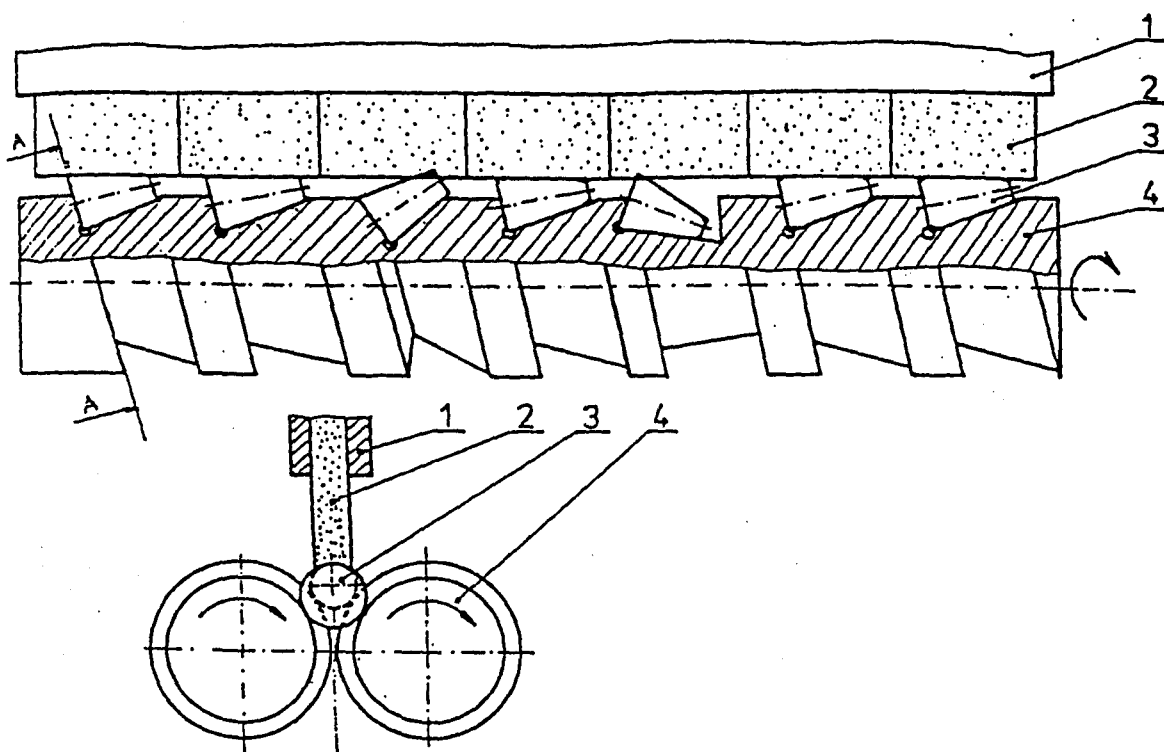


- 1 - superfinišovací kameň
- 2 - obrobok
- 3 - podperná kladka

3.3.
Sily v axiálnej rovine



3.4.
Rozklad síl

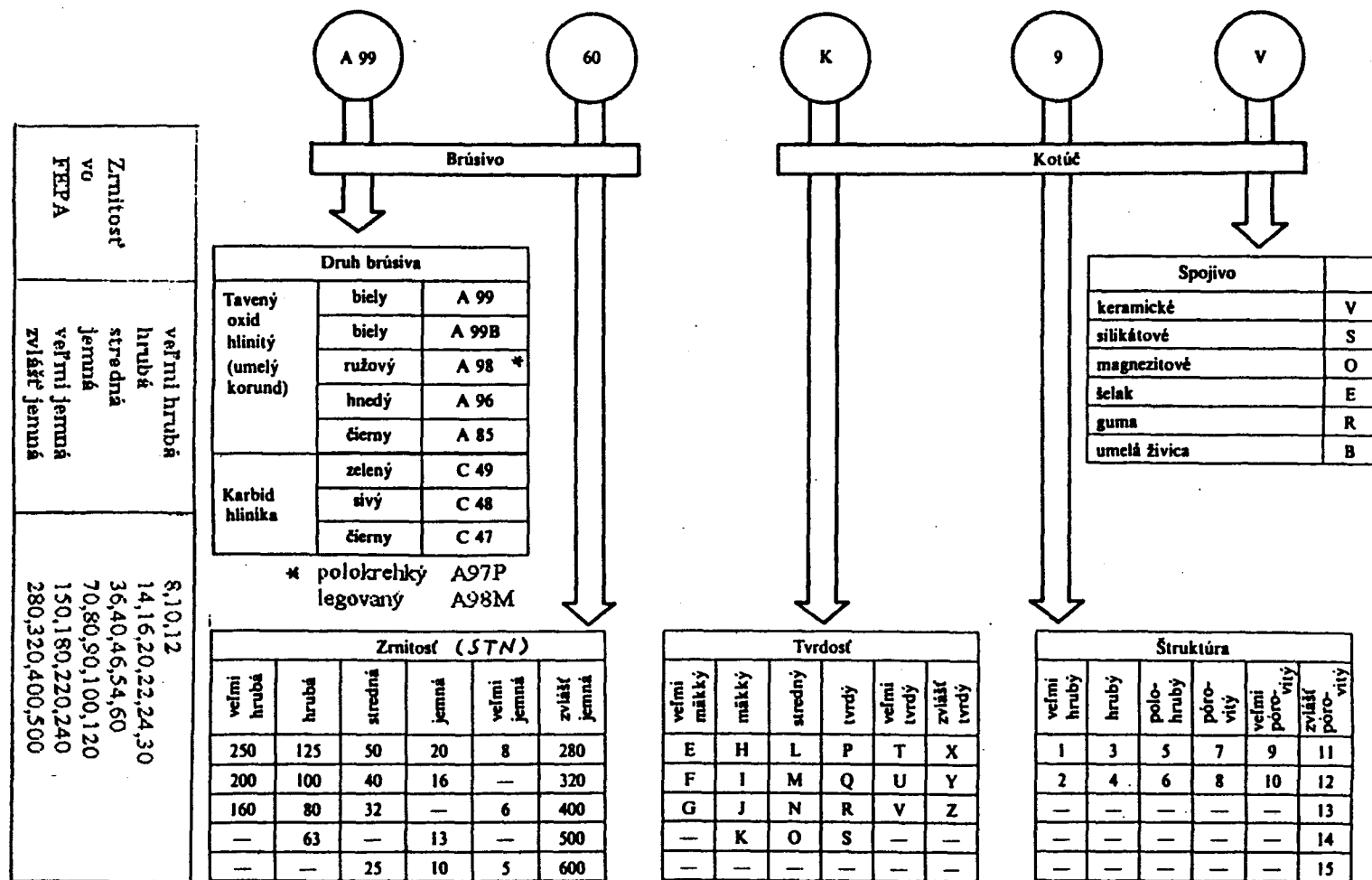


Schematický rez A-A


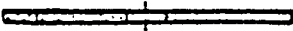

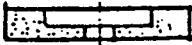

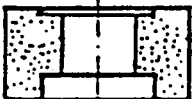


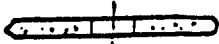
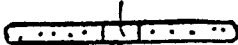
- 1 - držiak superfinišovacieho kameňa
- 2 - sada superfinišovacích kameňov
- 3 - kuželík
- 4 - transportné valce





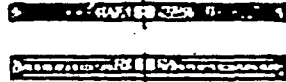
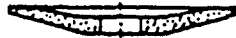
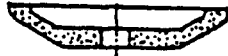


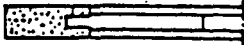
4. Priebežný superfiniš pláštá modifikovaných kuželíkov

5. OZNAČOVANIE BRÚSIACICH KOTÚČOV



BRÚSIACE KOTÚČE
PREHEAD

Názov	Zobrazenie
Ploché brúsiace kotúče	
Rezacie a drážkovacie kotúče	
Brúsiace kotúče s jednostranným vybraním	
Brúsiace kotúče na ostrenie vrtákov	
Brúsiace kotúče so skoseným vybraním	
Podávacie kotúče pre bezhrotové brúsky	
Prstencové brúsiace kotúče	
Jednostranne skosené brúsiace kotúče	
Obojstranne skosené brúsiace kotúče	
Zaoblené brúsiace kotúče	

Názov	Zobrazenie
Hrncové brúsiace kotúče	
Hrncové brúsiace kotúče s veľkým otvorom	
Miskové brúsiace kotúče	
Kuželové brúsiace kotúče	
Brúsiace kotúče na strmeňové kalibry	
Tanierové brúsiace kotúče	
Brúsiace kotúče na frézy na drevo	
Brúsiace kotúče na brúsenie ozubených kolies	
Brúsiace kotúče na obuvnícke frézy	
Brúsiace kotúče na kameně	

VEĽKOSŤ DRTENÉHO BRÚSNEHO MATERIÁLU

Zrornosť brúsnych nástrojov sa označuje podľa FEPA. Táto norma nahradzuje všetky doterajšie normy. Ide o normu medzinárodne označenú FEPA "F". "F" je označenie zrna pre výrobu brúsnych nástrojov. Norma FEPA vychádza z noriem ISO, ale je podrobnejšie usporiadaná.

Prevodová tabuľka STN 224012 a FEPA "F"

Staré označenie podľa STN 22 40 12	Označenie podľa FEPA "F"	Merný rozmer zrna v mikrometroch
250	8	2800-2360
200	10	2360-2000
160	12	2000-1700
125	14	1700-1400
119	16	1400-1180
100	20	1180-1000
80	22	1000- 850
71	24	850- 710
63	30	710- 600
50	36	600- 500
40	40	500- 425
35	46	425- 355
32	54	355- 300
25	60	300- 250
20	70	250- 212
16	80	212- 180
13	90	180- 150
12	100	150- 125
10	120	125- 106
8	150	106- 90
7	180	90- 75
6	220	75- 63
5	240	63- 53
4	280	53- 45
3	320	45- 32
M32	400	17,5- 15,5
M22	500	13,3- 11,3
M15	600	10,0- 8,0
M10	800	7,3- 5,3
M 7	1000	5,3- 3,7
M 5	1200	3,6- 2,6

Obsah obrazovej prílohy

1. Porovnanie superfinišovania s inými spôsobmi obrábania (podľa Swigerta jr.)	73
2. Princíp zápichového superfinišovania kuželikov	75
3. Dynamické pomery supefinišovania	77
4. Priebežný superfiniš plášťa modifikovaných kuželikov	81
5. Označovanie brúsiacich kotúčov	83
Brúsiace kotúče, prehľad	85
Veľkosť drteného brúsneho materiálu	89

Obsah

Predhovor	3
Úvod	5
1. Miesto a účel dokončovacích spôsobov v obrábaní. Klasifikácia dokončovacích spôsobov obrábania.	8
2. Jemné sústruženie, jemné vyvrtávanie, vystružovanie, používané parametre, dosahované výsledky.	11
2.1 Základné pojmy podľa ISO 3002-1	11
2.2 Jemné sústruženie	12
2.3 Ultrapresné sústruženie	14
2.4 Jemné vyvrtávanie	14
2.5 Vystružovanie	15
3. Jemné frézovanie, zaškrabávanie, používané parametre, dosahované výsledky	16
3.1 Základné pojmy podľa ISO 3002-1	16
3.2 Jemné frézovanie	16
3.3 Zaškrabávanie	18
4. Bežné brúsenie a jemné brúsenie, používané parametre, dosahované výsledky.	19
4.1 Všeobecné definície a označenia podľa ISO 3002-5	19
4.2 Základné údaje o brúsení	24
4.3 Brúsne nástroje	25
4.4 Výber dokončovacích operácií	30
4.5 Podmienky a výsledky brúsenia	31
4.6 Vývojové smery v brúsení	33
5. Leštenie, hľadenie, používané parametre, dosahované výsledky.	36
5.1 Leštenie	36
5.2 Hľadenie	38
6. Honovanie, honovacie stroje, honovacie nástroje.	39
6.1 Základné údaje o honovaní	39
6.2 Honovacie stroje	40
6.3 Honovacie nástroje	41

7. Podmienky honovania, používanie parametru honovania, dosahované výsledky.	42
7.1 Podmienky honovania	42
7.2 Výsledky honovania	44
8. Lapovanie, lapovacie stroje, lapovacie nástroje.	46
8.1 Základné údaje o lapovaní	46
8.2 Lapovacie stroje	47
8.3 Lapovacie nástroje	47
9. Podmienky lapovania, používané parametre lapovania, dosahované výsledky.	49
9.1 Podmienky lapovania a dosahované výsledky	49
9.2 Zvláštne spôsoby lapovania	50
10. Superfinišovanie, definícia a spôsoby, superfinišovacie stroje a nástroje.	52
10.1 Základné údaje o superfinišovaní	52
10.2 Superfinišovacie stroje	53
10.3 Superfinišovacie nástroje	53
11. Kinematické pomery superfinišovania.	55
12. Dynamické pomery superfinišovania.	60
13. Dosahované výsledky superfinišovania.	64
Záver	67
Doslov	68
Literatúra	69
Obrazová príloha	71
Obsah obrazovej prílohy	91
Obsah	93

Doc. Ing. Zdenko Lipa, CSc. – Prof. Ing. Alexander Janáč, CSc.

DOKONČOVACIE SPÔSOBY OBRÁBANIA

1. vydanie

Náklad 120 výtlačkov

94 strán, 7 obrázkov, 5,387 AH, 5,541 VH

Edičné číslo 4806

Tlač Vydavateľstvo STU v Bratislave

Rok vydania 2000

85 - 219 - 2000

ISBN 80-227-1324-4