

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 217

ISSN 1213-418X

Imrich Lukovics

RYCHLOSTNÍ BROUŠENÍ NÁSTROJŮ A NÁŘADÍ

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta strojního inženýrství

Ing. Imrich Lukovics, CSc.

RYCHLOSTNÍ BROUŠENÍ NÁSTROJŮ A NÁŘADÍ

HIGH-SPEED GRINDING OF TOOLS AND TOOLING

ZKRÁCENÁ VERZE HABILITAČNÍ PRÁCE



BRNO 2006

KLÍČOVÁ SLOVA

Broušení, rychlostní broušení, brousící kotouče, jakost, zbytkové napětí.

KEY WORDS

Grinding, High-speed Grinding, Grinding Wheel, Quality, Residual Stress.

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE

Vysoké učení technické v Brně
Fakulta strojního inženýrství
Oddělení vědy a výzkumu
Technická 2
616 69 Brno

OBSAH

PŘEDSTAVENÍ AUTORA.....	4
1 ÚVOD	5
2 STUDIE TECHNOLOGICKÝCH A EKONOMICKÝCH VÝHOD RYCHLOSTNÍHO BROUŠENÍ.....	6
3 BROUSÍCÍ KOTOUČE PRO VYSOKÉ ŘEZNÉ RYCHLOSTI.....	7
3.1 TVAROVÁNÍ BROUSÍCÍCH KOTOUČŮ	8
3.2 NOVÉ MATERIÁLY VE VÝROBĚ BROUSÍCÍCH KOTOUČŮ	9
4 VÝSLEDKY BROUŠENÍ ZVLÁŠTĚ VYSOKOU ŘEZNOU RYCHLOSTÍ	11
4.1 VLIV TECHNOLOGICKÝCH PODMÍNEK NA VÝSLEDKY BROUŠENÍ.....	11
4.1.1 Odebrané množství materiálu při rychlostním broušení.....	11
4.1.2 Dynamické podmínky při rychlostním broušení.....	12
4.1.3 Nedokonalosti povrchu broušené plochy	13
4.1.4 Trvanlivost a opotřebení brousících kotoučů.....	13
4.1.5 Tvarová přesnost výrobků.....	14
4.1.6 Zbytkové napětí v broušené ploše	15
5 VYUŽITÍ RYCHLOSTNÍHO BROUŠENÍ V PRAXI.....	16
6 ZÁVĚR.....	17
7 LITERATURA.....	19
8 ANOTACE.....	20

PŘEDSTAVENÍ AUTORA

Ing. Imrich Lukovics, CSc.

- Datum narození:** 7. 8. 1946, Mostová
- Dosažené vzdělání:** 1960 – 1964 Střední průmyslová škola strojní Košice
1964 – 1969 VUT v Brně,FS, Konstrukce obráběcích a tvářecích strojů, diplom s vyznamenáním
1970 – 1973 Vědecká aspirantura, VUT v Brně FS, obhájena v r.1976
1985 – VUT v Brně, FS, jmenování docentem
- Průběh praxe:** 1969 – 1970 ZVL Skalica, Odd. technického rozvoje
1973 – 1981 ZVL, n.p. Skalica, Oddělení technického rozvoje, působil ve funkcích vývojového pracovníka, vědeckého pracovníka, vedoucího výzkumného pracovníka
1981 – 2000 VUT v Brně, Fakulta technologická ve Zlíně, Katedra gumárenské a plastikářské technologie, odborný asistent, v roce 1985 jmenován docentem pro obor Strojírenská technologie, od r. 1997 do 2000 působil ve funkci proděkana pro výstavbu, později pro zahraniční styky a propagaci, byl též členem vědecké rady FT
2001 – dosud UTB ve Zlíně, Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství, docent
- Vedení úspěšně obhájených doktorských prací:** 4 (Sýkorová, L., Bělák, V., Růžička, Z., Maňas,D.)
- Vedení úspěšně obhájené diplomové práce:** 42
- Vedení úspěšně obhájené bakalářské práce:** 30
- Vydaná skripta:** 5 titulů
- Působení v zahraničí:** jeden měsíc 2002, TU Wien,
jeden měsíc 2002, 2005 TU Miskole
jeden měsíc 2003, 2005 TU Krakow
jeden měsíc 2003, 2006 TU Košice

Zaměření vědeckovýzkumné a odborné činnosti:

Problematika dokončovacích operací, zvláště broušení, a otázky aplikace nekonvenčních metod obrábění při zpracování kovů a polymerních materiálů.

Autor nebo spoluautor patnácti publikací v mezinárodních vědeckých časopisech, dvou autorských osvědčení realizovaných v průmyslu, sedmdesáti příspěvků ve sborníku mezinárodních vědeckých konferencí, stodvanácti příspěvků na národních konferencích, dvaceti publikací v odborných časopisech. Je členem redakční rady dvou časopisů a několika organizačních a vědeckých výborů vědeckých konferencí.

1 ÚVOD

Výrobní možnosti průmyslu jsou do značné míry ovlivněny úrovní použité technologie, mechanizací a automatizací výrobního procesu. Od technologie očekáváme účelnější využití současných možností již známých, tradičních metod a výraznou intenzifikaci těchto způsobů výroby. Literární prameny české i zahraniční v poslední době mnohem častěji pojednávají o možnostech zvyšování řezné rychlosti a tím i výkonu obrábění. Je to nejvýznamnější směr ve vývoji teorie a praxe obrábění. Skutečnou revolucí v technologii obrábění je vysokorychlostní obrábění (HSC - High Speed Cutting). Samotná technologie vyvolala hlubší výzkum řezného procesu, nástrojů a strojů. Výsledkem těchto snah je generační krok v intenzifikaci, racionalizaci, produktivitě a integraci procesu řezání.

Oblast vysokorychlostního obrábění pro jednotlivé obráběné materiály jsou uvedeny v tab. 1. Uvedené hodnoty jsou orientační a jsou dále ovlivněny metodou obrábění. HSC obrábění se bude realizovat zejména na CNC strojích, například při obrábění různých druhů forem, zápustek, nástrojů, atd. Na tyto výrobky jsou relativně vysoké požadavky na rozměrovou a tvarovou přesnost a na ostatní kvalitativní charakteristiky.

Tab. 1 Oblast použití vysokorychlostního obrábění

Materiál	Vysokorychlostní obrábění [m.min ⁻¹]	Broušení [m.min ⁻¹]
Ocel	800 - 1100	1800 - 24000
Litina	900 - 1600	1200 - 10000
Slitiny AJ	3000 - 6000	1800 - 10000
Plasty zpevněné vlákny	2800 - 8000	1800 - 12000
Bronz, mosaz	1100 - 3000	1800 - 18000

Výrobní stroje a nástroje, které se používají pro vysokorychlostní obrábění dovolují aplikaci mnohem progresivnějších technologických podmínek a tím vysoké kvality obráběného povrchu, objem odebraného materiálu za minutu vzroste až pětkrát. Se zvyšováním řezné rychlosti se zvětšuje úhel střížné roviny, zmenšuje se primární plastická deformace v oblasti tvoření třísky, zmenšuje se pěchování třísky což vede k poklesu třecích sil (sekundární plastická deformace); zároveň se též zmenšuje délka styku třísky s čelem řezného nástroje. Přitom, ale vzrůstá rychlost odchodu třísky po čele, zkracuje se doba styku třísky a řezného klínu. Tyto jevy obecně vedou, po překročení určité mezní rychlosti, k poklesu teploty v místě řezání a ke snížení tepelného ovlivnění nástroje. Důsledkem použití vysokých řezných rychlostí je obrobek s menšími rozměrovými změnami zapříčiněné teplotou (přesnější výrobek) a s příznivějším charakterem zbytkových napětí v povrchové vrstvě.

Tyto obecné zásady se objevují též u broušení kovů a polymerů. Bude proto nutné zaměřit se hlavně na oblast broušení vysokou rychlostí jež výrazně převyšuje současně používané technologické podmínky. Významnou omezující podmínkou je však pevnost a bezpečnost rotujících brousících kotoučů. (V současné době se řezná rychlost při broušení ustálila na hodnotě 30 ms⁻¹ (1800 mmin⁻¹)). Je třeba proto vyvinout nové bezpečnější materiály brousících kotoučů a nové tvary, případně jiná konstrukční provedení brousících nástrojů umožňujících aplikaci zvláště vysokých řezných rychlostí.

2 STUDIE TECHNOLOGICKÝCH A EKONOMICKÝCH VÝHOD RYCHLOSTNÍHO BROUŠENÍ

V poslední době se výrazně zvyšuje počet publikací a výzkumných úkolů v oblasti rychlostního obrábění, též v technologii dokončování. Jednou z nejdůležitějších dokončovacích operací je broušení, které kromě klasického způsobu obrábění stále více vystupuje do popředí jako alternativa ostatních druhů obrábění. Tyto náročné podmínky, jak ukazují teoretické rozbory a provedené experimenty úspěšně naplňuje broušení zvláště vysokou řeznou rychlostí, to je rychlostí nad 100 ms^{-1} .

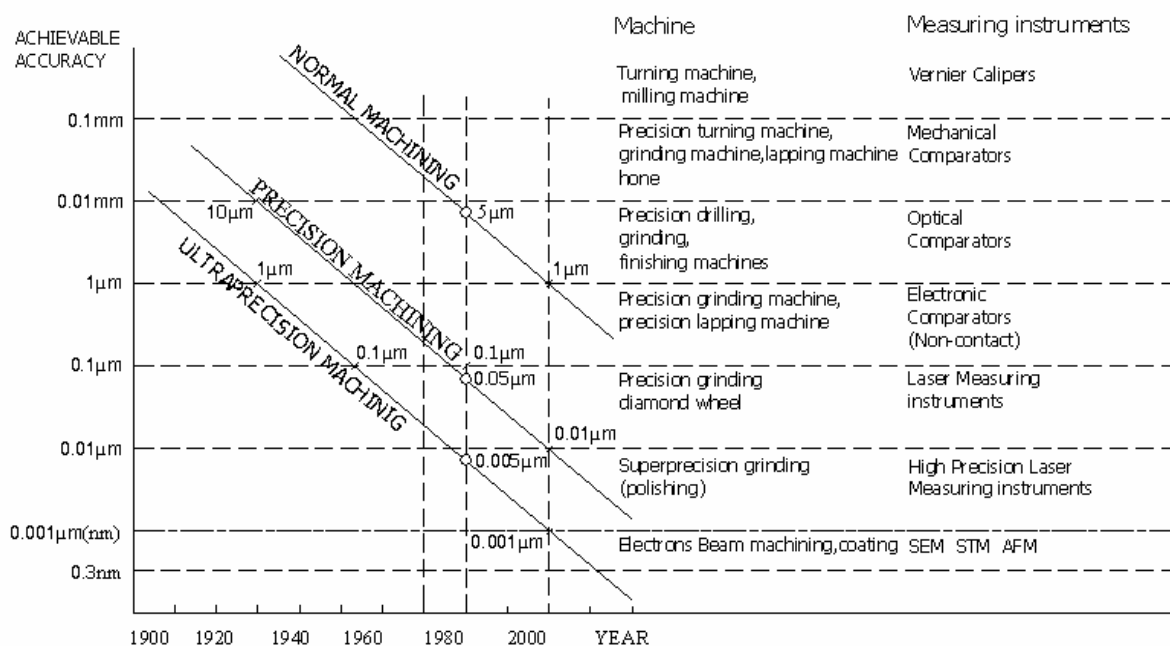
Velký význam a limitující vliv při intenzifikaci procesu broušení mají fyzikálně mechanické charakteristiky řezného nástroje, který je vícekomponentní materiál se značnou pórovitostí a co nejvhodnější stanovení technologických parametrů zvláště řezné rychlosti, obvodové rychlosti obrobku, posuvu, přísuvu a pomocných funkcí (chlazení, orovnávání atd.).

Základním kritériem efektivnosti technologických operací je výkon: u třískových technologií je to odebrané množství materiálu nebo velikost obrobenej plochy. Při výkonném zápichovém broušení lze odebrané množství materiálu Q vyjádřit rovnicí:

$$Q = C_b \cdot Q_e \cdot z \cdot \delta_k \cdot v_o^x \cdot v_k^y,$$

kde C_b je konstanta, Q_e je elementární objem odbroušeného materiálu na 1 zrn, z je počet zrn v objemové jednotce, δ_k je opotřebenění kotouče, v_o je rychlost obrobku a v_k je řezná rychlost.

Rozbor rovnice ukazuje, že za předpokladu stejné dynamiky řezného procesu výkon (odebrané množství materiálu), se exponenciálně zvyšuje s řeznou rychlostí. Experimentálně zjištěné výsledky této závislosti mají parabolický průběh. Podobný, parabolický, je průběh výkonu za předpokladu zachování konstantní drsnosti povrchu. Tyto skutečnosti a zvláště výhoda exponenciálního zvyšování brusného výkonu nás nutily, abychom řešili problematiku zvyšování řezné rychlosti při broušení.



Obr. 1 Oblasti přesného obrábění

Koncem 20. století se výrazně zvýšilo použití polymerních materiálů, hlavně v oblasti automobilového průmyslu, elektrotechniky a elektroniky, ve spotřebním průmyslu, ve zdravotnictví, atd. Tyto výrobky jsou zhotovené ve vstřikovacích formách. Jakost povrchů těchto forem a rozměrová přesnost v současné době je na úrovni mikrotechnologií a předpokládá se v budoucnu výroba nářadí v nanopřesnosti. Nanotechnologie je definována jako výroba s rozměrovou přesností a jakostí od 0,1 do 10 nanometrů, což je oblast velikosti molekul případně atomů. S touto přesností je nutné pak vyrábět díly strojů, nástrojů též kontrola přesnosti výrobků musí být v těchto hodnotách. Prof. Tanagushi (1983) vypracoval prognózy vývoje obrábění a kontroly výroby pro příští léta.

Prognóza vývoje dle tohoto grafu předpokládá, že začátkem 21. století běžná technologie dokončování bude v oblasti mikrogeometrické přesnosti a jemné dokončovací operace v oblasti přesnosti 0,01 až 0,001 μm (nanopřesnost). Prognózy předpokládají též, že dodržení této přesnosti je možné pouze aplikací broušících nástrojů, případně elektrickými metodami obrábění.

Těchto výsledků však lze dosáhnout pouze aplikací zvláště vysokých rychlostí při broušení. Výsledky studií a experimentálního šetření lze shrnout do následujících bodů:

a) Při zvyšující se řezné rychlosti radiální síla klesá. Vyplývá to ze skutečnosti, že síla působící na jedno zrno klesá v důsledku zmenšující se tloušťky třísky a protože v řezné zóně, za předpokladu konstantních kinematických podmínek, je stejný počet broušících zrn jak u běžného způsobu broušení, je výsledná řezná síla rovněž menší. Jsou tedy menší deformace, zlepši se tvarová a rozměrová přesnost výrobku.

b) Se zvyšováním řezné rychlosti se zlepšuje jakost obráběného povrchu v důsledku toho, že jednotlivá broušící zrna odebírají menší část materiálu, čímž se zmenšuje hloubka rysky způsobená zrnem.

c) Jak je popsáno v odstavci „a“ snižuje se namáhání jednotlivých zrn, tím se nepřímo zlepšuje řezivost kotouče, snižuje se opotřebení, zvětší se trvanlivost broušících nástrojů.

Velmi důležitým faktorem pro posouzení výhod rychlostního broušení je výkon, doba obrábění a cena broušícího pochodu. Jak dokazují teoretické závěry různých autorů [3,4,6,10,11,15,17,20] a výsledky experimentů, zvyšování řezné rychlosti přináší kromě již zmíněných výhod také finanční efekt.

Další výhodou zvyšování řezné rychlosti je, že se změní charakter zbytkových napětí a objevují se tlaková zbytková napětí. Taková plocha lépe snáší cyklické namáhání a měla by mít vyšší mez únavy.

3 BROUSÍCÍ KOTOUČE PRO VYSOKÉ ŘEZNÉ RYCHLOSTI

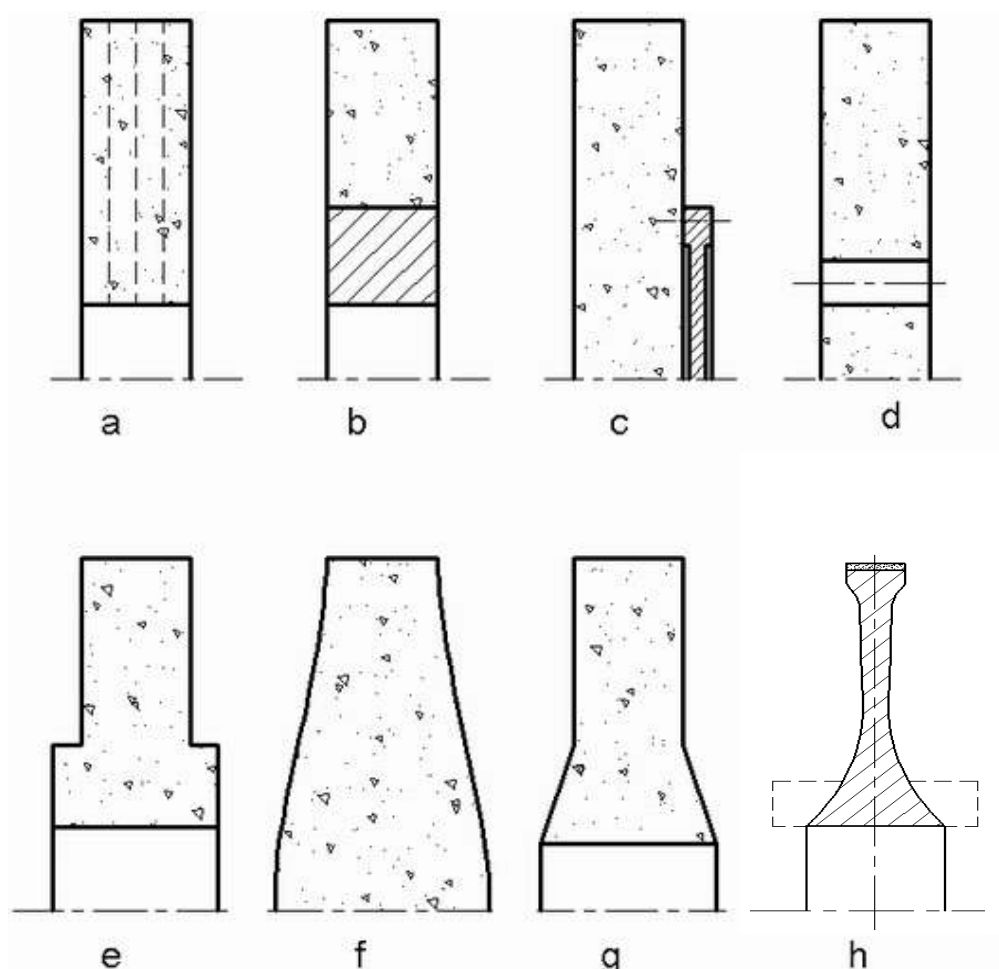
Krátký přehled stavu a vývoje broušení vyšší řeznou rychlostí dokazuje opodstatněnost výzkumu tohoto způsobu obrábění. Někteří výrobci obráběcích strojů již dodávají brusky pro rychlostní broušení vyznačující se vyšší tuhostí, bezpečnějším krytováním, zvýšením posunových a přisunových rychlostí, vydatnějším chlazením atd.

Autor tohoto příspěvku prováděl rozsáhlý výzkum zaměřený na stanovení pevnosti broušících nástrojů za rotace, výsledkem kterého jsou dva nové patentované tvary broušících nástrojů z dosud užívaných broušících materiálů, vhodných pro rychlostní a superrychlostní broušení. (pozn.: pojmem zvláště vysoké řezné rychlosti označuje autor řezání s v_k vyšší než 100 ms^{-1}).

K tomu, abychom mohli posoudit vhodnost různých tvarů kotoučů pro dané řezné rychlosti, je nutné znát napjatost v broušícím nástroji a vliv jednotlivých faktorů na kritickou (mezní) řeznou rychlost. Na základě toho lze možnosti zvýšení odolnosti nástrojů proti roztržení za rotace realizovat převážně těmito způsoby.

3.1 TVAROVÁNÍ BROUSÍCÍCH KOTOUČŮ

Z rovnic obvodového a radiálního napětí, u kotouče konstantní tloušťky, vyplývá nevýhodné rozložení napětí podél poloměru kotouče, což omezuje použití vysokých obvodových rychlostí. Aby se dosáhlo vyšší rychlosti, dělají se kotouče proměnné tloušťky, jež se zmenšuje od středu kotouče k obvodu. Nejvhodnější tvar kotouče by odpovídal provedení rotujícího kotouče stejné pevnosti. Vyrobit exponenciální tvar bloku kotouče je však obtížné; problematické by bylo též upnutí tohoto nástroje. Vhodnější je námi patentovaný tvar nástroje.



Obr. 2 Tvarování brousících kotoučů

Zesílíme-li kotouč v nebezpečném místě kuželovou plochou (viz Obr. 2g), zvyšujeme tím vlastně bezpečnost dvojitě cestou. Nejenom že se působení odstředivé síly zachytí kuželovými přírubami, ale také vlivem různých roztažností dotýkajících se materiálů se vytvoří na styčných kuželových plochách tlakové napětí, jehož radiální složka snižuje nebo zcela neguje vliv tahového napětí vznikající kolem otvoru vlivem rotace. Tento tvar kotouče a způsob upnutí byl pro své výhody přihlášen autorem k patentování. [7]

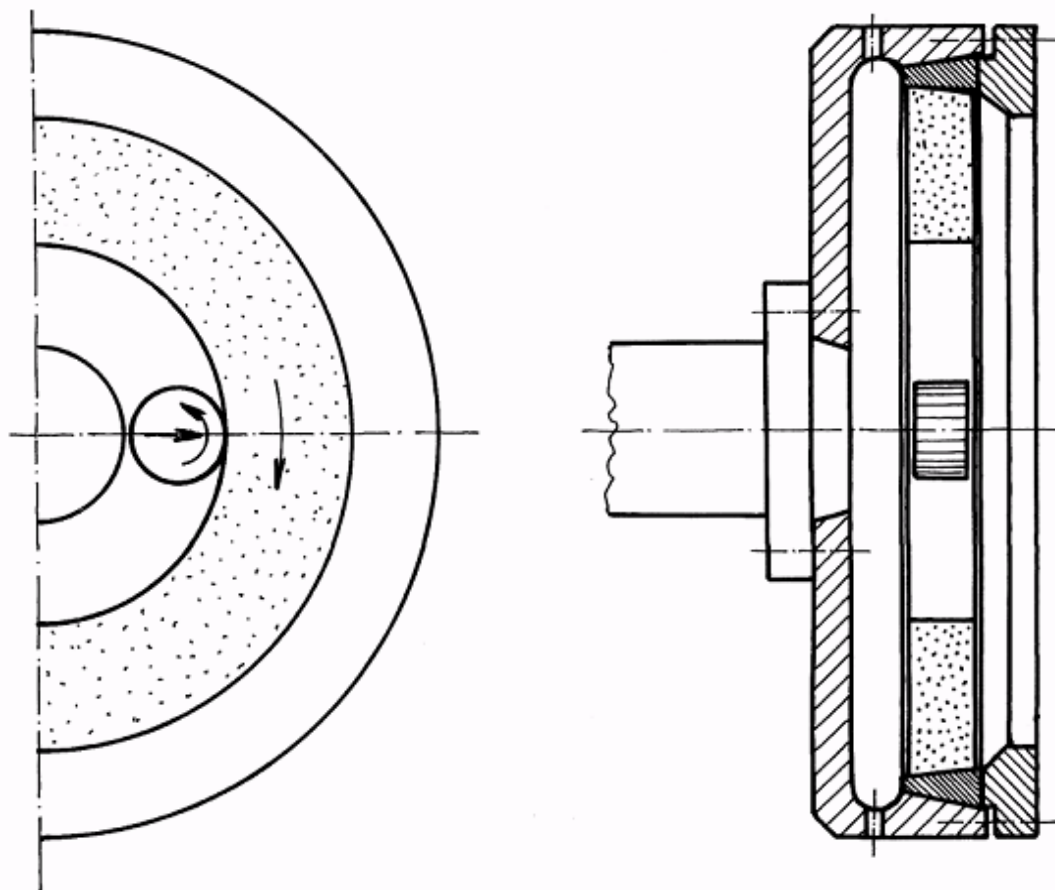
Velmi slibné výsledky se dosahují použitím brousících kotoučů bez otvoru (brousící disk – Obr.2c, d). V těchto případech je však nutné změnit konstrukci upínacích přírub.

Srovnáme-li tahovou a tlakovou mez pevnosti brousících materiálů vidíme, že tlaková mez pevnosti je značně vyšší. Musíme se proto snažit vytvořit na nebezpečném průřezu tj. na vnitřním obvodu tlakové napětí.

Vlivem rotace, jak jsme ukázali v předešlých kapitolách vzniká v brousicím kotouči tahové napětí. Obepneme-li však brousicí kotouč kovovým prstencem, pak vlivem různé roztažnosti dotýkajícího se brousicího a kovového materiálu – jak lze vypočítat ze spojitosti napětí a deformace na styčné ploše – vzniká v brousicím kotouči tlakové napětí, které v závislosti na mechanických charakteristikách styčných ploch snižuje nebo zcela ruší tahové pnutí vznikající v důsledku rotace. Tvar kotouče je znázorněn na Obr. 3. Jak vidíme dosažení žádaných výsledků je u tohoto způsobu broušení relativně jednoduché, proto byla metoda navržena autorem k patentování [8].

3.2 NOVÉ MATERIÁLY VE VÝROBĚ BROUSÍCÍCH KOTOUČŮ

Světový výrobce brousicích nástrojů vyvíjí nová organická a anorganická pojiva, čímž se zvýší pevnost spojovacích můstků mezi jednotlivými brusnými zrny. Vysoké pevnosti keramického pojiva bylo dosaženo přidáním kysličníku boritého, zvětšením podílu sklovité části pojiva a vhodnou mechanickou úpravou všech složek pojiva. Tato metoda je z hlediska výroby nejobtížnější a proto tím cennější jsou dosažené výsledky.



Obr. 3 Upnutí okružních brousicích kotoučů

Příznivě na mezní otáčky působí i použití polymerních a kovových pojiv. Matematicky určené obvodové rychlosti těchto brousicích kotoučů jsou uvedené v tab.2.

Tab. 2 Kritické obvodové rychlosti brousicích kotoučů

Bez díry				
Materiál	Hustota	Poissonovo číslo	Pevnost	Kritická rychlost
	[kg/m ³]	[-]	[MPa]	[m/s]
UP	1700	0,3	380	520
PI	1420	0,3	200	410
Dural	2700	0,25	350	400
Ocel	7850	0,3	800	350
PA	1300	0,3	85	280
Titan	4520	0,22	500	370
Nikl	8890	0,21	460	250
SiC	2257	0,2	20	100
Prstencový kotouč				
Materiál	Hustota	Poissonovo číslo	Pevnost	Kritická rychlost
	[kg/m ³]	[-]	[MPa]	[m/s]
UP	1700	0,3	380	470
PI	1420	0,3	200	375
Dural	2700	0,25	350	360
Ocel	7850	0,3	800	320
PA	1300	0,3	85	255
Titan	4520	0,22	500	330
Nikl	8890	0,21	460	225
SiC	2257	0,2	20	90
S dírou				
Materiál	Hustota	Poissonovo číslo	Pevnost	Kritická rychlost
	[kg/m ³]	[-]	[MPa]	[m/s]
UP	1700	0,3	380	510
PI	1420	0,3	200	405
Dural	2700	0,25	350	390
Ocel	7850	0,3	800	345
PA	1300	0,3	85	275
Titan	4520	0,22	500	360
Nikl	8890	0,21	460	250
SiC	2257	0,2	20	100

Ještě výhodnějším řešením tohoto problému je použití brousicích segmentů místo brousicího prstence. Je třeba zdůraznit, že nástroj při tomto způsobu obrábění brousí vnitřním průměrem. Tato úprava vytváří lepší podmínky pro účinné použití procesních (chladicích) kapalin.

4 VÝSLEDKY BROUŠENÍ ZVLÁŠTĚ VYSOKOU ŘEZNOU RYCHLOSTÍ

Studium odborné literatury a patentových spisů z oblasti použití rychlostního obrábění ukazuje na značné technologické a ekonomické přínosy této moderní technologie.

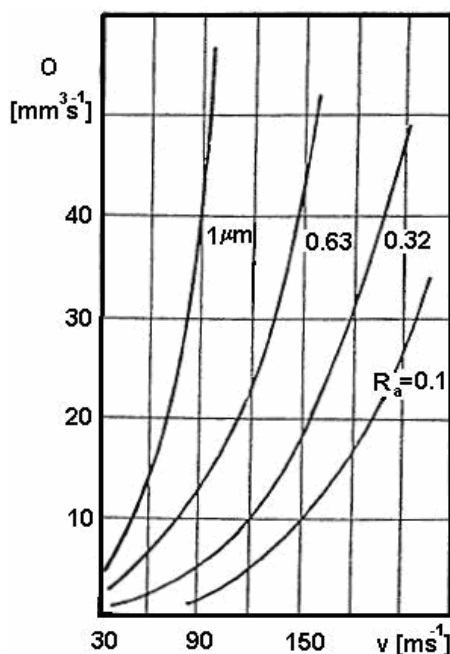
Experimentální ověření teoretických předpokladů, uváděných v předešlých kapitolách, se prováděla na rekonstruovaných strojích, vnitřním sousledným zápichovým broušením bez dobrušování a vyjiskřování. Jako zkušební obrobky se použily vnější kroužky kuličkových ložisek tpru 6217 / P5 Ø 150 / 130 x 28 mm, zhotovené z ložiskové oceli V KLZ (14 109, vakuovaný, přetavený), zakalené a popuštěné na 60 - 64 HRC. Obvodová rychlost brousícího kotouče byla měněna stupňovitě, v rozsahu $v_c = 30$ do 210 ms^{-1} změnou frekvence generátoru vysokofrekvenčních vybrušovacích elektrovřeten.

Obvodová rychlost obrobku byla, po uvážení vlivu různých technologických podmínek na kvalitu obrobené plochy, zvolena na konstantní hodnotu $v_o = 175 \text{ mm}^{-1}$. / Dle literárních pramenů a z výsledků provedených experimentů vyplývá, že nejvýhodnější z hlediska zbytkového tepla a zbytkového napětí je poměr rychlostí $q=60$. / Rychlost příčného posuvu byla plynule měnitelná v rozsahu $v_p 0 - 1 \text{ mm min}^{-1}$.

4.1 VLIV TECHNOLOGICKÝCH PODMÍNEK NA VÝSLEDKY BROUŠENÍ

4.1.1 Odebrané množství materiálu při rychlostním broušení

Jak z předešlých úvah vyplývá, při zvyšující se řezné rychlosti, zlepšuje se kvalita obrobeného povrchu. Vyhovuje-li nám standardní jakost obrobku, můžeme zvyšovat přísuv a tím výkon broušení.



Obr. 4 Vliv řezné rychlosti na rychlost odebrání materiálu při rychlostním broušení

U konvenčního broušení se používá řezná rychlost $30-35 \text{ ms}^{-1}$. Zvyšováním řezné rychlosti se zmenšuje tloušťka odebrané třísky, to znamená, že lze zvýšit výkon – odebrané množství – zvýšením přísuvové rychlosti nebo posuvu. Výsledky, které se dosahují při aplikaci vyšších

řezných rychlostí, hlavně vliv řezné rychlosti na jednotkové odebrané množství materiálu ukazuje Obr. 4.

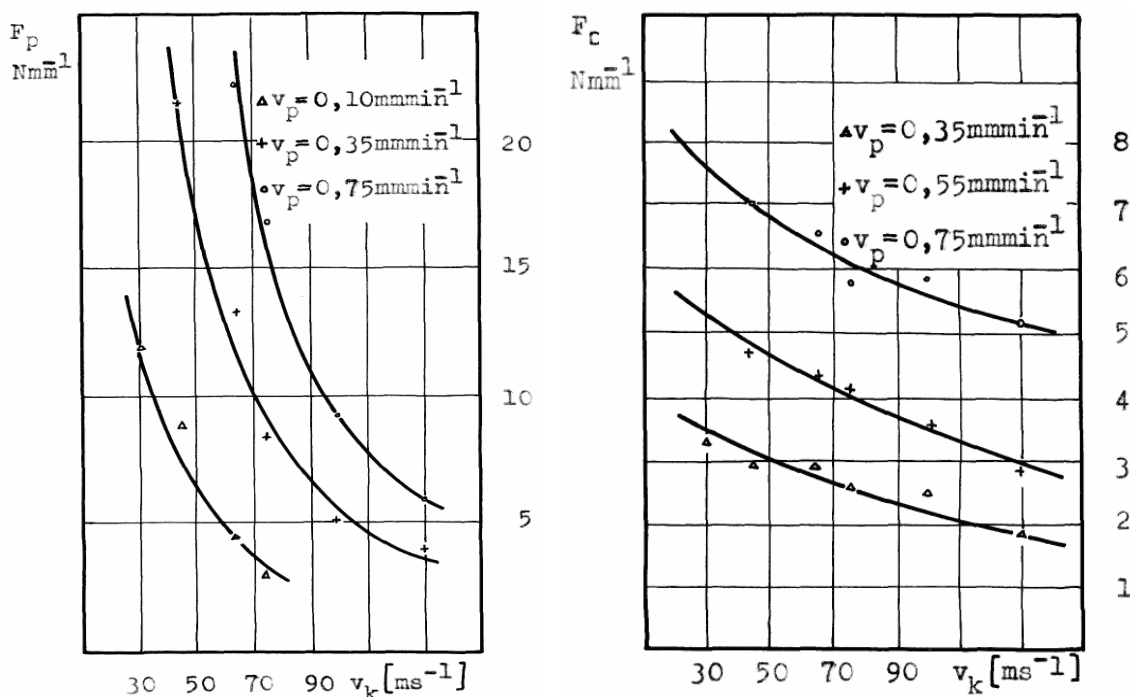
Graf uvádí změnu měrného odebraného množství zušlechtěného materiálu za předpokladu zachování konstantní normální složky řezného odporu, tj. i konstantního silového ovlivnění povrchové vrstvy na řezné rychlosti za předpokladu dodržení konstantní drsnosti. Obě závislosti jsou exponenciální, čili odůvodňují použití co nejvyšších řezných rychlostí.

4.1.2 Dynamické podmínky při rychlostním broušení

Přesnost výrobků do značné míry ovlivňuje dynamika řezného procesu. Z hlediska stability soustavy stroj - nástroj - obrobek je velmi důležité znát hodnoty řezných odporů, které charakterizují míru propružení jednotlivých členů soustavy a tím nejvýrazněji ovlivňují přesnost obrobku.

Hodnocení řezných sil naráží v praxi na veliké úskalí statistického určování záběru broušících zrn, postupného opotřebování broušících zrn a ne zcela vyjasněného vlivu procesních (chladících) kapalin. Přes tyto nedostatky je v literárních pramenech velké množství modelů popisujících průběh řezných sil při broušení.

Abychom ověřili platnost těchto modelů provádělo se experimentální broušení vysokou řeznou rychlostí. Výsledky ukazují na dobrou shodu s teoretickými předpoklady. Při experimentech se síly měřily pomocí bezdotykových indukčních sond. Naměřené výsledky jsou uvedené na Obr. 5.



Obr. 5 Vliv řezných podmínek na změnu řezných odporů.

Z grafů lze udělat následující závěry :

Se zvyšováním řezné rychlosti se snižuje velikost jak řezné síly F_c , tak i pasivní složky F_p řezného odporu. Přitom sklon pasivní složky celkové řezné síly je větší, než pokles směrnice řezné síly složky.

S růstem měrného řezného výkonu / přísuvu /, roste také řezný odpor ze začátku lineárně, později při vyšších přísuvových rychlostech v důsledku větší plasticity obrobku, dochází ke snižování směrnice křivky. Znamená to, že při vysokých a super-vysokých rychlostech

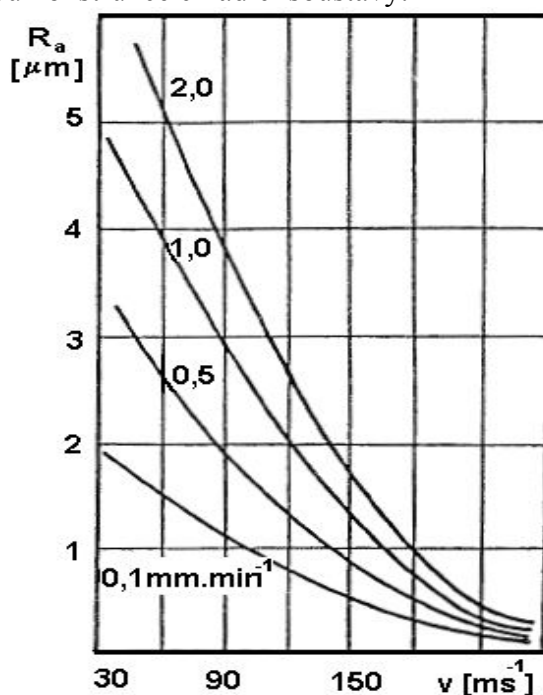
a vysokých měrných výkonech je mezi dodanou energií, prací řezání a odvodem tepla rovnováha, čili řezný odpor se ustálí na konstantní hodnotě. Při překročení mezní řezné rychlosti křivka začíná klesat.

Zvyšujeme-li řeznou rychlost, snižuje se poměr řezných odporů, dochází ke zmenšování a natočení výsledného řezného odporu k ose p. Uvážíme-li, že brousící stroje v tomto směru mají zvýšenou tuhost, tak i tato skutečnost může být příčinou větší rozměrové přesnosti obrobků.

4.1.3 Nedokonalosti povrchu broušené plochy

Jak ukazují výsledky experimentů, kromě integrity povrchu drsnost pracovních ploch určuje jakost a životnost výrobků. Proto se v literatuře věnuje velká pozornost matematickému a experimentálnímu určení této charakteristiky.

Pro potvrzení těchto teoretických modelů bylo autorem prováděno experimentální broušení zvláště vysokou rychlostí při zápichovém broušení ložiskových součástí. Výsledky potvrzují dobrou shodu s matematickými modely. Ukazuje se, že se zvyšováním řezné rychlosti klesá hodnota střední aritmetické drsnosti, tzn. zlepšuje se jakost broušených ploch. Tato hodnota se významněji mění při nižších řezných rychlostech a ustálí se v oblasti zvláště vysokých řezných rychlostí. Dalšího poklesu střední aritmetické drsnosti při experimentech se dosáhlo snížením přísuvové rychlosti a změnou konstrukce chladicí soustavy.



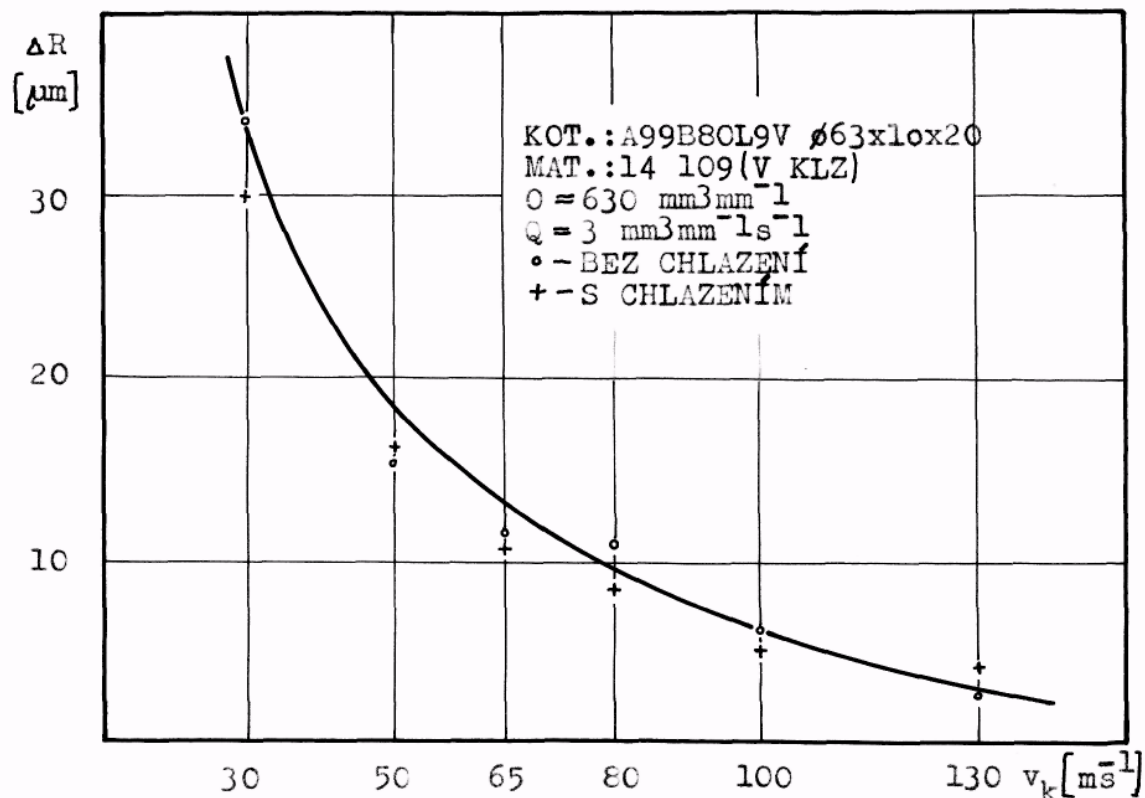
Obr. 6 Vliv změny technologických podmínek na drsnost.

4.1.4 Trvanlivost a opotřebení brousících kotoučů

Doba trvání řezného procesu, během které je řezná hrana nástroje schopna provozu se označuje jako trvanlivost. Je to doba po kterou je břit nástroje schopen efektivně plnit požadované funkce. Trvanlivost nástroje je určena časovým úsekem začátku řezání a vznikem poruchy, kterou končí provozuschopný stav nástroje. Trvanlivost do značné míry charakterizuje ekonomické parametry procesu obrábění.

Při práci řezných nástrojů, vlivem sil a teplot v řezné zóně, dochází vždy k opotřebení brousícího kotouče. Abychom zajistili výrobu součástí v určité toleranci, je nutné znát míru

opotřebení nástrojů v závislosti na řezných podmínkách. Autor proto prováděl experimenty zaměřené na zjištění opotřebení brousících kotoučů při vnitřním zápichovém broušení ložiskových kroužků.



Obr. 7 Vliv řezné rychlosti na opotřebení kotouče.

Míra opotřebení se snižuje, čím je řezná rychlost větší. V oblasti zvláště vysokých rychlostí a při větších odebíraných objemech obrobku, dochází již jen k malému poklesu opotřebení, míra opotřebení je téměř konstantní. Toto tvrzení dokazuje i obr. 7, znázorňující vliv řezné rychlosti na opotřebení brousícího nástroje, za předpokladu konstantních ostatních řezných podmínek.

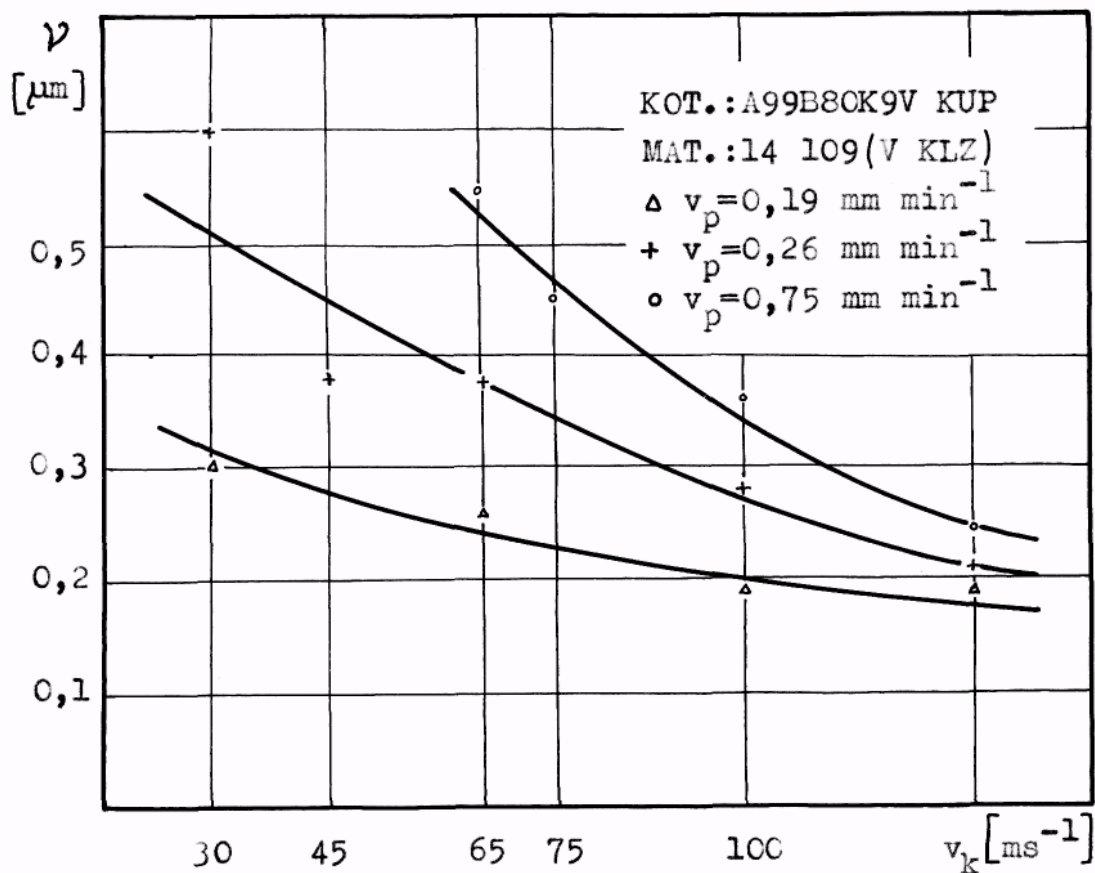
Graf je monotónně klesající s malou změnou v oblasti vysokých a zvláště vysokých rychlostí. Na grafech je uvažován též vliv chlazení na míru opotřebení. Jak ukazuje průběh křivek opotřebení brousícího kotouče s chlazením je menší než bez chlazení. Diference mezi křivkami je však velice malá. V oblasti zvláště vysokých rychlostí jsou naměřené hodnoty velmi malé, obtížně zpracovatelné, proto je hodnota opotřebení s chlazením větší.

4.1.5 Tvarová přesnost výrobků

Za příčinu vzniku vlnitosti při broušení lze považovat vzájemný kmitavý pohyb obrobku a brousícího kotouče a změnu tuhosti. Jak ukazují teoretické úvahy a výsledky experimentů uváděné v předešlých kapitolách, dochází při broušení vysokou a zvláště vysokou řeznou rychlostí k výraznému poklesu řezných odporů, což vede k menšímu propružení soustavy stroj-nástroj-obrobek. Tato skutečnost blahodárně působí na rozměrovou přesnost obrobku. Při obrábění s vyjiskřováním se značně snižuje doba vyjiskření, potřebné pro dosažení standardní kvality.

Zvýšenou pozornost byla věnována, při vyhodnocování experimentů, stanovení vlivu řezné rychlosti a ostatních řezných podmínek na tvarovou přesnost obrobku. Při pečlivém proměřování tvaru broušené plochy zjistíme, že na obrobeném povrchu se vyskytují velmi výrazné tvarové úchyly, tzv. vlnitost. Za vlnitost válcové plochy je považována takové geometrická úchylna

kruhovitosti, která se po obvodě obrobku přibližně harmonicky opakuje. Je specifikována maximální nebo minimální hloubkou vlny a roztečí vln. Na rozdíl od podélné drsnosti, je vlnitost určena druhou podmínkou rozteče i hloubkou vln broušené plochy jsou prakticky stejné ve všech rovnoběžných řezech kolmých na osu válcového obrobku.



Obr. 8 Vliv řezné rychlosti a přísunové rychlosti na vlnitost obrobku.

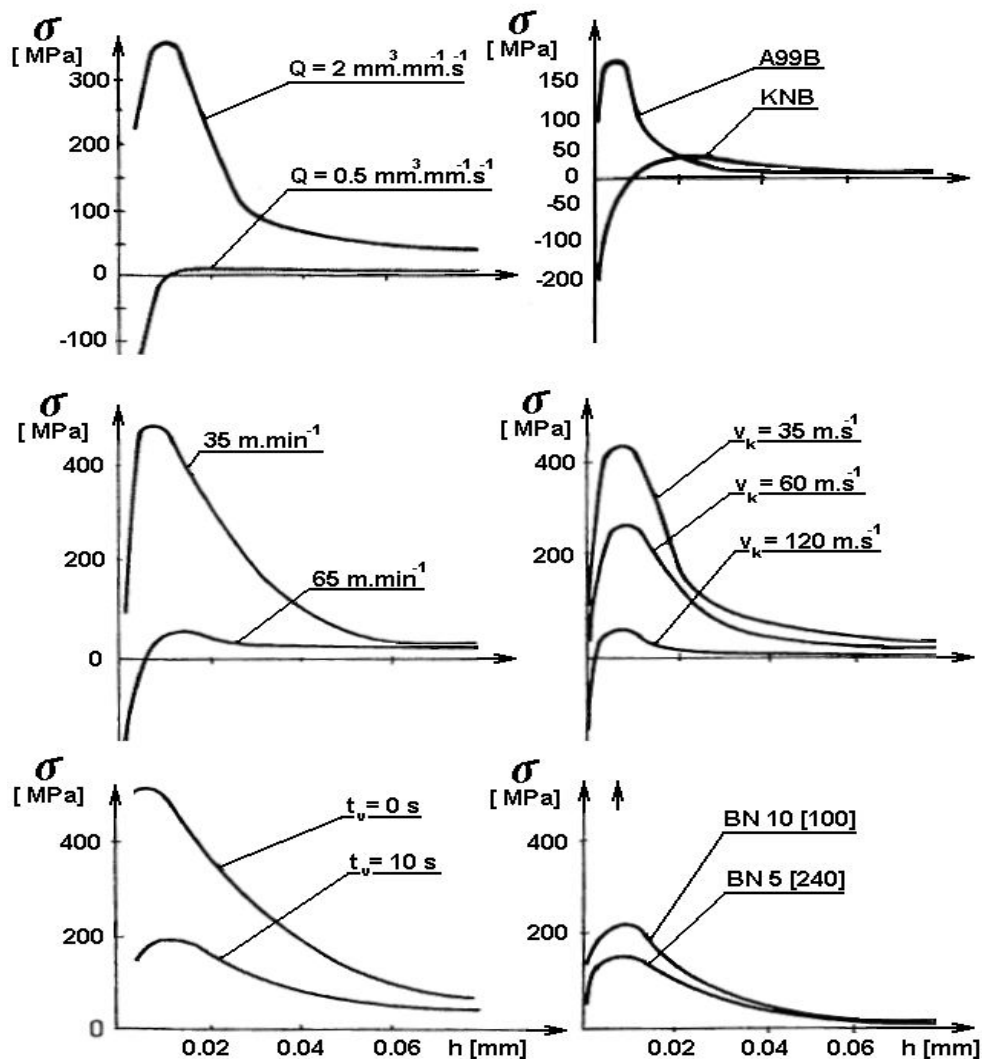
Se zvyšováním řezné rychlosti, za předpokladu konstantních ostatních řezných podmínek, klesá vlnitost obrobku. Tento pokles je tím výraznější, čím je větší přísun. V oblasti řezných rychlostí větších než 130 ms^{-1} , jak naznačuje Obr. 8, dochází k ustálení změny tvaru, dalším zvyšováním řezné rychlosti se zlepšuje vlnitost již jen nepatrně.

Lze též konstatovat, že při zachování konstantního poměru řezné a obvodové rychlosti obrobku ($q=60$) má vlnitost minimum pro aplikované řezné rychlosti.

4.1.6 Zbytkové napětí v broušené ploše

Zbytkové napětí má značný vliv na životnost a funkčnost obrobků. Tato napětí vznikají v důsledku působení doprovodných jevů procesu obrábění a dále působí v součástce i bez vnějšího zatížení. Zbytkové napětí vzniká pod obrobkem v případě, kdy dochází k nerovnoměrné plastické deformaci povrchové vrstvy v důsledku řezných sil, ohřevu nebo fázové přeměny materiálu obrobku.

Hodnocení zbytkových napětí při broušení má značný význam vzhledem k tomu, že ve většině případů se jedná o dokončovací operaci, která nejvíce ovlivňuje životnost výrobků.

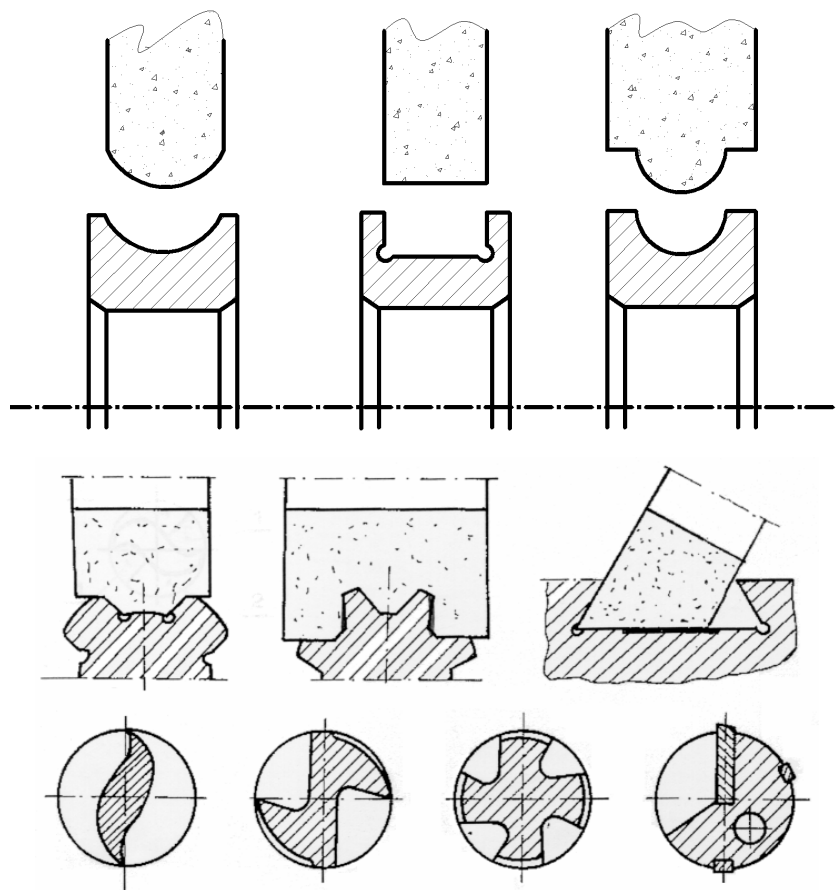


Obr. 9 Vliv technologických podmínek na zbytkové napětí při broušení

Zvyšování řezné rychlosti při broušení výrazně a kladně ovlivňuje průběh zbytkových napětí. Lze to vysvětlit vhodnější dynamikou řezného procesu, kratším stykem brousícího zrna s obrobkem v důsledku čeho v povrchové vrstvě obrobku vzniká tlakové napětí.

5 VYUŽITÍ RYCHLOSTNÍHO BROUŠENÍ V PRAXI

Broušení zaručuje velmi dobrou rozměrovou a povrchovou kvalitu, krátké výrobní časy a umožňuje (vynucuje) vysoký stupeň automatizace technologického procesu. Rychlostní broušení, kromě klasického dokončovacího způsobu obrábění vystupuje stále více do popředí jako alternativa ostatních metod obrábění. Vedle běžného způsobu broušení se začínají uplatňovat jeho modifikace tzv. rychlostní broušení, hloubkové broušení a výkonné broušení. Pojmem rychlostní broušení označujeme broušení nad běžně používanou řeznou rychlostí tj. nad $35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Hloubkové broušení lze charakterizovat odebráním celého přírůstku na jeden zdvih (například celé hloubky drážky). Kombinaci rychlostního a hloubkového broušení označujeme pojmem výkonné broušení. Integrované použití těchto metod znamená technologický pokrok, jehož význam někteří výzkumníci přirovnávají k zavedení slinutých karbidů počátkem čtyřicátých let minulého století.



Obr. 10 Příklady využití výkonného broušení ve výrobě technologických zařízení

Aplikace broušení zvláště vysokou rychlostí našla své uplatnění ve výrobě rovinných drážek různých tvarů (viz. Obr. 10). Tyto tvary drážek se brousí na jeden zdvih stolu brusky „do plna“.

Pro broušení drážek nástrojů se používá hutních brousících kotoučů s vyšší tvrdostí. U broušení fréz čtyř a vícebřitých, pracuje stroj v jednořezném programu, tzn., že každou drážku vybrousí na jedno pootočení obrobku. Pro nástroje dvou a tříbřité je stroj vybaven zařízením pro víceřezný program, tzn., že drážka se brousí větším množstvím radiálních záběrů.

Výhody rychlostního broušení výrazně se ukazují v oblasti výroby ložisek. Touto metodou se brousí z plna oběžné dráhy kuličkových, válečkových, jehlových a kuželových ložisek. Úspěšná je aplikace integrálního rychlostního broušení, kdy na jeden zdvih se brousí oběžná dráha, nákrůžek a případně tvarové zápichy. Velmi úspěšné jsou aplikace této technologie v oblasti výroby nářadí a dílů technologických zařízení. Příklady těchto aplikací jsou uvedené na Obr. 10.

6 ZÁVĚR

Rozbor dosažených výsledků ukazuje, že za předpokladu stejné dynamiky řezného procesu výkon (odebrané množství materiálu), se exponenciálně zvyšuje s řeznou rychlostí. Experimentálně zjištěné výsledky této závislosti mají parabolický průběh. Podobný, parabolický, je průběh rychlosti za předpokladu zachování konstantní drsnosti povrchu.

Pro spolehlivější funkci rotačních součástí má velký význam drsnost broušené plochy charakterizovaná mikronerovností. Na drsnosti povrchu obrobku závisí hlavně počáteční opotřebení součástí. Ze tří základních řezných podmínek řezná rychlost má velmi příznivý účinek

na drsnost. Průběh experimentálně zjištěných hodnot střední aritmetické drsnosti součástí valivých ložisek dokazuje, že s růstem řezné rychlosti se výrazně snižuje střední aritmetická drsnost obrobeného povrchu.

Velký význam z hlediska životnosti výrobků má také kromě drsnosti broušeného povrchu i jeho vlnitost. Vlnitost obrobené plochy se pozvolna snižuje se zvyšováním řezné rychlosti, obrácený vliv má přísuvová rychlost, s jejímž zvyšováním přímo úměrně se zvětšuje vlnitost; k zajímavému poznatku přicházíme při změně obvodové rychlosti obrobku, tato křivka má minimum, tzn., že při dodržení konstantního poměru obvodové a řezné rychlosti $q = 60$ dosahuje se při vnějším válcovém (i tvarovém) broušení nejnižší vlnitosti.

Životnost součástí je výrazně ovlivněna kromě už shora uvedených faktorů také kvalitou povrchové vrstvy charakterizovanou jejím stavem tj. strukturou a zbytkovým napětím. Při broušení kalených ocelí vznikají značné teploty, které jsou často vyšší než překryštalizační teplota odpovídající teplotě AC3. Při tak vysokých teplotách může dojít k popuštění martenzitu, nebo k sekundárnímu zakalení. Probíhají proto strukturní přeměny, které doprovází změna napjatosti v povrchové vrstvě. Experimentálně získané výsledky zbytkového napětí ukazují, že se zvyšováním řezné rychlosti se zbytkové napětí mírně snižuje a přesouvá se do oblasti tlakových napětí za předpokladu zachování konstantního poměru řezné a obvodové rychlosti.

Další velice důležitou charakteristikou technologie broušení je opakovaná přesnost výroby. Tento požadavek je zvláště náročný v sériové a hromadné výrobě. Teoretický rozbor a výsledky broušení zvláště vysokou řeznou rychlostí ukazuje, že s růstem řezné rychlosti klesá radiální a axiální složka řezného odporu. Snižuje se také napružení soustavy stroj-nástroj-obrobek-upínač, zvyšuje se tedy rozměrová přesnost vyráběných součástí. Při dokončovacím broušení válcových a tvarových ploch existuje (dle provedených experimentů) mezní velikost opotřebení, která je pro dané technologické podmínky konstantní, jsou tedy výrobky broušeny ve stejné, velmi úzké toleranci.

Rozměrová přesnost součástí kromě tuhosti technologické soustavy je determinována také opotřebením brousícího kotouče. Ukazuje se, že se zvyšováním řezné rychlosti se výrazně snižuje radiální opotřebení nástroje, tím pochopitelně se zvyšuje opakovaná přesnost výroby. Je to důsledek vlivu tepla na proces oddělování třísky a tvoření mezní vrstvy a změněných podmínek tvoření třísky tj. skutečností, že se zvětšuje úhel střížné roviny a snižuje se silové zatížení obrobku.

Nevýhodou zvyšování řezné rychlosti při broušení je kvadratický nárůst odstředivé síly a značný vývin tepla v řezné oblasti, související s přímkovým nárůstem elektrického příkonu v závislosti od řezné rychlosti. Ve skutečnosti, vzhledem ke změně řezného odporu, fyzikálně - mechanických a tepelných vlastností obráběného materiálu od teploty, je tato funkce parabolická, asymptoticky se blíží k teplotě tavení obráběného materiálu. Jak jsme ukázali již dříve, existuje určitá mezní řezná rychlost, nad kterou začíná pokles a ustálení teploty řezání vysvětlitelný mechanismem přesunu střížné roviny třísky.

Největším úskalím vysokovýkonného broušení je kvadratický nárůst odstředivé síly v rotujícím brousícím kotouči a tím výrazné zvýšení nebezpečí porušení nástroje za rotace. Proto je nutné každý brousící kotouč dynamicky vyvažovat přímo na stroji pomocí vyvažovacího přístroje. Je třeba též věnovat zvýšenou pozornost bezpečnému krytování stroje a konstrukčním úpravám přívodu procesní kapaliny.

Jak ukázaly předešlé rozborů výsledků broušení součástí zvláště vysokou řeznou rychlostí, proces broušení a s ním související jevy jsou velmi složité, a proto je třeba dále teoreticky a experimentálně zkoumat fyzikální podstatu těchto dějů, které probíhají při obrábění materiálů broušením, zvláště z aspektu přesnosti obrábění a stavu povrchové vrstvy při vysoce výkonném broušení. Jen tak lze zajistit splnění kvalitativních a kvantitativních požadavků kladených na výrobu v oblasti dokončovacích operací. Dále je třeba věnovat zvýšenou pozornost bezpečnosti této technologie a automatizaci procesu při konstrukci nových výrobních zařízení.

7 LITERATURA

1. BÁTORA, B. – VASILKO, K.: Obrobené povrchy, technologická dedičnosť, funkčnosť. GC Tech, Trenčín, 2000, ISBN 80-88914-19-1.
2. FARLÍK A., ONDRÁČEK E. : Pružnosť a pevnosť I,II SNTL Praha 1967
3. HOLEŠOVSKÝ, F.: The quality control of the cylindrical surface. International conference ICPR, Osaka,1997, p. 690-693.
4. JERSÁK, J.: Simulace procesu rovinného broušení. Habilitační práce, TU Liberec, 2002, 147s.
5. KOČMAN, K.: et al. Actual Handbook for Technical Department.(Aktuální příručka pro technický úsek) 18th New enl. ed.. Praha: Verlag Dashöfer, listopad 2001, 4850 s. ISBN 80-902 247-2-5
6. KÖNIG, W.: Fertigungsverfahren, Band 2 VDI – Verlag GmbH Düsseldorf, 1980.
7. LUKOVICS I., ŘÍČKA J. : Brusný kotouč k broušení vysokými řeznými rychlostmi. PV 1256 - 72 ze 28.2.1972
8. LUKOVICS I., ŘÍČKA J. : Zařízení k upnutí brusného nástroje. A.o. č.156134 ze 3.3.1972
9. LUKOVICS, I. – KOČMAN, K.: Theoretical and Practical Evaluation of Thermodynamic Effects in Grinding. In.: Manufacturing Technology (Journal for Science), Vol. 5, 2005, p 46-50, UJEP, Ústí nad Labem, IPTaM, ISSN 1213248-9.
10. LUKOVICS, I. – LUKOVICS, P.: Effect of Technological Conditions on the Quality of Grinded Surface in High – Power Grinding. In.: Manufacturing Technology (Journal for Science), Vol. 2, 2002, p. 12-16, UJEP, Ústí nad Labem, IPTaM, ISSN 1213 248-9
11. LUKOVICS, I. – TIMÁR, I.: Nanotechnology when Grinding Moulds for Plastic Processing. Gép. LVI. No.6/2005. p. 47-51. Ind.: 25343, ISSN 0016-8572.
12. LUKOVICS, I., SÝKOROVÁ, L.: Stanovení řezivosti brousících kotoučů pro vysokovýkonné broušení. Strojírenská technologie 3/99, s. 12.
13. LUKOVICS, I.: Research of High-Speed Grinding. In.: microCAD 2005, International Scientific Conference, 10.-11. March 2005, s. 103 – 108, University of Miskolc, HU, ISBN 963 661 6469ö.
14. LUKOVICS, I.: Vysokovýkonné obrábění kovů a polymerů. In.: Nové směry vo výrobných technologiách, TU Košice, Prešov, 2000, s. 261
15. LUKOVICS,I.: Výzkum broušení supervysokou řeznou rychlostí. Kand. disertační práce. VUT FS Brno, 1974
16. MÁDL, J.-JERSÁK, J.-Holešovský, F.: Jakost obráběných povrchů. UJEP Ústí nad Labem, 2003, ISBN 80-7044-593-4.
17. MASLOV, J.N.: Teorie broušení kovů, SNTL Praha, 1979
18. NECKÁŘ F. : Výzkum vlivu dokončovacích operací na zbytkové pnutí v povrchové vrstvě. VZ 326 ČVUT Praha 1962
19. TANIGUSCHI, N.: Current Status in and Future Trends of Ultra Precision Machining and Ultra Fine Materials Processing. In: Ann. CIRP 32, (1983) 2, pp 573-582.
20. VASILKO, K.: Technológia dokončovania povrchov. Cofin Prešov, 2004, ISBN 80-8073-124-1.

8 ANOTACE

Práce popisuje oblasti použití nanotechnologií v procesu broušení; dále se zabývá určením fyzikálně-mechanických charakteristik brousicích materiálů a využitím těchto vlastností při výrobě brousicích kotoučů. Uvádí výpočet napětí v rotujícím kotouči a možnosti použití patentovaných tvarů nástrojů při rychlostním broušení. Presentuje výsledky rychlostního a výkonného broušení těmito nástroji při obrábění materiálů legovaných chrómem. Dále uvádí výsledky vlivu technologických podmínek na jakost povrchů, na zbytkové napětí v obrobku, řezné síly vzniklé při rychlostním obrábění a vliv technologických podmínek na opotřebení brousicích kotoučů. V závěru práce se hodnotí oblasti využití této technologie v průmyslu.

ABSTRACT

This work describes areas of nanotechnologies in the grinding process and deals with investigation of physical-mechanical characteristics of grinding materials and application of these properties in the production of grinding wheels. Results of high speed and high power grinding of Cr-materials are shown, as well as the stress enumeration of rotating wheel and application of patented tools shape for high speed grinding. In addition to that, quality, residual stress inside the workpiece, cutting forces incurred by high speed cutting and tool wear as function of technological conditions are given. Lastly, regions of application of this technology in the industry are evaluated.