



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**TECHNOLOGIE ČISTÉHO OBRÁBĚNÍ KROUŽKU
SPECIÁLNÍHO LOŽISKA BRUSKOU NA OTVORY**

FINAL MACHINING TECHNOLOGY OF A SPECIAL BEARING RING USING A GRINDER ON THE HOLES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Daniel Růžička

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Josef Chladil, CSc.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Daniel Růžička**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie a průmyslový management
Vedoucí práce: **doc. Ing. Josef Chladil, CSc.**
Akademický rok: 2017/18

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

Technologie čistého obrábění kroužku speciálního ložiska bruskou na otvory

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Popis vybraného ložiska, posouzení materiálu a polotovaru, technologie výroby, dokončující operace, nástroje a řezné podmínky v podmínkách malosériové výroby, zhodnocení.

Cíle diplomové práce:

- Technologie výroby navrženého ložiska
- Volba a výpočet řezných podmínek pro vybrané nástroje
- Technicko - ekonomické zhodnocení.

Seznam doporučené literatury:

FOREJT, M. a M PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

PÍŠKA, M. a kol. Speciální technologie obrábění. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. 247 s. ISBN 978-80-214-4025-8.

ZEMČÍK, O. Technologická příprava výroby. Brno: CERM, 2002. 158 s. ISBN 80-214-2219-x.

MELUZÍN, T. a V. MELUZÍN. Základy ekonomiky podniku. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. 119 s. ISBN 978-80-214-3472-1.

HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. Praha: MM publishing, s.r.o., 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.

SHAW, M. C. Metal Cutting Principles. 2nd ed. New York Oxford University Press, 2005. 651 p. ISBN 0-19-514206-3.

Mc. MAHON, C. and J. BROWNE. CAD/CAM Principles, Practice and Manufacturing Management. 2nd ed. Addison - Wesley, 1998. 665 p. ISBN 02-011-7819-2.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18.

V Brně, dne 27. 10. 2017



prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Hlavním cílem této práce je porovnat 5 vytipovaných brousících kotoučů, které se liší jak typem použitého materiálu, tak i svojí strukturou. Testování těchto kotoučů probíhá ve firmě SLB, spol. s r.o. na brusce na díry BDU 80, na které je postupně nastaveno 6 různých nastavení obráběcího cyklu, popsaných písmeny A', A, B, C, D a E. Tato nastavení jsou rozdílná řeznými podmínkami a umožňují porovnat testované brousící kotouče na základě osmi měřených parametrů jakosti povrchu broušených oběžných drah vnějších ložiskových kroužků ložiska SLB 84-74, které jsou dány příloženou výkresovou dokumentací.

Klíčová slova

ložisko, brousící kotouč, CBN, korund, broušení, bruska na díry, otvorové broušení

ABSTRACT

The main goal of this thesis is to compare 5 chosen grinding wheels, that vary by the material and structure. The testing is done in the company SLB, spol. s r.o., using a grinder on the holes BDU 80, which is set to 6 different settings of the grinding cycle, defined by the letters A', A, B, C, D and E. These settings vary by the cutting conditions and enable to compare the tested grinding wheels by 8 measured parameters of the surface quality of the grinded bearing orbits of outer rings of the SLB 84-74 bearings, that are described by the drawing documentation.

Key words

bearing, grinding wheel, CBN, corundum, grinding, grinder on the holes, hole grinding

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

RŮŽIČKA, D. *Technologie čistého obrábění kroužku speciálního ložiska bruskou na otvory*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 69 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Josef Chladil, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Technologie čistého obrábění kroužku speciálního ložiska bruskou na otvory** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

24.05.2018

Datum

Bc. Daniel Růžička

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto vedoucímu práce doc. Ing. Josefu Chladilovi, CSc. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování této diplomové práce.

Děkuji firmě SLB, spol. s r.o. a jejím zaměstnancům za poskytnutí kvalitního zázemí a příjemného prostředí při vypracování této diplomové práce.

Děkuji svým rodičům, přítelkyni, rodině a kamarádům, kteří mě po celou dobu studia podporovali.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ	5
PODĚKOVÁNÍ.....	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	9
1 KONSTRUKCE, VÝROBA A VYUŽITÍ LOŽISEK.....	10
1.1 Konstrukce ložisek.....	10
1.1.1 Valivá ložiska	10
1.1.2 Kluzná ložiska	12
1.1.3 Ložisko SLB 84-74.....	12
1.2 Výroba a využití ložisek	13
2 BROUŠENÍ A BROUSICÍ NÁSTROJE.....	14
2.1 Broušení	14
2.2 Základní metody broušení	15
2.2.1 Obvodové broušení vnějších ploch do kulata.....	17
2.2.2 Obvodové broušení vnitřních ploch do kulata.....	20
2.2.3 Rovinné broušení.....	23
2.2.4 Tvarové broušení	25
2.3 Brousicí nástroje	26
2.3.1 Standardní brousicí kotouče	26
2.3.2 Brousicí kotouče ze supertvrdých materiálů	29
2.4 Brousicí stroje – brusky	30
2.4.1 Hrotové brusky	30
2.4.2 Bezhraté brusky	31
2.4.3 Brusky na díry	31
2.4.4 Vodorovné rovinné brusky	32
2.4.5 Svislé rovinné brusky	32
2.4.6 Speciální brusky	32
3 PRAKTICKÁ ČÁST PRÁCE	33
3.1 Popis ložiska SLB 84-74.....	33
3.1.1 Operace před otvorovým broušením	33
3.1.2 Otvorové broušení	33
3.1.3 Operace po otvorovém broušení.....	36
3.2 Brousicí kotouče	37

3.2.1	Kotouč 5RNA 80 K 9 V C40.....	37
3.2.2	Kotouč 89A (A99B) 802 I5 V111.....	37
3.2.3	Kotouč 97A 802 I5 V112.....	38
3.2.4	Kotouč AT60 J6 VCOL (Columbia).....	39
3.2.5	Kotouč CBN B107 K100	39
3.2.6	Rozdílnost jednotlivých kotoučů	40
3.3	Testování brousicích kotoučů.....	40
3.3.1	Pevně nastavené parametry broušení	41
3.3.2	Měnící se parametry broušení	42
3.3.3	Proces broušení	43
3.3.4	Naměřené hodnoty parametrů jakosti povrchu	44
3.3.5	Rozbor naměřených hodnot	52
3.3.6	Testování s odlišnou řeznou rychlostí.....	53
4	TECHNICKO – EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	59
4.1	Závěry testování	59
4.2	Zhodnocení.....	59
5	DISKUSE.....	62
5.1	Hodnocení z hlediska autora	62
5.2	Hodnocení z hlediska firmy SLB, spol. s r.o.....	62
5.3	Hodnocení z hlediska světové situace	63
5.4	Návrhy na pokračování řešení.....	63
	ZÁVĚR	64
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	65
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	67
	SEZNAM PŘÍLOH.....	69

ÚVOD

Téma této závěrečné práce zní Technologie čistého obrábění kroužku speciálního ložiska bruskou na otvory a její náplní je přiblížit problematiku otvorového broušení velmi přesných součástí – ložiskových kroužků, kde je nutné dosáhnout rozměrové přesnosti v jednotkách mikrometrů a splnit i další velmi přísná kritéria na obráběný povrch. Hlavním cílem této práce je porovnání výběru brousicích kotoučů při otvorovém broušení na univerzální brusce na vnitřní broušení BDU 80 (viz příloha 1). Brousicí kotouče byly vybrány ve spolupráci s výrobcem těchto kotoučů, společností Tyrolit a na vybrané brusce byly podrobeny několika testům při různých rezných podmínkách, při obrábění vytipovaného ložiskového kroužku (viz příloha 2b a 2c). Práce obsahuje poměrně obsáhlý teoretický úvod, kde jsou popsána ložiska, jakožto realizovaný produkt firmy SLB, spol. s r.o., jejich různé typy a vlastnosti a konkrétněji je přiblížena i výroba vybraného ložiska SLB 84-74. Další složka teoretické části této práce je věnována technologii broušení, včetně popisu brousicích nástrojů. Po tomto teoretickém základu je přistoupeno k praktické části, a sice broušení ložiskových kroužků na otvorové brusce s využitím výběru brousicích kotoučů, při použití měnicích se rezných podmínek. Jsou měněny otáčky jak pracovního, tak později i brusného vřeteníku (tedy i rezná rychlost), posuvová rychlost a doba vyjiskření. Na základě takto různých podmínek je dosaženo rozdílné výkonnosti jednotlivých brousicích kotoučů a také různé přesnosti a jakosti obrobeneho povrchu. Jakost povrchu je měřena na celkem 30 ložiskových kroužcích, které byly při 6 různých nastaveních obráběcího cyklu broušeny 5 různými brousicími kotouči. V první polovině praktické části je uvedeno srovnání 5 nastavení bez měnicí se rychlosti brousicího kotouče a v druhé polovině je dodatečně testováno broušení při snížené rychlosti brousicího kotouče a porováno s podobným nastavením z první poloviny. Na základě takto získaných informací je v závěrečné části této práce posouzena vhodnost testovaných brousicích kotoučů k použití při dané operaci broušení (broušení uvedených obrobků na zmíněné brusce) a také jejich ekonomická výhodnost.

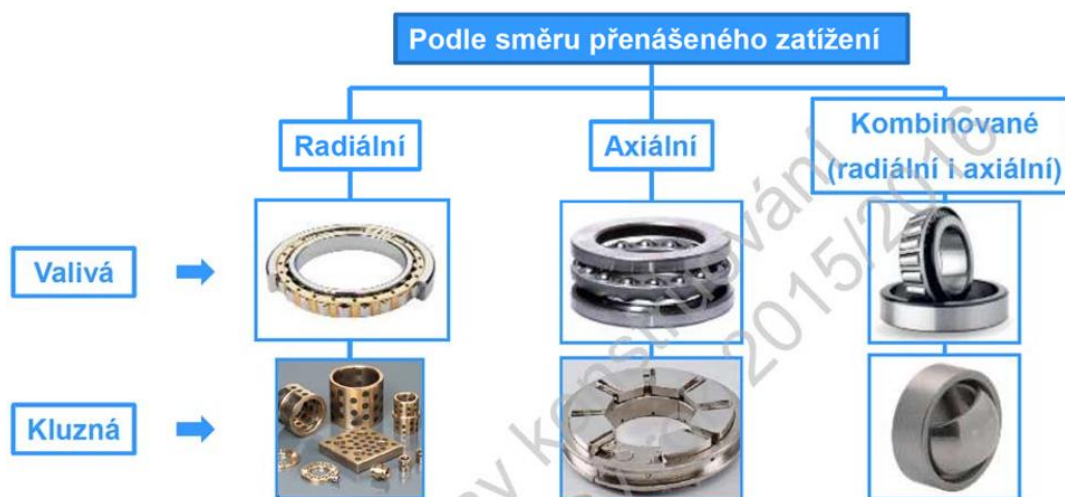
1 KONSTRUKCE, VÝROBA A VYUŽITÍ LOŽISEK

Na úvod je třeba představit samotná ložiska, popsat jejich vlastnosti a význam, vysvětlit, jak fungují, jaké typy a konstrukční provedení se vyrábí a hlavně, jak se vyrábí. Tato kapitola je rozdělena do dvou částí, ve kterých bude postupně popsána konstrukce, tedy různá konstrukční provedení ložisek z důvodu jejich různých vlastností a dále výroba a využití, které poskytují představu o použitých technologiích při výrobě ložisek a příklady jejich využití. Technologie výroby konkrétního ložiska, které je součástí praktické části této práce a důkladněji popisuje technologii výroby ložisek je uvedena na začátku praktické části této práce.

Ložiska jsou jednou z nepostradatelných strojních součástí a podléhají neustálému procesu inovace. Jejich nejdůležitější vlastností je umožnění vzájemného rotačního pohybu jednotlivých součástí ve strojích, za současného přenosu působících sil (přenos pohybové energie), při minimálních ztrátách třením [1, 2].

1.1 Konstrukce ložisek

Ložiska se dělí na dvě základní skupiny, dle způsobu přenosu energie na Valivá a Kluzná a také dle směru přenášeného zatížení na Radiální, Axiální a Kombinovaná (oba směry). Toto rozdělení je možné vidět na obr. 1.1 [2].



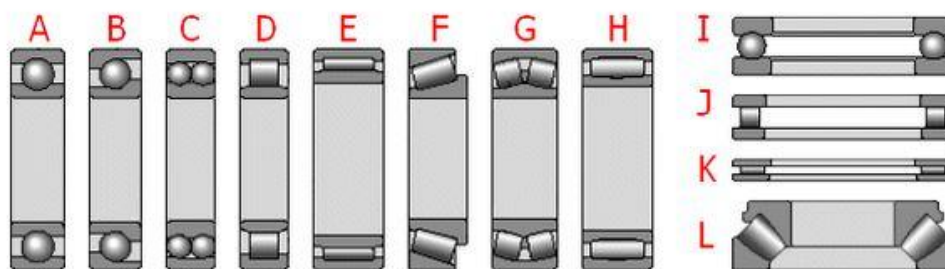
Obr. 1.1 Rozdělení ložisek dle způsobu přenosu energie (valivá a kluzná) a dle směru přenášeného zatížení [2].

1.1.1 Valivá ložiska

Valivá ložiska nabízejí nízké ztráty třením (díky valivým elementům), možnost plného zatížení v klidu i při rozběhu, malou osovou délku (mohou být velmi úzká), nízkou spotřebu maziva a snadnou montáž i údržbu (zejména u ložisek s náplní na celou dobu životnosti) [1, 2].

Obvykle se skládají ze dvou kroužků (vnitřní a vnější, přičemž někdy je počet vyšší), valivých těles a klece (u některých typů ložisek se klec nepoužívá vůbec). Pro správnou funkci valivých ložisek jsou nepostradatelná maziva a různé těsnicí prvky ('O' kroužky, gufera atd.) [1, 2].

Rozdělení valivých ložisek je možné učinit na základě tvaru použitých valivých těles. Takto se valivá ložiska dělí na **kuličková**, **válečková**, **soudečková**, **kuželíková** a **jehlová**. Jediná kuličková, se označují jako ložiska s bodovým stykem, ostatní poté jako ložiska s přímkovým, nebo čárovým stykem. Toto rozdělení je patrné z obr. 1.2 [1, 2].



Obr. 1.2 Typy valivých ložisek [3]: a) kuličkové, b) kuličkové s kosoúhlým stykem, c) naklápěcí kuličkové, d) válečkové, e) jehlové, f) kuželíkové, g) soudečkové, h) toroidní, i) axiální kuličkové, j) axiální válečkové, k) axiální jehlové, l) axiální soudečkové.

1.1.1.1 Kuličková ložiska

Kuličková ložiska jsou základním typem ložisek. Dle uspořádání se dělí na: jednořadá, jednořadá s kosoúhlým stykem, dvouřadá s kosoúhlým stykem, dvouřadá naklápěcí a axiální. Nejběžnějším typem jsou **jednořadá kuličková ložiska**, která jsou poměrně univerzální a vyznačují se jednoduchou konstrukcí, nerozebíratelností, vhodností pro vysoké otáčky, odolností a nepříliš vysokými nároky na údržbu. Díky těmto vlastnostem a příznivé ceně jsou právě kuličková ložiska nejběžněji používaným typem [1, 4].

Jejich konstrukce umožňuje přenášet kromě radiálního i axiálního zatížení (důležitý rozdíl oproti válečkovým ložiskům) v obou směrech, a to i při vysokých otáčkách [1, 4].

Jednořadá kuličková ložiska s kosoúhlým stykem jsou charakteristická nízkým třením, poměrně tichým chodem, vysokou tuhostí, vhodností pro vysoké otáčky a nerozebíratelností. Kosoúhlý styk je zapříčiněn vzájemným posunutím oběžných drah vnitřního a vnějšího kroužku ve směru osy ložiska. To umožňuje těmto ložiskům přenášet radiální i axiální síly současně. Při vhodném uspořádání dvojice těchto ložisek je možné dosáhnout obousměrné axiální zatížitelnosti [1, 4].

Dvouřadá kuličková ložiska s kosoúhlým stykem v podstatě odpovídají dvojici jednořadých ložisek s kosoúhlým stykem, sdružených zády k sobě. Výhodou oproti zmíněné dvojici je zejména menší zástavbová šířka [1, 4].

Dvouřadá naklápěcí kuličková ložiska mají kulovou oběžnou dráhu na vnějším kroužku. Tento tvar umožňuje naklápění ložiska, čímž se vyrovnává nesouosost použité hřídele vzhledem k tělesu. U jiných typů ložisek by takovéto případné naklápění z důsledku nesouososti vedlo k narušení správné funkce ložiska [1, 4].

Axiální kuličková ložiska jsou tvořena hřídelovým kroužkem, tělesovým kroužkem (jindy označovaném jako průchozím) a klecí s kuličkami. Toto provedení kuličkových ložisek je rozebíratelné a může být jednosměrné (pouze jedna klec a dokáže přenášet pouze axiální zatížení v jednom směru) nebo obousměrné (skládá se ze dvou klecí s kuličkami, umístěnými mezi hřídelovým kroužkem a dvěma tělesovými kroužky). Přičemž obousměrné dokáže přenášet axiální zatížení v obou směrech, nicméně opět žádné radiální [1, 4].

1.1.1.2 Válečková ložiska

Jsou využívána převážně pro přenos radiálního zatížení a velkého počtu otáček, nelze je využít při axiálním zatížení. Válečková ložiska mají vysokou tuhost a únosnost [1, 4].

Jednořadá válečková ložiska se vyrábí v základním provedení NU, N a NJ – způsob vedení válečků. U provedení NU jsou válečky vedeny axiálními vodícími nákrůžky vnějšího kroužku, u provedení N jsou vedeny nákrůžky vnitřního kroužku a u provedení NJ jsou to dva nákrůžky na vnějším kroužku a jeden na vnitřním – toto provedení umožňuje přenášet axiální sílu určité velikosti v jednom směru [1, 4].

Dvouřadá válečková ložiska mají oproti jednořadým ještě vyšší tuhost a únosnost. Vnější kroužek těchto ložisek je kompletně bez vodících nákrůžků (žádný přenos sil v axiálním směru) a válečky jsou vedeny třemi vodícími nákrůžky na vnitřním kroužku. Tato ložiska se vyrábí s válcovou nebo kuželovou (pro případné nastavení radiální vůle) dírou a mají mazací drážku s otvory pro mazání ložisek na vnějším kroužku [1, 4].

Axiální válečková a jehlová ložiska jsou určena pouze pro velká axiální a rázová zatížení – nesmí být vystavena žádnému radiálnímu zatížení. Mohou přenášet pouze jednosměrná axiální zatížení. Axiální jehlové klece jsou velmi dobře využitelné, když přilehlé díly mohou posloužit jako oběžné dráhy [1, 4].

1.1.1.3 Jehlová ložiska

Jde pouze o speciální typ válečkových ložisek, kdy průměr valivých elementů (jehel) dosahuje pouze 1–4 mm. I přes malý průřez těchto valivých elementů, je únosnost těchto ložisek vysoká. Jejich hlavní výhodou oproti válečkovým ložiskům je tedy malý rozměr [1, 4].

1.1.1.4 Kuželíková ložiska

Jedná se o speciální ložiska, která umožňují přenášet velké axiální i radiální síly. Velkou nevýhodou těchto ložisek je nicméně náročná a nákladná montáž. Takovéto ložisko se skládá z vnitřního kroužku, valivého elementu (kuželíku), klece a vnějšího kroužku. Jelikož je valivým elementem kuželík, mají oběžné dráhy taktéž tvar kužele. Uložení s kuželíkovými ložisky je tvořeno zpravidla dvojicí těchto ložisek uspořádaných do 'O' nebo do 'X' a vhodná provozní vůle je seřizena při montáži [1, 4].

1.1.1.5 Soudečková ložiska

Ze své podstaty jsou naklápěcí, nerozebíratelná a velmi odolná. Vyrábějí se se dvěma řadami soudečků, díky čemuž dokáží přenést velká zatížení a mají vysokou tuhost. Podobně jako naklápěcí kuličkové ložisko dokáže vyrovnávat nesouososti [1, 4].

1.1.2 Kluzná ložiska

Oproti tomu Kluzná ložiska nabízejí zpravidla menší vnější průměry (konstrukce je jednodušší a obsahuje méně dílů), nižší hmotnost, schopnost přenosu rázových zatížení a jsou méně náchylná na větší přetížení. Důležitou vlastností jsou nižší nároky na přesnost při výrobě, jelikož výroba valivých ložisek je nákladná zejména z důvodu potřeby vysoké přesnosti [2].

1.1.3 Ložisko SLB 84-74

Jedná se o speciální kombinované jehlovo-válečkové ložisko s obchodním označením SLB 84-74. Toto ložisko sestává z osmi součástí popsanych v sestavě (viz příloha 2a) a pouzdra (montuje se pouze suvně na čep o průměru 16mm), které může být centrické nebo excentrické. Pět součástí je nakupovaných (mazací zátka, těsnicí kroužek, axiální kroužek, axiální klec s jehlami a jehlová klec), jelikož se jedná o univerzální součásti,

kteří jsou vyráběny sériově. Konstrukce speciálního ložiska je navržena tak, aby bylo možné použít tyto univerzální součásti a zároveň bylo ložisko vyrobeno dle speciálních potřeb zákazníka. Firmou vyráběnými součástmi jsou vnější kroužek, čep, příložný kroužek a pouzdro.

Tato ložiska se nazývají vodící kladky a jsou konstruována pro použití na přesných vodících kolejnicích PFS a PFSH. Na čepu s oběžnou dráhou je uložen vnější kroužek prostřednictvím jedné nebo dvou radiálních jehlových klecí a dvou axiálních jehlových klecí. „V“ drážky vodících kladek jsou lehce vyklenuté, čímž se sníží valivé tření při působení velkých sil [6].

Na výkresu sestavy (viz příloha 2a) jsou vypsány připojovací rozměry, základní parametry (radiální a axiální dynamická a statická únosnost), použité mazivo a radiální a axiální vůle v ložisku [6].

Výroba tohoto konkrétního ložiska je dále popsána v praktické části této práce.

1.2 Výroba a využití ložisek

Ložiska jsou přesné strojní součásti, což dokládá i to, že se vyrábí v několika různých přesnostech, označovaných postupně P0, P6, P5, P5A, P4, P4A, P2, SP a UP. Přesnost P0 je základní a v označení ložisek se běžně neuvádí. Dále uvedená čísla postupně značí vyšší přesnost (čím nižší číslo, tím vyšší požadovaná přesnost) [1].

Jak již bylo zmíněno v předešlé kapitole, ložiska nejčastěji sestávají ze dvou ložiskových kroužků, valivých těles a klece. Právě k výrobě kroužků a klecí se používají běžné obráběcí technologie (soustružení, frézování), přičemž velký význam mají závěrečné dokončovací operace, jako broušení a lapování (zejména oběžných drah) [1, 5].

Využití ložisek je rozšířeno do vskutku velkého množství průmyslových sfér. V automobilovém průmyslu jsou využívána pro uložení převodovek a jako kolová ložiska. V kolejové dopravě v uložení náprav kolejových vozidel a uložení trakčních motorů. V energetickém průmyslu v uložení horkovzdušných ventilátorů, uložení klapky přečerpávací elektrárny, do větrných elektráren, v uložení kulových mlýnů, turbín a čerpadel. V hutnictví, kde se příležitostně využívají i poměrně neobvyklá dělená ložiska k uložení poutnické stolice pro výrobu bezešvých trubek a uložení válců linky kontilití. V průmyslu těžebním a zpracovatelském do uhelných kombajnů, šterkodrtičků, vytrásacích sít a roštů a v uložení papírenských válců [1].

Jelikož ložiska již neodmyslitelně patří k našemu životu (spektrum jejich použití je velmi široké), existuje mnoho standardních typů ložisek, které jsou vyráběny sériově. Firma, ve které je vyhotovena tato závěrečná práce se věnuje výrobě speciálních ložisek, tedy takových, jejichž rozměry nejsou v katalogu standardních ložisek. Stroje, které se používají v této firmě jsou rozměrově zpravidla co nejvíce univerzální, tak aby bylo možné vyrobit co nejvíce různých rozměrových typů. Největší strojové zastoupení v této firmě mají právě brusky, což napovídá, jak je právě technologie broušení pro výrobu ložisek důležitá [5, 6].

2 BROUŠENÍ A BROUSICÍ NÁSTROJE

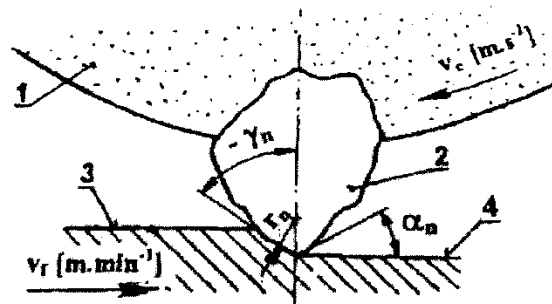
2.1 Broušení

Broušení je jednou z abrazivních metod obrábění. Tento druh obrábění je charakterizován použitím nástrojů s nedefinovanou geometrií břitu a využívá se především při obrábění strojírenských součástí, u kterých je velmi důležitá přesnost tvaru a rozměrů a jakost povrchu. Dalšími abrazivními metodami obrábění, kromě broušení, jsou honování, lapování a superfinišování. Tyto různé metody se liší nejen principem obrábění, ale také dosahovanými parametry obroběných ploch – viz tab. 2.1 [15].

Tab. 2.1 Dosahované parametry obroběných ploch pro abrazivní metody obrábění [5, 15].

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

Broušení patří k nejvýznamnější části technologie výroby dnešní doby, a to jak v průmyslu obecně, tak i při výrobě ložiskových součástí ve firmě SLB, spol. s r.o. Je to způsobeno zejména vysokou přesností broušených povrchů, správností geometrického tvaru a zpravidla velmi dobrou jakostí povrchu. Broušení je specifické nepravidelným rozložením zrn po celém povrchu brousicího kotouče, čímž je dosaženo odebrání velkého množství malých třísek při obrábění (průřez obvykle kolem 10^{-3} mm^2). Schéma záběru brousicího zrna je znázorněno na obr. 2.1 [5, 15].



Obr. 2.1 Model záběru brousicího zrna [15].

Legenda k obr. 2.1, kde [15]:

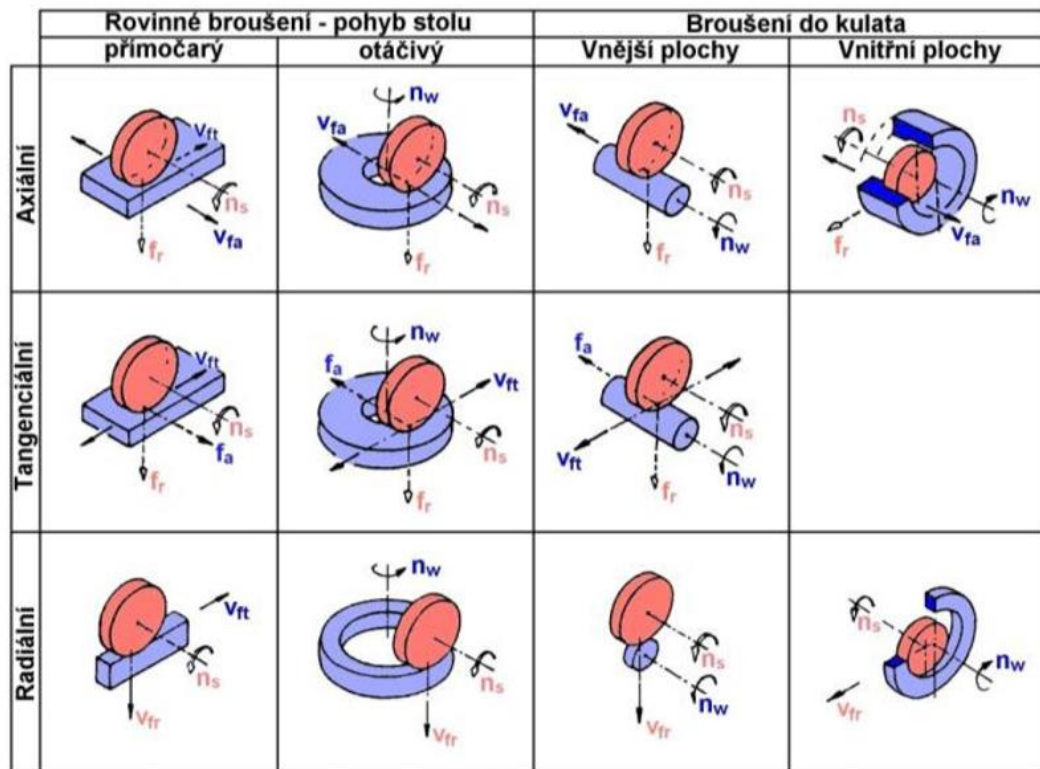
1	- brousicí kotouč,	$v_c [m.s^{-1}]$	- řezná rychlost,
2	- brousicí element,	$v_f [m.min^{-1}]$	- posuvová rychlost,
3	- broušený povrch,	$\gamma_n [^\circ]$	- normální úhel čela,
4	- povrch po broušení,	$\alpha_n [^\circ]$	- normální úhel hřbetu.

Pro broušení je rovněž specifické tzv. samoostření brousicího kotouče, tedy samovolné uvolňování jednotlivých zrn nebo jejich částí při broušení, způsobené poměrně slabým upevněním zrna v pojivu brousicího kotouče. Tento jev ovšem není mnohdy dostatečný a kotouč je zpravidla nutné naostřit (orovnávačem). Dále je nutné zmínit dosahované vysoké hodnoty řezné rychlosti (přes 25 až do 100 $m.s^{-1}$) a s tím související krátká doba záběru zrn brusiva s obrobkem. Z této rychlosti vyvstává velké množství vzniklého tepla, které je potřeba ošetřit kvalitním chlazením obrobku, což způsobuje jisté tepelné zatížení, které má za následek vznik nepříznivých tahových zbytkových napětí v broušené vrstvě (negativní vliv především pro funkci oběžných drah valivých ložisek) [5, 15].

2.2 Základní metody broušení

Nejdříve je nutné definovat různé metody broušení dle hlavního pohybu posuvu stolu (pohybu obrobku), vzhledem k brousicímu kotouči:

- axiální broušení – když je osa brousicího kotouče umístěna rovnoběžně, s hlavním posuvem stolu,
- tangenciální broušení – jedná se o případ, kdy je hlavní posuv stolu rovnoběžný s vektorem obvodové rychlosti kotouče ve zvoleném bodě D (viz obr. 2.2),
- radiální broušení – vzhledem k brousicímu kotouči je hlavní posuv stolu ve zvoleném bodě D radiální,
- obvodové zápichové broušení – posuv stolu je v tomto případě plynulý radiální,
- čelní zápichové broušení – posuv stolu je plynulý axiální [15].



Obr. 2.4 Vybrané způsoby obvodového broušení [5].

Legenda k obrázkům 2.3 a 2.4, kde [5]:

n_s [min^{-1}] – frekvence otáčení brousicího kotouče,

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

v_{fa} [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$] – axiální rychlost posuvu stou,

v_{fr} [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$] – radiální rychlost posuvu stolu,

v_{ft} [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$] – tangenciální rychlost posuvu stolu.

2.2.1 Obvodové broušení vnějších ploch do kulata

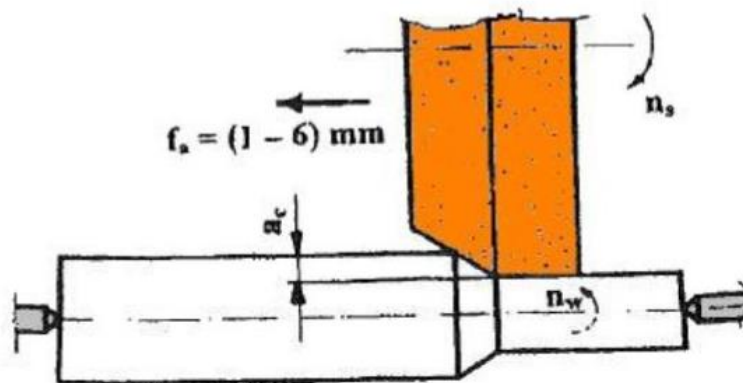
2.2.1.1 Axiální broušení vnějších ploch

Tento způsob broušení s axiálním (podélným) posuvem se používá hlavně při broušení dlouhých rotačních součástí buď válcového nebo kuželového tvaru. Velmi dlouhé a štíhlé součásti mohou být podepřeny lunetou. Schéma je znázorněno na obr. 2.4. Obrobek se při této metodě broušení otáčí mezi hroty (n_w) a současně koná posuvový pohyb (v_{fa}) nebo tento posuvový pohyb koná nástroj. Úběr je zajištěn radiálním posuvem, který opět koná obrobek či nástroj o hodnotu pracovního záběru (f_r) na každý zdvih, popř. dvojzdvih stolu [5, 15].

2.2.1.2 Hlubkové broušení vnějších ploch

Využívá se při malých přídavcích na dokončovací obrábění a řadí se k nejproduktivnějším metodám broušení do kulata. Je to téměř totožný způsob broušení, jako axiální broušení (kapitola 2.2.1.1), jen se zde nevyužívá radiální posuv v úvratích, ale kotouč je nastaven na konečný rozměr obrobku a celý přídavek se tedy obrousí na jeden podélný zdvih stolu, přičemž je nastavena jen malá axiální rychlost posuvu v_{fa} . Schéma hloubkového broušení je znázorněno na obr. 2.5 [5, 15].

K hlavním výhodám této metody patří její výkon, který je o 25 až 75 % vyšší než při axiálním broušení (kapitola 2.2.1.1). Také je velmi výhodné, že pouze malé množství brousících zrn odřeže větší část obráběného materiálu a ostatní zrna brousí na čisto vyjiskřováním (patrné z obr. 2.5). Těto funkci napomáhá vytvoření kuželového zkosení na brousicím kotouči, přičemž toto zkosení může být při velkých přídavcích stupňovité [5, 15].



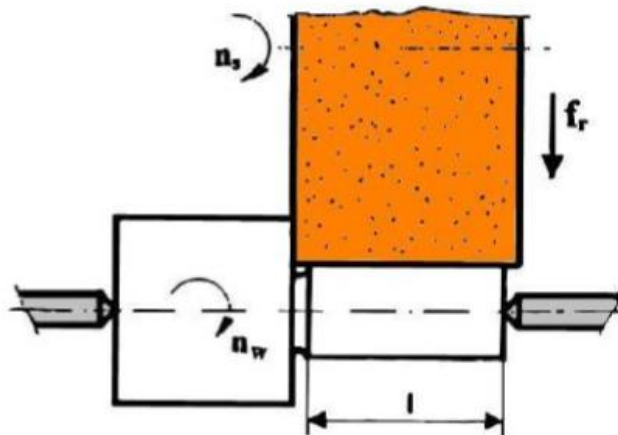
Obr. 2.5 Princip hloubkového broušení [15].

2.2.1.3 Radiální broušení vnějších ploch

Radiální neboli zapichovací broušení se využívá v případě, kdy je obráběn tuhý obrobek, zpravidla do délky 350 mm, přičemž šířka brousícího kotouče musí být větší než délka obrobku (nebo délka obráběné části l). Výkon při tomto typu broušení je přibližně o 40 až 80 % vyšší než u axiálního broušení [5, 15].

Při hrubovacím broušení se obvykle volí radiální záběr stolu (nebo kotouče) na jednu otáčku obrobku $f_r = 0,0025$ až $0,0075$ mm, při broušení na čisto $f_r = 0,001$ až $0,005$ mm. V případě současného broušení více ploch lze použít šikmý posuv brousícího kotouče [5, 15].

Princip radiálního (zapichovacího) obvodového broušení lze vidět schematicky na obr. 2.4 a blíže na obr. 2.6.



Obr. 2.6 Princip radiálního (zapichovacího) broušení [15].

2.2.1.4 Bezhraté broušení vnějších ploch

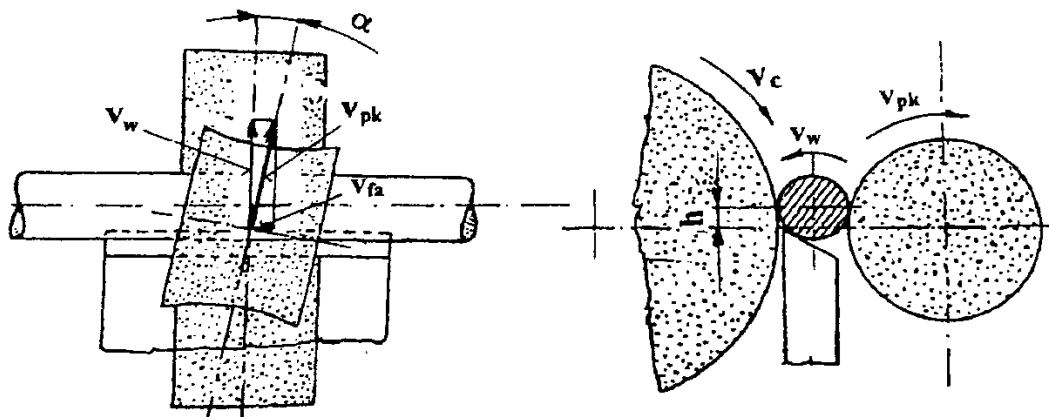
Jedná se o metodu broušení, při které lze využívat princip průchozího i zapichovacího způsobu broušení při vysoké produktivitě práce. Její využití je zejména v hromadné a velkosériové výrobě. Jako typickou aplikaci lze uvést broušení povrchů valivých tělísek – válečků, kuželíků a soudečků [5, 15].

2.2.1.4.1 Bezhraté broušení vnějších ploch průběžné

Je využíváno pro broušení hladkých válcových součástí, jež se vkládají mezi dva kotouče. Jeden kotouč je brousicí a druhý podávací (ten brousicí má zpravidla větší (až dvojnásobný) průměr než podávací). Podélně mezi oběma kotouči je kalená vodící lišta, na které je obrobek veden, přičemž otáčky mu dává podávací kotouč a jeho osa je cca 5 až 30 mm nad osami obou kotoučů (h) [5, 15].

Podávací kotouč lze natočit, čímž je dosaženo rozložení jeho obvodové rychlosti (v_{pk}) na dvě složky: vodorovnou (v_{fa}), která uděluje obrobku axiální posuvový pohyb a svislou (v_w), která jím otáčí příslušnou obvodovou rychlostí (bez ohledu na natočení kotouče o úhel α , který ovlivňuje rychlost posuvu obrobku (obvykle 1.500 až 4.500 mm.min⁻¹)). Schéma je znázorněno na obr. 2.7. Pracovní podmínky jsou doporučeny:

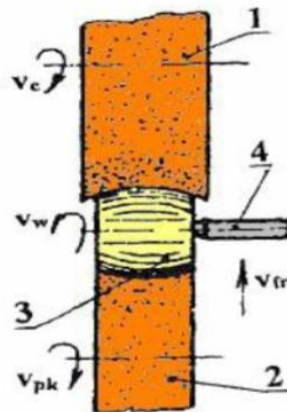
obvodová rychlost brousicího kotouče	$v_c = 30$ až 35 m.s ⁻¹ ,
obvodová rychlost obrobku	$v_w = 18$ až 45 m.min ⁻¹ ,
pracovní radiální záběr	$a_e = 0,005$ až $0,30$ mm [5, 15].



Obr. 2.7 Princip bezhratého průběžného broušení [15].

2.2.1.4.2 Bezhraté broušení vnějších ploch zapichovací

Tento způsob bezhratého broušení se využívá u součástí, které nemají středící dülky a na povrchu mají různé výčnělky – nákrůžek, kuželové nebo tvarové plochy, více souosých válcových ploch. Obrobky se k dorazu mezi brousicí a podávací kotouč (osy kotoučů jsou rovnoběžné) vkládají axiálně shora. Při této metodě se brousí zpravidla na dva úběry (pro druhý úběr se běžně nechává přírůstek 0,03 až 0,05 mm). Schéma této metody broušení je na obr. 2.8 [5, 15].

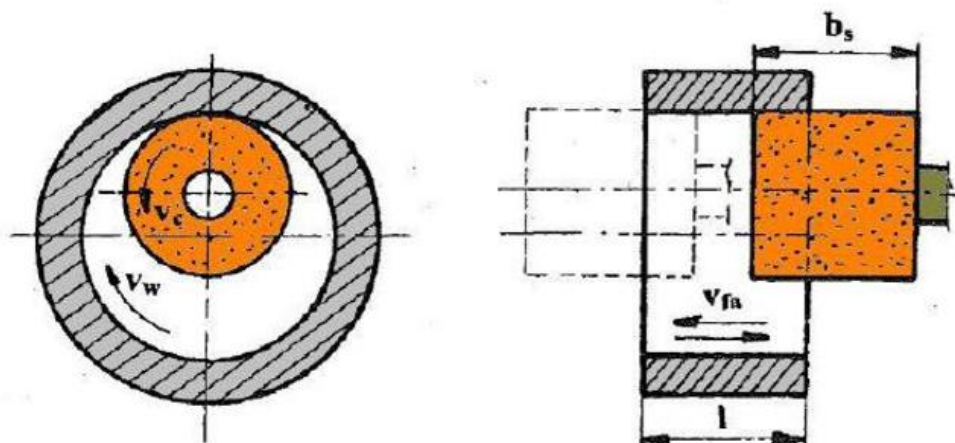


Obr. 2.8 Princip bezhrotého zapichovacího broušení [15]: 1 – brousící kotouč, 2 – podávací kotouč, 3 – obrobek, 4 – doraz.

2.2.2 Obvodové broušení vnitřních ploch do kulata

2.2.2.1 Axiální broušení vnitřních ploch

Při této metodě broušení brousící kotouč (široký b_s) rotuje uvnitř otvoru (širokého l) rychlostí v_c a přitom se posouvá ve směru osy otvoru posuvem v_{fa} . Obrobek se jako v ostatních případech otáčí s frekvencí otáčení n_w a obvodovou rychlostí v_w . O odbroušení přídavku se stará radiální záběr a_e , tedy hodnota vzájemného posunutí součásti a kotouče kolmo na broušený povrch. Schéma vnitřního axiálního broušení je k vidění na obr. 2.4 a na obr. 2.9 [5, 15].



Obr. 2.9 Schéma vnitřního axiálního broušení do kulata [15].

Tato metoda broušení je pro tuto práci nejdůležitější a je nejdůkladněji popsána, jelikož je využívána při praktické části této práce.

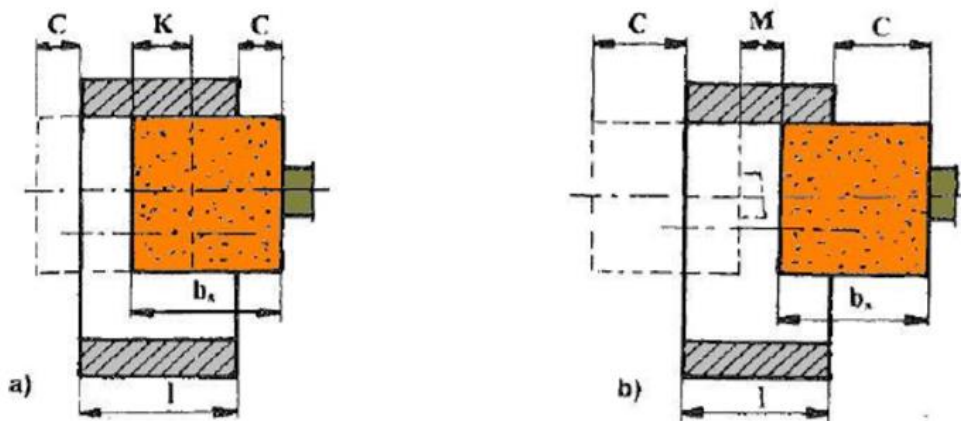
Je nutné správně zvolit brousící kotouč tak, aby odpovídal broušené díře. Zpravidla se průměr brousícího kotouče d_s volí jako 0,7 až 0,9 násobek průměru broušeného otvoru d_w . Nevýhodou této metody broušení je, že brousící kotouče mívají velmi malé rozměry, a proto se poměrně rychle opotřebovávají, zanáší, ztrácí řeznou schopnost i geometrický tvar a je tedy nutné je často orovnávat. Tyto kotouče také vyžadují poměrně vysoké otáčky, což není vždy lehké zabezpečit [5, 15].

Zvyšováním obvodové rychlosti obráběné součásti v_w se zlepšuje odvod tepla, a naopak klesá možnost tvorby opalů na broušeném povrchu. Dále se zhoršují parametry drsnosti obrobené plochy, z důvodu kratšího kontaktu součásti s kotoučem. S touto rostoucí rychlostí narůstají také odstředivé síly a zvyšuje se nepříznivé chvění stroje. Obvykle je poměr mezi rychlostí otáčení součásti v_w a rychlostí otáčení brousicího kotouče v_c v rozmezí 1:60 až 1:100. V tab. 2.2 jsou uvedeny doporučené hodnoty řezných parametrů při operaci vnitřního broušení do kulata, přičemž je možné tyto hodnoty zvýšit o 10 %, v případě broušení kalené oceli [5, 15].

Tab. 2.2 Volba řezných poměrů při vnitřním broušení [15].

Druh práce	Podélný (axiální) posuv f_a [mm]	Pracovní (radiální) záběr a_e [mm]	Obvodová rychlost obrobku v_w [m.min ⁻¹]
<i>Jednoduché brusky</i>			
- hrubování	$(0,4 \div 0,7) \cdot b_s$	0,005 ÷ až 0,02	20 ÷ 40
- broušení na čisto	$(0,25 \div 0,4) \cdot b_s$	0,0025 ÷ až 0,01	20 ÷ 40
<i>Poloautomatické brusky</i>			
- hrubování	$(0,4 \div 0,75) \cdot b_s$	0,0025 ÷ 0,005	50 ÷ 150
- broušení na čisto	$(0,25 \div 0,4) \cdot b_s$	0,0015 ÷ 0,0025	50 ÷ 150

Nastavení rychlosti podélného (axiálního) posuvu v_{fa} se řídí velmi podobnými zákonitostmi jako nastavení obvodové rychlosti obráběné součásti. Její zvyšování vede k lepšímu odvodu tepla, zmenšení tvorby opalů, zvýšení počtu dvojzdvihů za minutu (vyšší frekvence), ale zároveň zvýšení setrvačné síly při změně chodu stolu (vede ke zhoršení makrogeometrie broušeného povrchu). Je důležité také zmínit, že z důvodu částečné kompenzace geometrických chyb pracují kotouče s překrytím nebo s průsvitem, což znázorňuje obr. 2.10 [5, 15].



Obr. 2.10 Schéma vnitřního axiálního broušení [15]: a) s překrytím, b) s průsvitem.

Legenda k obr. 2.10, kde [15]:

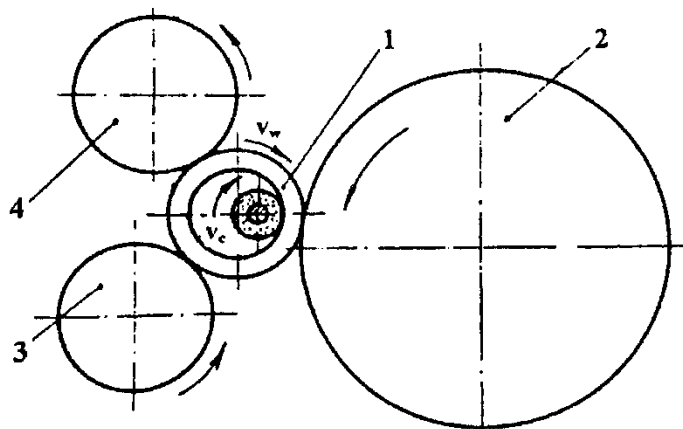
C – přeběh kotouče,

K – překrytí,

M – průsvit.

2.2.2.2 Bezhraté broušení vnitřních ploch

Všechny základní pohyby broušícího kotouče a obrobku jsou stejné jako při klasickém vnitřním broušení, jen upínání obrobku se liší. Ten je upnut dle obr. 2.11. Tato metoda broušení se využívá pouze v případě, kdy je válcový vnější povrch souosý s broušeným vnitřním povrchem, jelikož geometrické nepřesnosti se z vnějšího povrchu kopírují na vnitřní [15].



Obr. 2.11 Schéma vnitřního bezhratého broušení [15].

Legenda k obr. 2.11, kde [15]:

1 – obrobek,

3 – opěrný kotouč,

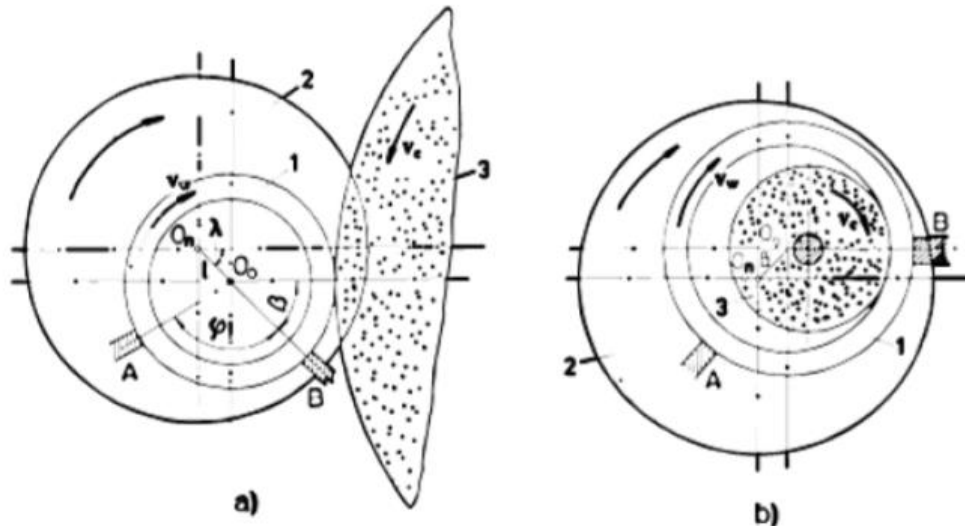
2 – podávací kotouč,

4 – upínací kotouč.

Obrobek 1 je vložen mezi kotouče 2, 3 a 4. Otáčení obrobku zabezpečuje podávací kotouč 2. Polohu (pozici) obrobku naopak zabezpečuje opěrný kotouč 3 a upínací kotouč 4 přitlačuje a tím upíná obrobek během broušení [15].

2.2.2.3 Bezhraté broušení vnitřních ploch v tuhých opěrkách

Jedná se v podstatě pouze o odlišný způsob upnutí, který lze využít jak při vnitřním, tak vnějším broušení do kulata. Touto metodou je možné dosáhnout vysoké přesnosti geometrického tvaru obrobku. Opět se zde musí počítat s přenesením geometrických nepřesností z vnějšího válcového povrchu na vnitřní. Tato metoda broušení se využívá zejména při výrobě přesných ložisek, kdy je nejprve broušen vnější povrch a následně vnitřní. Tato metoda je opět využívána v praktické části této práce. Schéma této metody broušení je na obr. 2.12 [15].



Obr. 2.12 Schéma bezhrotého broušení v tuhých opěrkách [15]: a) vnější, b) vnitřní.

Legenda k obr. 2.12, kde [15]:

1 – obrobek,

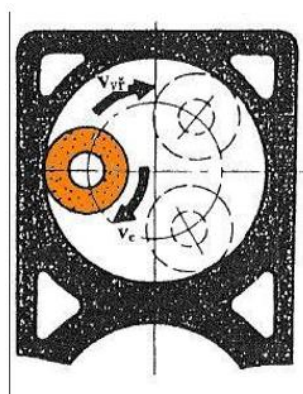
A, B – opěrky,

2 – příruba,

3 – broušící kotouč.

2.2.2.4 Planetové broušení vnitřních ploch

Využívá se při potřebě brousit otvory nerotačních součástí, tedy takových, které na otvorové brusce nelze upnout do sklíčidla nebo čelistí. Stroje jsou speciální a nazývají se planetové brusky. Takový obrobek se upne pevně na stole brusky a samotné vřeteno s broušícím kotoučem, který se točí obvodovou rychlostí v_c , obíhá kolem osy broušené díry rychlostí $v_{vř}$. Vřeteno může konat také axiální pohyb ve směru osy díry s rychlostí v_{fa} . Přesnost při této metodě broušení je bohužel nižší, jelikož vřeteno je z principu svého pohybu méně tuhé. Schéma planetového broušení je na obr. 2.13 [5, 15].



Obr. 2.13 Schéma planetového broušení vnitřních ploch [15].

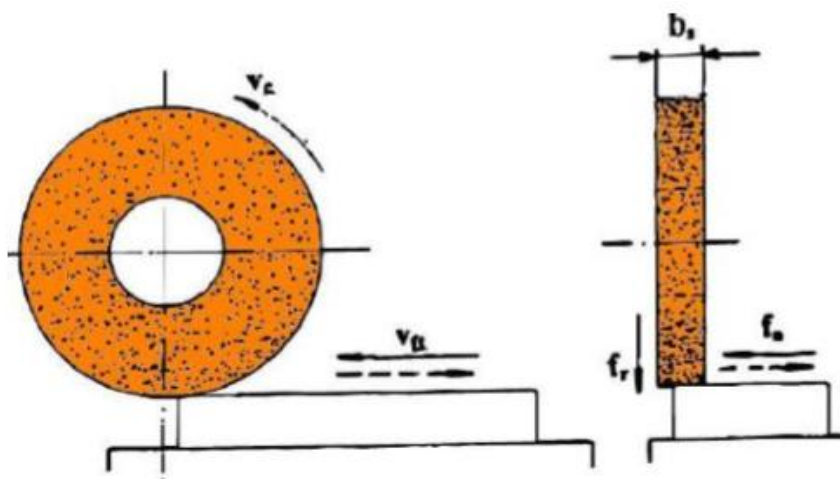
2.2.3 Rovinné broušení

Tato metoda broušení se využívá velmi často jako náhrada frézování v případě obrábění velmi tvrdých materiálů nebo materiálů s tvrdou kůrou. Zpravidla se využívá ale i jako dokončovací operace na čisto až po frézování nebo hoblování. Hojně se využívá také

v průmyslu výroby ložisek, kde je po operaci soustružení a následném tepelném zpracování (zpravidla kalení) nutné brousit čela ložiskových kroužků, z důvodu následného upnutí a broušení válcových povrchů, které mají většinou definovanou kolmost právě na čela. Tato metoda broušení se dělí na dva typy, při kterých je rovinná plocha broušena buď obvodem brousicího kotouče (obr. 2.4) nebo jeho čelem (obr. 2.3) [5, 15].

2.2.3.1 Rovinné broušení obvodové

Obvod kotouče bývá relativně úzký a díky tomu je obrobek jen nepatrně deformován vlivem tepla vzniklého při broušení, čímž se tato metoda řadí mezi nejpřesnější metody broušení ploch. Jak je patrné z obr. 2.4 jsou dvě možnosti, jak brousit rovinnou plochu obvodem kotouče. Obrobek se může buď otáčet (otáčivý pohyb stolu) nebo konat přímočarý pohyb, což je znázorněno na obr. 2.14. Z tohoto obrázku je patrné, že brousicí kotouč se otáčí obvodovou rychlostí v_c , obrobek vykonává podélný vratný pohyb posuvovou rychlostí v_{ft} , kotouč se postupně axiálně posouvá přes obrobek vždy v jedné úvrati (nebo obou) o hodnotu f_a a po obroušení celé plochy se nastaví hloubka broušení radiálním posuvem f_r opakovaně, až po celkový přírůstek na broušení [5, 15].

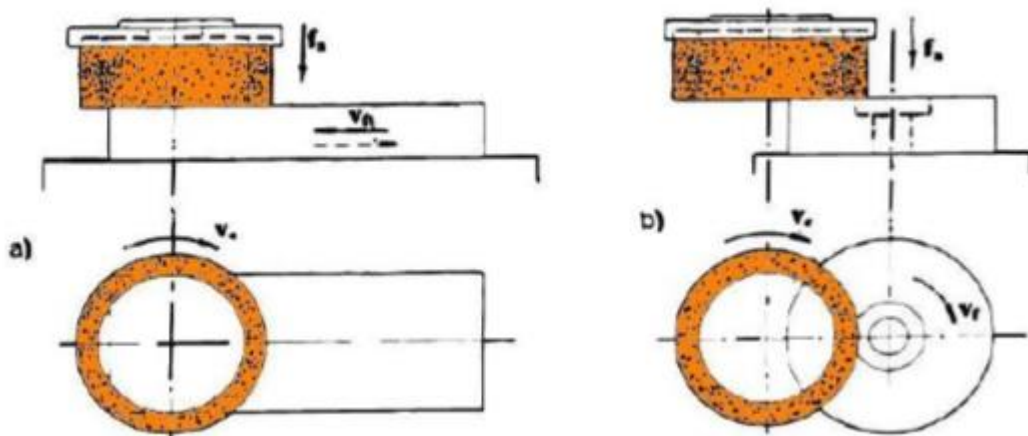


Obr. 2.14 Rovinné broušení obvodové s přímočarým pohybem stolu brusky [15].

2.2.3.2 Rovinné broušení čelní

Nejedná se o tak přesnou metodu rovinného broušení jako je broušení obvodové, nicméně je mnohem výkonnější. Existují opět dvě základní možnosti pohybu obrobku, jimiž jsou přímočarý nebo otáčivý pohyb. Při první z těchto možností, přímočarém pohybu obrobku, se brousí převážně menší součásti jako jsou čelní plochy ozubených kol, písní kroužky a čela kroužků kuličkových ložisek, a to v sériové a hromadné výrobě. Schéma obou možností pohybu stolu u této metody broušení je znázorněno na obr. 2.3 a na obr. 2.15 [5, 15].

Vřeteno u rovinných brusek lze sklonit vzhledem k obráběné ploše (až o 4°), čímž se zmenší styčná plocha nástroje a obrobku. I když se tímto zlepšují řezné podmínky a ulehčí se odstranění třísky, a tedy i chlazení, zhorší se rovinnost [5, 15].



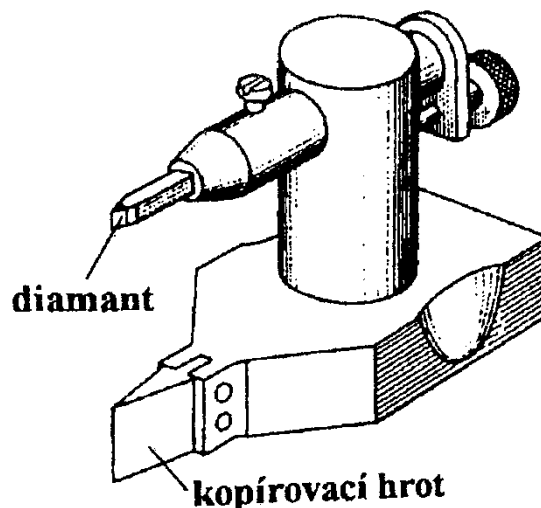
Obr. 2.15 Rovinné broušení čelní [15]: a) přímočarý pohyb stolu, b) otáčivý pohyb stolu.

2.2.4 Tvarové broušení

Kromě běžných způsobů broušení rovinných, válcových a kuželových tvarů existují i povrchy se specifickými a často složitými tvary, které je potřeba brousit. Jedná se zpravidla o kotoučové nože, šablony nebo různé tvarové kalibry. Tyto tvary je možné brousit buď profilovými kotouči nebo kotouči s obvyklým tvarem [5, 15].

2.2.4.1 Tvarové broušení profilovými kotouči

Kotouče profilové se vyrobí z běžných kotoučů orovnáváním pomocí diamantu upnutého v přípravku, který má kopírovací hrot, jenž se pohybuje po šabloně. Profil lze namísto orovnávaní také vytlačit ocelovými kladkami, což ale vede k méně přesnému broušení. Přípravek s diamantem a kopírovacím hrotem je zobrazen na obr. 2.16 [5, 15].



Obr. 2.16 Přípravek pro tvarování brousícího kotouče pomocí šablony [15].

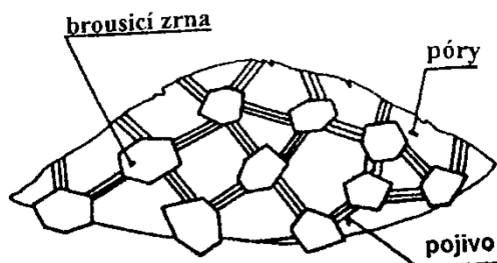
2.2.4.2 Tvarové broušení kotouči s obvyklým tvarem

Jsou zde využívány běžné brousící kotouče a specifický tvar kopíruje samotný brousící kotouč, popřípadě obrobek. Tvar je kopírován s pomocí kopírovacího hrotu nebo přesněji,

je definován číslicově v programových blocích a realizován pomocí číslicového řízení (na CNC bruskách) [5, 15].

2.3 Brousicí nástroje

Základní částí brousicích nástrojů jsou brousicí zrna, která jsou různým způsobem použita při procesu broušení. Mohou být ve formě volných zrn (brousicí, lapovací nebo lešticí prášky), zrn nanesených a přilepených k pružnému podkladu (na brousicích, lešticích plátnech a papírech), ve formě zrn rozptýlených v mazadlech a tekutinách (brousicí a lepicí pasty). Nejčastěji se ale tato zrna tvrdých materiálů vyskytují ve formě zrn spojených pojivem v tuhá tělesa potřebného tvaru (brousicí kotouče a segmenty). Schéma brousicího kotouče je znázorněno na obr. 2.17. V praxi se běžně používají brousicí materiály označované jako standardní (na bázi kysličníku hlinitého Al_2O_3 (umělý korund, elektrit) a na bázi karbidu křemíku SiC (karbidsilicium, karborundum)), dále brousicí diamantové materiály a brousicí materiály z kubického nitridu bóru [5, 15].



Obr. 2.17 Schéma stavby brousicího kotouče – řezné části a spojovací části [15].

2.3.1 Standardní brousicí kotouče

Již zmíněné brousicí materiály typu Al_2O_3 a SiC patří k technologicky nejrozšířenějším. Brousicí kotouče mají volitelnou jakost, tedy různé parametry, které se volí zejména s ohledem na druh obráběného materiálu, jeho fyzikálně-mechanické vlastnosti, požadovanou strukturu povrchové vrstvy po broušení (drsnost povrchu a případné reziduální napětí) a tepelné zpracování [5, 15, 16].

Na obr. 2.18 je zobrazen příklad označení brousicího kotouče na přesné broušení od společnosti Tyrolit, a také informace ke všem uvedeným symbolům. Tento seznam je z katalogu zmíněného výrobce brousicích kotoučů a je zde uveden z důvodu využití těchto kotoučů v praktické části této práce.

89A60M5V217

Označení pojiva	Interní kód, který definuje druh pojiva
Pojivo	
V	keramické pojivo
B	pryskyřičné pojivo
E	elastické pojivo
G	galvanické pojivo
Struktura	
	Čím vyšší číslo, tím otevřenější kotouč
Tvrдост	
	Tvrдост se zvyšuje v abecedním pořadí
G	měkký
R	tvrdý
Popis zrnitosti	
	Označení zrnitosti (velikost síta na palec)
14 – 36	hrubá
46 – 60	střední
80 – 220	jemná
800 – 1 200	velmi jemná
Popis brusiva	
10A	Normální korund
50A	Směs 89A a 10A
52A	Polokřehký korund
80A	Směs 88A a speciálního korundu
87A	Směs 89A a 88A
88A	Růžový korund
89A	Bílý korund
91A	Rubiňový korund
92A	Směs 89A a speciálního korundu
93A	Směs 89A a 91A
97A	Speciální korund
454A	Směs mikrokystalického korundu a 89A
455A	Směs mikrokystalického korundu a 89A
C	Zelený karbid křemíku
1C	Černý karbid křemíku
50C	Směs karbidu křemíku Zelený/černý

Obr. 2.18 Specifikace brousicích kotoučů značky Tyrolit [16].

Systém označování je velmi důležitý, nicméně je potřeba ještě zmínit základní doporučení pro použití standardních brousicích kotoučů. Bude tedy popsáno uvedené značení brousicích kotoučů na obr. 2.18 a popsáno doporučení pro volbu těchto parametrů podle jejich vlivu na proces broušení [5, 16].

Před samotné označení brousicího kotouče se zpravidla připisuje ještě číselné označení tvaru (typu), které může být dle tab. 2.3 a určuje taktéž, jak jsou zapsány rozměry daného kotouče [5, 16].

Tab. 2.3 Označování tvaru a rozměrů standardních brousicích kotoučů [5].

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

Skupina symbolů 89A (viz obr. 2.18), označuje Materiál brousicích zrn. Pro tento parametr je nejdůležitější materiál obrobku. Umělý korund je zpravidla vhodný pro oceli, oceli na odlitky, temperované litiny a tvrdé bronzy, kdežto karbid křemíku je vhodný pro šedé litiny, mosazi, měď, lehké kovy, slinuté karbidy, sklo a dokonce keramiku [5, 16].

Následná číslovka 60 označuje Zrnitost brusiva. Zrnitost je velice důležitá pro výslednou jakost povrchu broušené součásti, přičemž závisí i na materiálu obrobku. Při snižování zrnitosti (brousicí kotouč je jemnější) je možné dosahovat nižší drsnosti obrobené plochy. Naopak pro větší úběry, nižší požadavky na drsnost povrchu a vyšší měkkosti a houževnatosti broušených materiálů se volí hrubší zrnitost. Zrnitost se označuje číslem, které udává počet ok na jeden anglický palec (světlost ok třídících sít). Čím větší je tedy číslo zrnitosti, tím je kontrolní síto – a také zrno – jemnější [5, 16].

Na pozici písmene M je udán symbol popisující Tvrdost kotouče (míru houževnatosti a pružnosti pojivových můstků mezi jednotlivými zrny brusiva – soudržnost brousicího nástroje). U měkkých kotoučů je mnohem snadnější uvolnění otupených brousicích zrn. Volba tvrdosti se řídí pravidlem: „čím tvrdší materiál obrobku, tím měkčí brousicí nástroj“ [5, 16].

Číslovka 5 udává Strukturu (sloh) brousicího kotouče, což znamená vzdálenost mezi brousicími zrny (hutnost brousicího nástroje). Čím vyšší je toto číslo, tím větší je vzdálenost mezi zrny a tím je tedy brousicí kotouč pórovitější. Na tvrdé a křehké materiály se obvykle volí hutné brousicí materiály, naopak na broušení houževnatých materiálů nebo součástí, které se nesmí broušením příliš zahřívát se používají brousicí kotouče pórovité [5, 16].

Pod písmenem V je popsáno Pojivo kotouče, které je velmi důležité z hlediska samoostření nástroje. Keramické pojivo dodává kotoučům univerzální použití, zároveň jsou ale takové kotouče křehké a citlivé vůči nárazům a bočnímu tlaku. Nicméně jim neškodí řezná kapalina a při vhodném skladování se jejich vlastnosti s časem nemění. Dalším typem pojiva je magnezitové, které skladováním ztrácí pevnost a škodí mu vlhké, kyselé i zásadité prostředí. Kotouče s magnezitovým pojivem jsou opět křehké a používají se pro jemný výbrus bez tepelného ovlivnění broušené součásti. Dále se používá pojivo z umělé pryskyřice, které dodává kotoučům lepší odolnost vůči nárazům a bočním tlakům. Tyto kotouče se používají k hrubování, broušení vnějších i vnitřních válcových ploch, rovinných ploch a řezání kovů, kamene i keramiky. Následují kotouče s pryžovým pojivem, které se používají jako tenké řezací kotouče, na jemné ostření nástrojů nebo jako elastické nástroje pro čištění a leštění. Posledními dvěma typy pojiv jsou polyuretanové, vhodné pro jemné broušení a leštění a šelakové, které je vhodné pro leštění kamene [5, 16].

2.3.2 Brousicí kotouče ze supertvrdých materiálů

Samotná funkční vrstva těchto kotoučů (vrstva supertvrdého materiálu – diamant, kubický nitrid boru) je obvykle velmi tenká a podle typu kotouče je vytvořena na jeho obvodu, čele nebo jiné specificky určené funkční ploše. Tato vrstva se vytváří na základním tělese brousicích kotoučů, které je vyrobeno z oceli nebo z hliníkové slitiny (pro snížení hmotnosti). Brousicí zrna umístěná na základním tělese jsou vázána pojivem, které může být kovové (bronz, litina nebo galvanicky vytvořená tenká vrstva kovu) nebo pryskyřičné [5, 15].

Při označování těchto brousicích kotoučů se zpravidla používá tvar kotouče a jeho základní rozměry, typ pojiva, druh a velikost zrn brusiva a jeho koncentrace ve funkční vrstvě nástroje. Příkladem takového označení je tab. 2.4 [5].

Tab. 2.4 Příklad označení jakosti brousicího kotouče ze supertvrdých materiálů [5].

1 (typ, tvar)	2 (rozměry)	3 (pojivo)	4 (druh brusiva)	5 (zrnitost brusiva)	6 (koncentrace brusiva)	8 (max. otáčky)
1 – 150 – 10/2		B – VIII	D 107		K 100	10 000 min ⁻¹

V tab. 2.4 je uveden příklad označení a dále bude vysvětleno použití jednotlivých symbolů a další možnosti složení těchto brousicích kotoučů.

V prvním sloupci tab. 2.4 je uvedeno číslo označující typ (tvar) kotouče. Čísla mají tento význam: 1 – hrncovitý, 2 – plochý, 3 – čelní plochý, 4 – obvodově čelní, 6 – miskovitý, 7 – talířovitý, 8 – kuželový, 11 – miskovitý hluboký, 12 – hrncovitý obvodový atd. Navazující soustava čísel označuje rozměry daného kotouče, kdy se řídí zpravidla stejnými pravidly jako při označování standardních kotoučů (viz tab. 2.3), s tím rozdílem, že poslední číslice za lomítkem označuje tloušťku nanesené brousicí vrstvy [5].

Ve sloupci č.3 je popsán druh pojiva. Jak již bylo zmíněno, používá se pojivo *Pryskyřičné* (B – I až B – XVII, přičemž čím vyšší číslo, tím vyšší tvrdost pojiva), které je nejpoužívanější. Je to způsobeno zejména jeho vysokou produktivitou broušení, nízkým vývinem tepla a dobrými samoostřicími vlastnostmi. Dalším typem je pojivo *Bronzové* (BZ – 1 až BZ – 8 se stejným číselným významem jako u pryskyřičného pojiva), které se využívá při broušení slinutých karbidů. Speciálními druhy tohoto pojiva jsou BZ – S pro broušení keramiky a EB – V pro elektrolytické broušení. Následuje pojivo *Kovové* (SKM), které je obecně velmi tvrdé a využívá se pro broušení dř. Posledním typem je pojivo *Galvanické* (Ni), které se používá všude tam, kde není možné použít klasické technologie výroby brousicích kotoučů (zpravidla tvarově složité nástroje) [5].

Nejdůležitějším údajem je ve sloupci 4, Druh brusiva. Vyskytuje se zde buď označení D – v případě, že funkční vrstva kotouče obsahuje diamantová zrna, nebo B – kdy funkční vrstva kotouče obsahuje zrna kubického nitridu boru. D – Diamant je kubickou modifikací uhlíku a vyznačuje se nízkou měrnou hmotností, vysokou tvrdostí, dobrou tepelnou vodivostí (i když nízkou tepelnou odolností) a velmi dobrou odolností vůči všem chemickým vlivům. Není ovšem vhodný pro obrábění ocelí. B – Kubický nitrid boru je na rozdíl od diamantu syntetický materiál, který se vyrábí za vysokých tlaků a teplot z hexagonálního nitridu boru. Má velmi podobné vlastnosti jako diamant, ale používá se hlavně pro broušení zušlechťených kalených ocelí a nástrojových ocelí [5].

Ke sloupci 4 patří i sloupec číslo 5, jež k označení druhu brusiva přidává ještě číselně vyjádřenou zrnitost brusiva. Toto číslo přesně udává střední velikost zrn v μm [5].

Předposlední sloupec č. 6 označuje koncentraci brusiva a vyjadřuje podíl zrn brusiva v 1 cm^3 funkční vrstvy kotouče. Koncentrace se v označení udává čísly K 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175 a 200, se kterými korespondují koncentrace 0,22; 0,44; 0,66; 0,88; 1,10; 1,32; 1,54 a $1,76\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Kotouče s nízkou koncentrací zaručují dobré samoostřicí vlastnosti, zvyšují výkon broušení a snižují vývin tepla, nicméně snižují živostnost kotouče, zhoršují stálost tvaru a zvyšují drsnost povrchu. Střední koncentrace nabízí v podstatě univerzální řešení, které se tedy používá ve většině případů. Na druhém konci jsou kotouče s vysokou koncentrací, které se vyskytují převážně na úzkých funkčních vrstvách a používají se pro broušení dř a tvarových ploch. Použitím vysoké koncentrace se zvýší životnost kotouče, zlepší se stálost tvaru a sníží se drsnost povrchu, nicméně je zhoršeno samoostření kotouče a zvyšuje se vývin tepla [5].

2.4 Brousicí stroje – brusky

2.4.1 Hrotové brusky

Tento typ je pojmenován podle způsobu upínání obrobků, kdy jsou obrobky zpravidla upnuty mezi hroty (nicméně konstrukce stroje umožňuje místo hrotů umístit i magnet nebo sklícidlo) a je broušena rotační plocha obrobku. Nejrozšířenější jsou univerzální hrotové brusky, které se používají pro broušení válcových, kuželových a čelních ploch (v některých případech i pro broušení dř). Příklady univerzálních hrotových brusek jsou: Cetos BU25H, Studer – S20, S30, S31 (viz obr. 2.19), S32 apod. Na zadní části těchto brusek je zpravidla otočně uložen brousicí vřeteník (umožňuje broušení strmých kuželů) s jedním nebo více

brousicími kotouči. Proti vřeteníku je na stojanu lože, po kterém se podélně pohybuje stůl s pracovním vřeteníkem a koníkem. Na této brusce (obr. 2.19) Studer S31 jsou kupříkladu broušeny oběžné dráhy čepu, který je součástí sestavy ložiska SLB 84-74 [5].



Obr. 2.19 Pohled na vnitřní uspořádání brousicího a pracovního vřeteníku hrotové brusky Studer S31 – stroj patří k vybavení firmy SLB, spol. s r.o.

2.4.2 Bezhraté brusky

Na tomto typu brusek není obrobek nijak upnut a je broušen zpravidla vnější povrch (přičemž existuje i možnost vnitřního broušení rotačních ploch). Příkladem těchto brusek jsou: Lidköping CL660 a Loeser RP+S 377 Heavy Duty. Na bezhratých bruskách je možné zápichové broušení i broušení průběžné. Jsou zde uloženy dva vřeteníky – brousicí vřeteník, které nese brousicí kotouč a vřeteník podávacího kotouče. Každý z těchto vřeteníků má vlastní náhon, jelikož podávací vřeteník má otáčky měnitelné, zatímco brousicí nikoliv. Princip bezhratého broušení je blíže popsán v kapitolách 2.2.1.4 a 2.2.2.2 [5].

2.4.3 Brusky na díry

Vyrábějí se jako sklíčidlové, planetové nebo bezhraté, přičemž asi nejběžnějším představitelem je sklíčidlová bruska na díry. Obrobek se na takové brusce upíná do sklíčidla pracovního vřeteníku, který je uložen na příčných saních. Blíže je princip těchto brusek popsán v kapitole 2.2.2, která se věnuje otvorovému broušení. Na obr. 2.20 je zachycena bruska BDU 80, která byla použita pro praktickou část této práce [5].



Obr. 2.20 Pohled na brusku na díry BDU 80 s upínáním obrobku na elektromagnetickou desku – stroj patří k vybavení firmy SLB, spol. s r.o.

2.4.4 Vodorovné rovinné brusky

Jejich zaměřením je broušení vodorovných ploch, přičemž osa broušícího vřetena je vodorovná. Nejčastějším způsobem upínání obrobků je na této brusce upnutí na elektromagnetickou desku umístěnou na pracovním stole, přičemž stůl vykonává přímočarý vratný nebo otáčivý pohyb. Příklady těchto brusek jsou: Cetos BPH300, Okamoto, Rosa RTRC 4000, apod. Splňují vysoké požadavky na přesnost broušených ploch a velikost stroje je dána šířkou (nebo průměrem) pracovního stolu [5].

2.4.5 Svislé rovinné brusky

Tento typ rovinných brusek má na rozdíl od vodorovných svislou osu broušícího vřetena. Poskytují vysoký výkon broušení, nicméně nedosahuje tak vysoké přesnosti a nízké drsnosti obrobené plochy. Existuje rovněž provedení s přímočarým vratným pohybem stolu i s otáčivým stolem. Broušící vřeteník je posuvný, zatímco pracovní stůl vykonává pouze zmíněný přímočarý vratný pohyb (nebo otáčivý) [5].

2.4.6 Speciální brusky

Toto označení se hodí pro takové brusky, které mají speciální technologické zaměření. Jsou to brusky na ostření nástrojů (Rollmatic – CNC148P4, Microgrind 2000X), brusky na broušení ozubení (Gleason – 400, Maag), brusky pro broušení závitů, brusky pro broušení klikových hřídelí nebo vačkových hřídelí a souřadnicové brusky (Hauser S40-CNC314) [5].

3 PRAKTICKÁ ČÁST PRÁCE

3.1 Popis ložiska SLB 84-74

Při výrobě ložisek se využívá velké množství různých obráběcích technologií a velmi závisí na konkrétním typu ložiska a na vyráběném množství (sériová x kusová výroba). Nebude zde popsána technologie výroby všech součástí daného ložiska, nýbrž pouze technologie otvorového broušení vnějšího ložiskového kroužku, který je základem praktické části této práce.

Jak již bylo zmíněno, jedná se o vnější kroužek kombinovaného jehlovo-válečkového ložiska SLB 84-74 a pro popsání technologie otvorového broušení bude použita výkresová dokumentace této součásti. Jedná se o dva výkresy, které zobrazují stav (a částečně popisují procesy) před („měkké operace“) a po tepelném zpracování (viz příloha 2b a příloha 2c). Vyráběný počet kusů je včetně zmetkového zajištění 250 ks.

3.1.1 Operace před otvorovým broušením

Pro tuto součást je zvolen materiál ocel jakosti ČSN 41 4209 (nebo dle chemického složení 100CrMnSi6-4), válcovaná tyč o průměru 55 mm, žíhaná na měkko. Jedná se o ocel Cr-Mn (je tedy tvářená, ušlechtilá, konstrukční, slitinová, nízkolegovaná), určenou pro valivá ložiska. Tvárnost za tepla a obrobiteľnosť tejto oceli je dobrá. Je vhodná pro výrobu valivých těles i součástí valivých ložisek. Oceli třídy 14 jsou obecně nejvíce používané slitinové oceli, díky tomu, že umožňují dosáhnout velmi dobrých vlastností bez použití nedostatkových prvků [7].

Po dělení materiálu na požadovanou délku (konkrétně vícekus s délkou 550 mm) následuje soustružení na CNC soustruhu MAS SP280. Polotovár je upnut do sklíčidla a dle výkresu – měkké operace (příloha 2b) přesně obroben a upíchnut z vícekusů. Po kontrole dodržení předepsaných parametrů následuje tepelné zpracování.

Obrobky jsou v kooperaci kaleny a popuštěny na požadovanou tvrdost 58 až 60 HRC. Jsou tedy zahřáty na teplotu kolem 800 °C, kaleny do vody a následně popuštěny po dobu 2 hodin při teplotě okolo 230 °C. Tyto údaje jsou dostupné z materiálových listů pro Chromovanou ocel ČSN 41 4209 (14 209) [9, 10].

Po tepelném zpracování přichází na řadu operace, které se řídí druhým výkresem (příloha 2c). První z nich je vodorovné broušení čel na vodorovné rovinné brusce Okamoto, kde jsou obrobky upnuty na elektromagnetické desce umístěné na pracovním stole, který vykonává otáčivý pohyb. Při této operaci je dosažena požadovaná šířka obrobku a přesnost čel, což umožňuje použít čela jako základnu pro upnutí obrobku při dalších broušicích operacích.

Následuje operace vnějšího broušení rotační plochy na hrotové brusce BUB 50. Přesto, že se jedná o hrotovou brusku, je obrobek upnut letmo, pouze na elektromagnetické desce a přesnou pozici mu zajišťují opěrky (lunety). Toto je metoda dobře známá pro výrobce valivých ložisek, nicméně u běžné strojírenské výroby (s využitím broušení) se s ní nelze velmi často setkat.

3.1.2 Otvorové broušení

Otvorové broušení je provedeno na NC otvorové brusce BDU 80. Je nutné zmínit, že tato bruska je pro broušení takto malých součástí využívána v dané firmě nejčastěji a z důvodu snahy o zefektivnění výroby pomocí různých broušicích kotoučů, je tato bruska použita i pro toto testování. Je tak učiněno tedy i přes to, že nenabízí výhody moderních CNC brusek (kupříkladu plynulá změna otáček) a její výkon je limitován.

Kroužky jsou na této brusce broušeny velice podobně jako v minulé operaci vnějšího broušení, tedy upnuty letmo na elektromagnetické desce, přičemž jejich přesnou polohu zajišťují pevné opěrky (lunety).

Všechny kroužky prošly před touto operací stejným výrobním postupem v rámci jedné výrobní dávky. Samotný povrch vnitřní oběžné dráhy, která má být broušena byl obroben na soustruhu a poté tepelně zpracován. Přesné rozměry tohoto povrchu tedy nemusí být u všech kroužků naprosto stejné, nicméně jsou v rámci výkresem uvedené tolerance. Při broušení je tato nesrovnalost ošetřena pevným bodem nájezdu do obrobku – u všech kroužků je začátek operace broušení nastaven na stejnou hodnotu.

K testování je připraveno 5 vzorků různých brousících kotoučů a tyto budou porovnávány zejména z hlediska dosažené jakosti povrchu při měnících se podmínkách a strojním čase. Testování bude dále podrobněji popsáno.

Dále jsou popsány parametry, které musí být dosaženy při operaci otvorového broušení. Jedná se o operaci, při které bude broušena vnitřní oběžná dráha ložiskového kroužku na požadovaný průměr 31 mm s přesností 0,02 mm. Jsou stanoveny podmínky pro Ra, přímost, kruhové házení (obvodové a čelní), kruhovitost/trojhran, kuželovitost a vlnitost (viz příloha 2c).

3.1.2.1 Průměrná aritmetická úchylka profilu povrchu – Ra

Tato veličina je parametrem drsnosti povrchu, která je součástí struktury povrchu – definováno normou ČSN EN ISO 4287. Parametr Ra se numericky hodnotí z profilu drsnosti (obr. 3.1), který je získán pomocí měřicího přístroje s filtrem profilu λ_c z profilu povrchu [11, 13, 14].

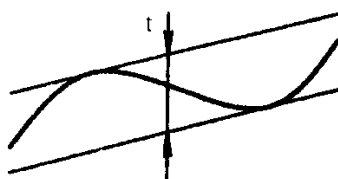
Tato hodnota je zde udána jako maximální přípustná 0,25 μm a pro měření je využit přístroj Perthometer M1 od společnosti Mahr.



Obr. 3.1 Znárodnění významu parametru Ra, kde s značí střední čaru profilu drsnosti [13, 14].

3.1.2.2 Přímost

Jedná se o geometrickou toleranci tvaru, kde je pole přímosti omezeno dvěma rovnoběžnými přímkami. Vzdálenost, ve které se tyto přímky nacházejí jedna od druhé je hodnota tolerance přímosti (obr. 3.2) [11, 12].

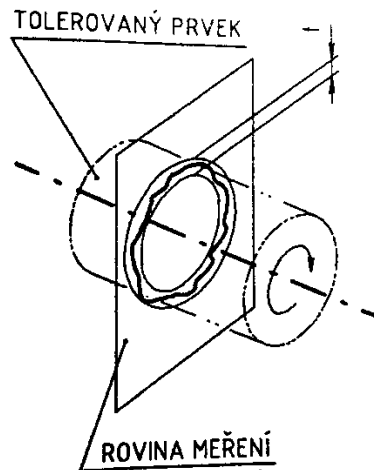


Obr. 3.2 Toleranční pole přímosti křivky v rovině, kde t udává vzdálenost rovnoběžných přímek [11].

3.1.2.3 Kruhové Házení

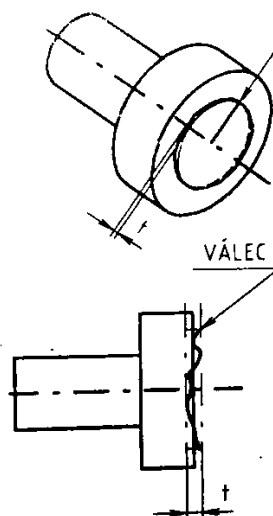
Tato geometrická tolerance se vztahuje k základnám. Zahrnuje tvar tolerované plochy, ale i umístění bodů tolerované plochy vzhledem k základně (příp. základnám). Jindy se tyto tolerance nazývají také Souhrnné tolerance tvaru a polohy [11].

Tolerance obvodového kruhového házení určuje toleranční pole, které je v kterékoliv rovině kolmé k ose omezeno dvěma soustřednými kružnicemi. Tyto jsou od sebe vzdáleny právě o hodnotu tolerance házení t a jejich středy leží na základní ose. Tento parametr se vyhodnocuje na kruhoměru Talyrond 565 LT tak, že se obrobek vystředí podle vnějšího povrchu a následně se snímá broušený otvor. Schéma je znázorněno na obr. 3.3 [11].



Obr. 3.3 Toleranční pole obvodového kruhového házení, kde t udává vzdálenost soustředných kružnic [11].

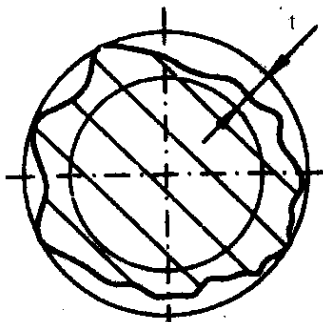
Naproti tomu tolerance čelního kruhového házení určuje toleranční pole, které je omezeno dvěma kružnicemi vzdálenými od sebe právě o hodnotu tolerance házení t . Tyto kružnice jsou umístěny v kterékoliv radiální poloze na válci, jehož osa je totožná se základní osou. Tento parametr se rovněž vyhodnocuje na kruhoměru Talyrond 565 LT, nicméně tentokrát je obrobek vystředěn (včetně nivelace) podle broušeného otvoru a následně je snímáno základní čelo obrobku. Schéma je znázorněno na obr. 3.4 [11].



Obr. 3.4 Toleranční pole čelního kruhového házení, kde t udává vzdálenost souosých kružnic [11].

3.1.2.4 Kruhovitost/trojhran

Jedná se o geometrickou vlastnost profilu obrobku a je vyjádřena jako toleranční pole, které je v dané rovině průřezu omezeno dvěma soustřednými kružnicemi. Tyto jsou od sebe vzdáleny o šířku mezikružní, která je rovna udané toleranci kruhovitosti (obr. 3.5). Tato hodnota je zde udána jako maximální přípustná 0,005 mm a je označena jako trojhran, což naznačuje specifickou metodu vyhodnocení, která principem spadá pod vyhodnocení kruhovitosti. Pro vyhodnocení je opět využit kruhoměr Talyrond 565 LT [11, 12].



Obr. 3.5 Toleranční pole kruhovitosti, kde t udává šířku mezikružní [11].

3.1.2.5 Kuželovitost

Tento parametr je předepisován podle interních pravidel, nikoliv jako standardní kótování kužele na oběžné dráze. Číselný údaj 0,0015 charakterizuje maximální povolenou výšku pravoúhlého trojúhelníku, jehož přepona je lineárním vyjádřením oběžné dráhy a druhá odvěsna leží na přímce rovnoběžné s osou ložiskového kroužku (dle povrchu). Tento parametr je měřen na univerzálním horizontálním délkoměru, změřením průměru levé strany broušeného otvoru (průměrná hodnota ze tří měření), středu broušeného otvoru, pravé strany broušeného otvoru (opět průměrná hodnota ze tří měření) a následné porovnání těchto hodnot.

3.1.2.6 Vlnitost

Tento parametr je opět určen interní normou a nejedná se o složku struktury povrchu, označovanou jako Vlnitost povrchu. Vlnitost označována na výkrese (viz příloha 2c) je úchytkou kruhovitosti, jejíž maxima a minima se opakují přibližně harmonicky, přičemž tento počet opakování a určení velikosti vln je popsán zmíněnou interní normou. Tento parametr je velmi důležitý právě pro valivá ložiska, jelikož při jeho nedodržení hrozí kmitání v celém uložení, což může způsobit nepříznivé a rychlé opotřebení. Vlnitost je měřena podobně jako kruhovitost na přístroji Talyrond 565 LT, s využitím softwaru pro harmonickou analýzu.

3.1.3 Operace po otvorovém broušení

Po otvorovém broušení, což bývá zpravidla poslední operace následuje soustružení za tvrda. Jedná se o obrábění axiálních oběžných drah a rybiny, což jsou plochy s požadavkem na obrábění po tepelném zpracování, nicméně s méně přísnými požadavky na povrch než na broušení. Kroužky jsou na soustruhu upnuty do měkkých čelistí (nekalené, na přesný rozměr obrobenej) a nástrojem jsou břitové destičky určené pro obrábění zakalené oceli s danou tvrdostí.

3.2 Broušící kotouče

Pro otvorové broušení daného vnějšího ložiskového kroužku bylo s pomocí společnosti Tyrolit vytipováno 5 broušících kotoučů s totožnými rozměry a tvarem, avšak rozdílným složením. Dále jsou tyto kotouče jednotlivě popsány, je uvedeno jejich složení a doporučené řezné podmínky, a následně je provedeno porovnání předpokládaných výsledků broušení (časová náročnost a jakost broušeného povrchu).

Všechny uvedené kotouče mají tvar 1 (dle tab. 2.3), vyjma CBN kotouče, který má tvar 1A1, což je specifické označení výrobce a názorně lze tvar tohoto kotouče vidět na obr. 3.10. Všechny uvedené kotouče mají taktéž stejné rozměry 20x20x6 (dle tab. 2.3).

3.2.1 Kotouč 5RNA 80 K 9 V C40

Tento typ kotouče byl dle informací z firmy SLB spol. s r.o. speciálně vyvinut pro potřeby broušení valivých ložisek a konkrétně se jedná o směs umělých korundů 98A (světle růžový korund – jedná se o směs 98 % Al_2O_3 s příměsí 1-1,5% Cr_2O_3 a méně než 0,4 % Fe_2O_3) a 96A (hnědý korund – získává se z blokových pecí, při kontrolované tavně bauxitu o teplotě cca 1.800 °C. Obsahuje 95,5 % Al_2O_3 a několik legujících prvků). Tato směs naneštěstí není uvedena na obr. 2.18, který popisuje systém označování kotoučů, jelikož společnost Tyrolit uvádí více těchto tabulek, a ne všechny jsou totožné, nicméně je uvedena v katalogu skladových výrobků společnosti Tyrolit. Jedná se o jemně zrnitý kotouč (80), na hranici mezi měkkým a středně tvrdým kotoučem (K), otevřený (9) s keramickým pojivem (V), vhodný pro broušení kalené oceli (nelegované a nízkolegované). Momentálně je tento typ broušícího kotouče využíván v drtivé většině případů otvorového broušení ve firmě SLB, spol. s r.o., a to zejména z důvodu univerzality jeho použití. Dle zkušeností nabízí velmi dobrou schopnost profilování a tvarovou stálost, a je velmi univerzální co se týče využití pro různé veliké broušené otvory. Maximální udávaná obvodová rychlost tohoto kotouče je 40 m.s⁻¹. Cena 1 ks tohoto kotouče je 41,61 Kč a minimální odběr je 50 ks Tento kotouč je zobrazen na obr. 3.6 [15, 16, 17, 19].



Obr. 3.6 Broušící kotouč 5RNA 80 K 9 V C40.

3.2.2 Kotouč 89A (A99B) 802 I5 V111

Tento typ broušících kotoučů se vyznačuje svojí univerzálností pro broušení válcových ploch. Jejich hlavním účelem je broušení nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. Jsou vyrobeny ze speciálního korundu a používají se převážně k broušení průchozích a středících otvorů. Při svých vlastnostech by měly nabízet vysoký výkon úběru materiálu a vynikající tvarovou stálost, přičemž zvolené provedení 89A 802 (oproti 89A 602) je vhodné právě na kalené oceli [15, 16].

Na obr. 2.18 je možné tento materiál broušícího kotouče snadno nalézt a specifikovat jej jako bílý korund – opět se vyrábí tavnou bauxitu, jen v obloukových pecích při teplotě

2.000 °C. Obsahuje 99,4 % Al_2O_3 . Z následujícího trojčíslí je podstatné číslo 80, které udává jemnou zrnitost. Jemná zrnitost je volena z důvodu typu broušeného materiálu (kalená ocel) a také z důvodu potřeby nízké drsnosti broušené plochy. Za číslem 80 je uvedena ještě číslice 2, která není blíže specifikovaná, nicméně nemá podstatný vliv. Dále je uvedeno označení I5, což značí měkký a polohutný kotouč. Je zvolen kotouč měkký, opět z důvodu vysoké tvrdosti materiálu (také díky dobrým samoostřícím vlastnostem) a polohutný, ze stejného důvodu. Písmeno V označuje keramické pojivo, které je velmi vhodné k použití s měkkým kotoučem (díky samoostřícím vlastnostem) a také z důvodu univerzálního použití. Poslední trojčíslí je pouze interní popis druhu pojiva, který není blíže vysvětlen. Maximální udávaná obvodová rychlost tohoto kotouče je $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Cena 1 ks tohoto kotouče je 41,61 Kč a minimální odběr je 25 ks. Tento kotouč je zobrazen na obr. 3.7 [15, 16, 19].



Obr. 3.7 Brousicí kotouč 89A 802 I5 V111.

3.2.3 Kotouč 97A 802 I5 V112

Jedná se o nástroj s keramickým pojivem pro broušení vnitřních válcových ploch. Lze je využít k broušení jak nelegovaných a nízkolegovaných ocelí, tak i vysoce legovaných kalených ocelí, a dokonce i rychlořezných ocelí. Svými vlastnostmi představuje cenově poměrně výhodnou alternativu k nástrojům s nitridem boru. Nabízí dobrou schopnost profilování a má dobrou tvarovou stálost [15, 16].

Z obr. 2.18 lze opět materiál tohoto kotouče nalézt a specifikovat jej jako speciální (polokřehký) korund modré barvy pro broušení nízko legovaných ocelí. Obsahuje 99 % Al_2O_3 a není ničím legován, označuje se jako monokrystal. Následující údaje jsou téměř totožné jako u předchozího kotouče. Opět se jedná o jemně zrnitý kotouč (80), který je rovněž měkký a polohutný (I5). Pojivo je opět zvoleno keramické, z důvodu velmi dobrých vlastností a vhodnosti pro dané použití. Maximální udávaná obvodová rychlost tohoto kotouče je $60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Cena 1 ks tohoto kotouče je 43,82 Kč a minimální odběr je 25 ks. Tento kotouč je zobrazen na obr. 3.8 [15, 16].



Obr. 3.8 Brousicí kotouč 97A 802 I5 V112.

3.2.4 Kotouč AT60 J6 VCOL (Columbia)

Tento kotouč je poměrně novým a velmi opěvovaným výrobkem společnosti Tyrolit. Jedná se o nástroj s keramickým (speciálním) pojivem vhodný pro broušení vnitřních válcových ploch. Vychází z kotouče 97A a lze jej obdobně využít k broušení jak nelegovaných a nízkolegovaných ocelí, tak i vysoce legovaných kalených ocelí, a dokonce rychlořezných ocelí. Tento kotouč je vyroben z mikrokrystalického korundu AT60 a je vhodný pro univerzální použití. Dle vyjádření společnosti Tyrolit jsou brousící kotouče Columbia překlenutím technologické propasti mezi brousícími nástroji z tavných korundů a superbrusivy. Nabízí vysokou kvalitu broušených obrobků, maximální hospodárnost a bezpečnost procesu [15, 16].

Jelikož tento kotouč typově vychází z kotouče 97A, jde opět o speciální korund modré barvy, ovšem se speciální vazbou. Obsahuje 99 % Al_2O_3 a není ničím legován, označuje se jako mikrokrystal. Z dalších označení lze vyčíst, že se jedná o středně zrnitý kotouč (60), který je rovněž měkký a polohutný (J6). Pojivo je, jak již bylo řečeno, keramické (V), nicméně není standardní a poslední písmena jsou opět pouze interním označením. Maximální udávaná obvodová rychlost tohoto kotouče je $80 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a doporučená je $60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Cena 1 ks tohoto kotouče je 65,17 Kč a minimální odběr je 25 ks. Kotouč je zobrazen na obr. 3.9 [15, 16].



Obr. 3.9 Brousící kotouč AT60 J6 VCOL (Columbia).

3.2.5 Kotouč CBN B107 K100

Posledním kotoučem je velmi nákladný a dle parametrů velmi účinný brousící kotouč z CBN, tedy kubického nitridu bóru. Tento materiál vyniká velmi vysokou tvrdostí (udává se, že jde o druhý nejtvrdší známý materiál po diamantu), dobrou tepelnou vodivostí a tepelnou stálostí do $1.200 \text{ }^\circ\text{C}$. Využívá se zejména k opracování zušlechťených nástrojových ocelí, nicméně se velmi dobře hodí i pro „pouhé“ kalené oceli nad 55 HRC. Tento kotouč má vcelku shodný tvar, jako ostatní uvedené kotouče, nicméně tvar samotného brusiva, které tvoří brousící vrstvu kotouče je označován jako 1A1. Jedná se o takový tvar, kdy brousící zrna v pojivu tvoří pouze vnější povrch (v tomto případě 3 mm) a vnitřek kotouče je pouze ocelovou základnou. Důvodem je vysoká cena tohoto brusiva [15, 18].

Dle označení a vysvětlivek, dodaných s kotoučem se jedná o CBN brousící kotouč s pryskyřičným pojivem, které je výhodné zejména svojí univerzálností. Zrnitost je popsána číslem 107, což je přesné vyjádření střední velikosti zrn v μm a jedná se o jemně zrnitý kotouč. Dále koncentrace 100, která vyjadřuje hmotnost brusiva na objem brousící vrstvy jako $0,88 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Další označení jsou opět pouze informativní označení pro výrobce. Maximální udávaná obvodová rychlost tohoto kotouče je $60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a doporučená je $40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Cena 1 ks tohoto kotouče je 1.065 Kč a minimální odběr je 1 ks. Kotouč je zobrazen na obr. 3.10 [15, 16, 18].



Obr. 3.10 Brousicí kotouč CBN B107 K100.

3.2.6 Rozdílnost jednotlivých kotoučů

Jak bylo zmíněno, kotouč 5RNA je směsí korundů 98A (světle růžový korund) a 96A (hnědý korund). Toto specifické složení mu dává mnohem vyšší tvrdost oproti bílému korundu 89A (díky světle růžovému korundu) a dále vysokou houževnatost a pevnost (díky dobře rostlým krystalům hnědého korundu). Kotouč 89A (bílý korund) má nižší houževnatost a vyšší tvrdost než samostatný hnědý korund a díky minimálnímu množství volného železa se velmi dobře hodí i pro broušení nerezové oceli. Kotouč 97A je jakýmsi pomyslným schůdkem mezi běžnými korundy a směsem s nákladným mikrokrytalickým korundem. Díky keramickému pojivu a svému složení má omezenou rychlost na $60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, což je opět o něco více než u předchozích dvou kotoučů. Mezi uvedenými třemi kotouči nejsou výrazné rozdíly ve vazbě, ani vlastnostech vycházejících přímo z jejich označení (jemně zrnité kotouče s keramickou vazbou) a rozdíly mezi těmito kotouči jsou dány převážně jejich složením (typem použitého korundu, potažmo směsí). Pouze kotouč 5RNA je měkký až středně tvrdý (dáno příměsí světle růžového korundu), což znesnadňuje uvolňování otupených zrn a má otevřenou strukturu (je pórovitější), která snižuje výrazné zatížení zahříváním při broušení [15, 16, 17, 19].

Dalším uvedeným je kotouč AT60, označovaný jako Columbia. Tento kotouč sice typově vychází z kotouče 97A, nicméně se jedná o speciální korund - mikrokrytal. Vazba je nyní speciální. Dále je rozdíl v zrnitosti kotouče, který je středně zrnitý. Střední zrnitost je důležitá, jelikož znesnadňuje dosažení požadovaného Ra, nicméně je kotouč dobře připraven na vyšší úběr materiálu. Kombinace střední zrnitosti a měkkosti brousícího kotouče mu obzvláště při nižších rychlostech způsobuje nevhodné, nerovnoměrné opotřebení, jelikož větší zrna jsou více náchylná na uvolnění než zrna jemná [15, 16].

Posledním uvedeným kotoučem je CBN, který je oproti ostatním velmi tvrdý a je jemně zrnitý. Jeho velkou výhodou je to, že není nutné jej často orovnávat, tedy ztrácet čas a opotřebovávat kotouč. Tento kotouč je určen pro broušení výrazně tvrdších materiálů, a proto nejsou očekávány výrazně lepší výsledky než u ostatních kotoučů [15, 16, 18].

3.3 Testování brousících kotoučů

Pro testování v provozu firmy SLB, spol. s r.o. bylo vybráno výše popsanych 5 brousících kotoučů totožných rozměrů. Strojem pro testování těchto kotoučů v praxi je univerzální bruska na vnitřní broušení BDU 80 (viz příloha 1) a obráběnými kusy jsou vnější ložiskové kroužky ložiska SLB 84-74 (viz příloha 2c), na kterých je broušena vnitřní oběžná dráha.

BDU 80 je již letitou bruskou a využívá se zejména k broušení malých otvorů o průměru do 40 mm. Tato bruska má NC nastavbu, což znamená, že je částečně numericky řízená. Její nevýhodou je naneštěstí stáří a nižší výkon, než mají nové CNC brusky, které jsou zároveň uživatelsky bezpečnější.

3.3.1 Pevně nastavené parametry broušení

Již ze začátku je pevně nastaveno umístění obrobku (letmo na elektromagnetu, zajištěn dvěma lunetami (opěrkami)), počáteční pozice broušícího kotouče (posuv do záběru vychází vždy ze stejné pozice, čímž se eliminují možné rozdíly ve velikosti jednotlivých obrobků) a konečná pozice broušícího kotouče (tedy velikost úběru materiálu) a nastavení úvratí.

Jelikož se jedná o axiální broušení vnitřní plochy do kulata (z důvodu šířky broušících kotoučů, která je menší než šířka broušeného otvoru), je nutné, aby broušící kotouče vykonávaly axiální pohyb v otvoru, konkrétně s překrytím (viz obr. 2.10a). Tato metoda je popsána v kapitole 2.2.2.1. Překrytí neboli přeběh kotouče, označovaný písmenem C je nastaven na $C = 2,5$ mm.

Při všech nastaveních bylo rovněž použito totožné chlazení, a to jak způsob chlazení (tryskou na broušený povrch), tak typ chladiva (Quakercool).

Počáteční pozice broušícího kotouče je nastavena na průměr 30,680 mm (z důvodu možného zvětšení vrstvy materiálu po tepelném zpracování) a konečná pozice broušícího kotouče je nastavena na průměr 31,005 mm, tedy přesně do středu tolerance (z důvodu snazšího udržení všech obrobků v toleranci). Broušící cyklus je sestaven ze tří částí. Nejprve je hrubovací broušení od počáteční pozice 30,680 mm až do 31,000 mm (radiální posuv je měnící se parametr a bude popsán později), na této míře je radiální posuv zastaven a je provedeno krátké vyjiskření (taktéž jeden z měnících se parametrů). Po hrubování následuje odjezd broušícího kotouče na orovnění diamantovým orovnávačem (tato část je vynechána u CBN kotouče) o 0,02 mm, z důvodu zajištění přesnosti při závěrečné fázi broušení, dokončovací operaci (orovnění trvá 8s). Při dokončovací broušení je počáteční pozice 30,980 mm (je zde ponechána mírná rezerva z důvodu možného opotřebení kotouče při hrubování, a tedy neobrobení otvoru až na míru 31,000 mm) a konečná pozice 31,005 mm. Součástí dokončovacího broušení je rovněž vyjiskření, které zajišťuje finální korekci jakosti povrchu a zlepšení broušených parametrů.

Dalším pevně nastaveným parametrem je rychlost axiálního posuvu broušícího kotouče mezi úvratěmi. Tento parametr nelze z brusky přímo vyčíst, nicméně na základě měření je jeho hodnota $v_{fa} = 0,52$ m.min⁻¹ (nebo velikost axiálního posuvu $f_a = 6$ mm.zdvih⁻¹). Nelze uvést hodnotu axiálního posuvu na otáčku, jelikož otáčky obrobku jsou měnícím se parametrem.

Dále je to velikost broušícího kotouče, jehož počáteční průměr je u všech kotoučů 20 mm, nicméně takto dodané kotouče nejsou přesně rovné a je potřeba je před broušením orovnat. Všechny broušící kotouče byly orovnány na průměr 19,8 mm. V průběhu broušení taktéž dochází k orovnění kotoučů, a sice vždy po fázi hrubování. Orovnění je provedeno syntetickým diamantem s pevně nastaveným hrotem, který orovnává kotouče vždy o 0,02 mm oproti původnímu stavu (tedy ne od aktuálního průměru po hrubování). Jediným kotoučem, který není orovnáván je poslední, CBN broušící kotouč, který orovnění během testovacího broušení nevyžadoval.

Posledním parametrem, který nebyl v průběhu prvního testování měněn je rychlost brusného vřeteníku. Otáčky motoru jsou pevně nastaveny na nejvyšší možné $n_m = 2\ 850$ min⁻¹. Tyto otáčky jsou předány brusnému vřeteníku (převod pomocí řemene na dvou kolech o průměru $d_m = 190$ mm a $d_{sv} = 20$ mm), který má následně otáčky $n_s = 27\ 075$ min⁻¹. K tomuto výpočtu je využit vztah (3.1) pro výpočet ideálního převodu [11].

$$u = i = \frac{n_m}{n_s} = \frac{d_{sv}}{d_m} \quad [-] \quad (3.1)$$

Kde: u [-] - převodové číslo,

i [-]	- převodový poměr,
n_m [min^{-1}]	- frekvence otáček motoru,
n_s [min^{-1}]	- frekvence otáček brusného vřeteníku,
d_m [mm]	- průměr řemenice u motoru,
d_{sv} [mm]	- průměr řemenice u brusného vřeteníku (kotouče) [11].

Tento vztah lze přepsat pro výpočet otáček brusného vřeteníku na:

$$n_s = \frac{n_m \cdot d_m}{d_{sv}} = [\text{min}^{-1}] \quad (3.1)$$

Otáčky brusného vřeteníku přímo určují obvodovou rychlost brousicího kotouče (na maximálním průměru), která je téměř shodná s řeznou rychlostí a značí se v_c . Maximální průměr brousicího kotouče je pro účely porovnání nastaven na 19,8 mm, i přes to, že v průběhu broušení dochází k orovnávaní kotoučů, a tedy jejich postupnému zmenšování až na průměr 19,7 mm. Tento rozdíl je zanedbán, z důvodu velmi malého ovlivnění obvodové rychlosti kotouče (u menšího průměru kotouče je rychlost v_c nižší přibližně o 0,14 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). Obvodová rychlost kotouče s maximálním průměrem 19,8 mm je $v_c = 28,07 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a k výpočtu je použit vzorec (3.2) [15].

$$v_c = \frac{\pi \cdot D_{\max} \cdot n_s}{60 \cdot 10^3} [\text{m}\cdot\text{s}^{-1}] \quad (3.2)$$

Kde: D_{\max} [mm] - maximální průměr brousicího kotouče,
 n_s [min^{-1}] - frekvence otáčení brousicího kotouče,
 v_c [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] - obvodová rychlost brousicího kotouče [15].

3.3.2 Měnicí se parametry broušení

Každý brousicí kotouč je použit pro 5 různých nastavení procesu broušení. Jedná se o různé kombinace celkem 3 měnicích se parametrů: Obvodová rychlost obrobku v_w , radiální posuv kotouče do záběru (radiální záběr) a_e a doba vyjiskření t_v .

Obvodová rychlost obrobku v_w , která se vypočítá ze vztahu (3.3) je tedy měnicím se parametrem a její velikost ovlivňuje: rychlost deformace a odběr třísky, velikost řezné síly, drsnost a kvalitu obrobené plochy a opotřebení brousicího kotouče [15].

$$v_w = \frac{\pi \cdot D_w \cdot n_w}{10^3} [\text{m}\cdot\text{min}^{-1}] \quad (3.3)$$

Kde: d_w [mm] - průměr obráběného povrchu,
 n_w [min^{-1}] - frekvence otáčení obrobku,
 v_w [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$] - obvodová rychlost obrobku [15].

Radiální záběr brousicího kotouče je velmi podstatný pro určování objemových charakteristik třísky a vyhodnocení řezných sil. Přímou určuje, jak velké množství materiálu bude odebráno během jednoho přejezdu brousicího kotouče z pravé úvratě do levé a zpět. Radiální záběr se neudává jako rychlost, jelikož se jedná o vzdálenost přísluvu brousicího kotouče směrem do obrobku, který se přidává vždy v jedné z úvratí [15].

Posledním měnicím se parametrem je doba vyjiskření, která se v procesu broušení objevuje dvakrát, nejprve po hrubování t_{v1} a na závěr po dokončovacím broušení t_{v2} . Proces vyjiskření

má za cíl zlepšit kvalitu broušeného povrchu a v jeho průběhu se již kotouč neposouvá směrem do záběru, zůstává na poslední dané radiální pozici (stále je konán axiální posuv). Proces vyjiskření má nejvýznamnější vliv na jakost obrobku, zejména na parametr Ra [15].

Jedním z parametrů, které se pasivně mění je řezná síla. Řezná síla lze spočítat, ale vybavení stroje neumožňuje ji přímo měřit, není tedy specifikována jako jeden z parametrů, které jsou měněny na předem danou hodnotu. Výpočet je dle rovnice (3.4) a při popisu grafů uvedených dále je popsán pouze vliv zvyšující se nebo snižující řezné síly, není pracováno s její konkrétní hodnotou. Dle rovnice (3.4) je patrné, že vyšší řeznou sílu způsobuje rostoucí řezná rychlost, axiální posuv nebo radiální záběr [15].

$$F_c = C_m \cdot v_c^{0,7} \cdot f_a^{0,7} \cdot a_e^{0,6} [N] \quad (3.4)$$

Kde: F_c [N] - řezná síla,
 C_m [-] - konstanta charakterizující obrobek (pro kalené oceli $C_m = 21$),
 v_c [m.s⁻¹] - obvodová rychlost brousícího kotouče,
 f_a [mm.zdvih⁻¹] - axiální posuv,
 a_e [mm] - radiální záběr [15].

Dalším způsobem výpočtu řezné síly je pomocí měrné řezné síly k_c . Tento výpočet je možný dle rovnice (3.5) a rozšiřující rovnice (3.6). Tyto rovnice přidávají do výpočtu i obvodovou rychlost obrobku, která je jedním z měnících (a nastavitelných) parametrů. Lze vyčíst, že zvyšující se obvodová rychlost obrobku má zvyšující vliv na řeznou sílu.

$$F_c = k_c \cdot A_D [N] \quad (3.5)$$

Kde: k_c [MPa] - měrná řezná síla,
 $k_c = 10.000 - 35.000$ MPa pro ocel, $4.000 - 12.000$ MPa pro litinu,
 A_D [mm²] - nominální (jmenovitá) plocha řezu [15].

$$A_D = \frac{v_w}{60 \cdot v_c} \cdot a_e \cdot f_a [mm^2] \quad (3.6)$$

Kde: A_D [mm²] - nominální (jmenovitá) plocha řezu,
 v_w [m.min⁻¹] - obvodová rychlost obrobku,
 v_c [m.s⁻¹] - obvodová rychlost brousícího kotouče,
 f_a [mm.zdvih⁻¹] - axiální posuv,
 a_e [mm] - radiální záběr [15].

3.3.3 Proces broušení

Jak již bylo zmíněno, je testováno 5 brousících kotoučů, přičemž každý je použit pro 5 různých nastavení stroje. Tato nastavení jsou označena jako A, B, C, D a E. Jelikož již byly zmíněny parametry, jejichž hodnoty jsou pro celý proces broušení stejné (viz kapitola 3.3.1), budou u jednotlivých nastavení popsány pouze hodnoty parametrů, které se v průběhu mění (viz kapitola 3.3.2). Hodnoty těchto parametrů jsou zapsány v tab. 3.1.

Kromě měnicích se parametrů je v tab. 3.1 uveden i celkový čas broušení t_{AS} [s] (od spuštění až po konec cyklu), který se mění v závislosti na radiálním záběru a době vyjiskření.

Tab 3.1 Hodnoty měnicích se parametrů v procesu broušení.

Nastavení	Obvodová rychlost obrobku v_w [m.min ⁻¹]	Radiální záběr a_e [mm]	Doba vyjiskření		Celkový čas broušení t_{AS} [s]
			t_{v1} [s]	t_{v2} [s]	
A	15,6	0,005	6	18	133
B	27,3	0,005	6	18	133
C	27,3	0,010	6	18	85
D	41,9	0,010	6	18	85
E	41,9	0,010	6	4	71

Při prvním nastavení jsou parametry nastaveny na standardní hodnotu takovou, jakou by bylo provedeno broušení v běžné situaci. Jedná se o nastavení, které je na brusce BDU 80 běžně používáno při broušení otvorů o přibližně stejných rozměrech a totožné jakosti polotovaru. Postupně s dalšími nastaveními se zvyšuje obvodová rychlost obrobku a velikost radiálního záběru. Při posledním nastavení je radikálně zkrácena doba vyjiskření, z důvodu zjištění významu tohoto parametru.

Po procesu broušení je výsledkem 25 hotových obrobků (5 obrobků pro každý broušící kotouč), u kterých jsou dále zkoumány parametry jakosti obrobeného povrchu, jak je to popsáno v kapitole 3.1.2.

3.3.4 Naměřené hodnoty parametrů jakosti povrchu

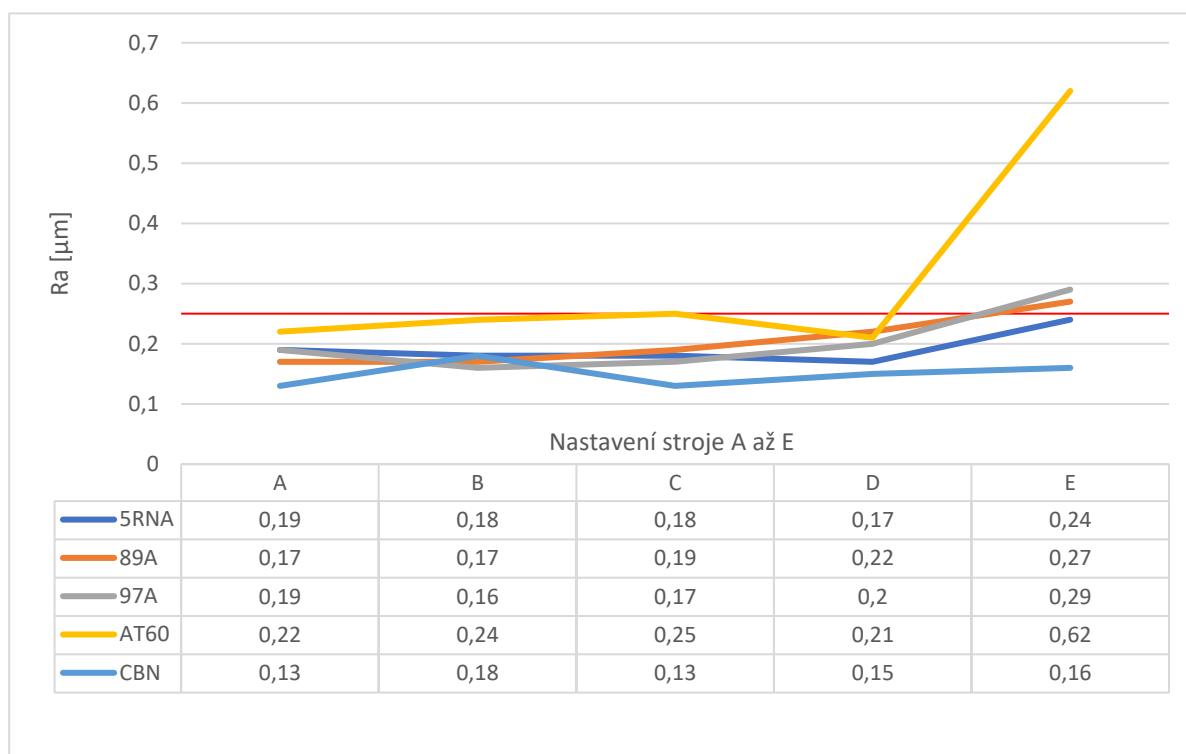
Jelikož se jedná o poměrně rozsáhlý soubor 200 hodnot (25 obrobků měřených na 8 různých parametřích jakosti povrchu), bude zobrazeno 8 grafických srovnání, vždy dle jednoho kontrolovaného parametru. Broušící kotouče, popsané v kapitole 3.2 jsou na následujících srovnáních označeny pouze prvními znaky, ze svého kompletního označení.

Všechny uvedené obrázky obsahují graf závislosti broušících kotoučů na jednotlivých parametrech tak, jak byly měněny mezi jednotlivými cykly broušení a také tabulku s naměřenými hodnotami, aby bylo možné je porovnat s vyšší přesností a přehledností. Na vertikální ose každého grafu je označení měřeného parametru a přizpůsobená stupnice, která ve většině případů obsahuje červenou linku, označující maximální povolenou hodnotu, dle výkresové dokumentace. Na horizontální ose jsou uvedena jednotlivá nastavení stroje.

3.3.4.1 Srovnání průměrné aritmetické úchylky profilu povrchu – Ra

Na obr. 3.11 jsou znázorněny hodnoty Ra, které by měly být nejvíce ovlivněny právě změnou doby vyjiskření. Dle výkresu je maximální povolená hodnota Ra = 0,25 μm a v grafu je tato hranice znázorněna červenou linkou.

První tři, jemně zrnité kotouče dosahují velmi dobrých výsledků (hodnoty 0,16 až 0,22) při broušení se standardní dobou vyjiskření a je velmi jasně patrné, že při razantním snížení doby vyjiskření se velmi zhoršuje i dosažená hodnota Ra (roste). Mezi těmito třemi kotouči zde není významný rozdíl. Naopak středně zrnitý kotouč AT60 dosahuje o něco horších hodnot a při nastavení E je dokonce Ra = 0,62. Nicméně při nastaveních A až D byla u všech kotoučů splněna maximální hodnota Ra = 0,25. CBN kotouč, i přes to, jak je tvrdý, je jemně zrnitý, což v kombinaci s výbornou schopností samoostření a udržení tvaru vysvětluje velmi dobré výsledné hodnoty Ra, a to i při nastavení E, tedy téměř bez vyjiskření.

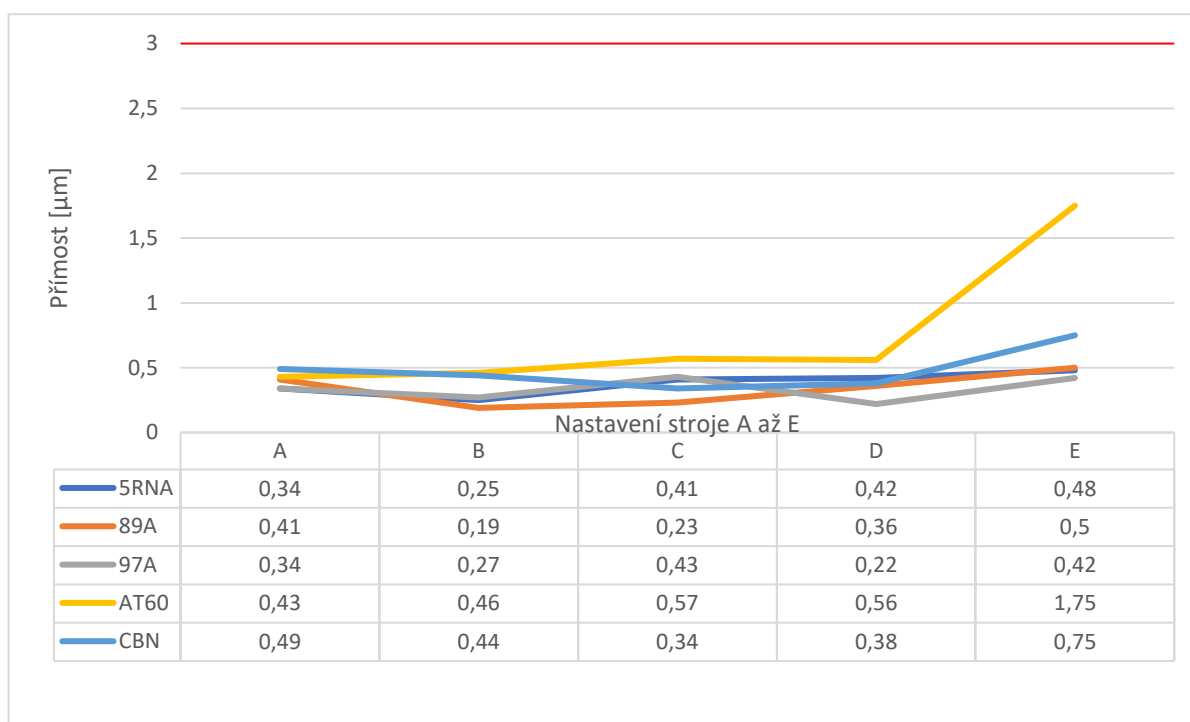


Obr. 3.11 Hodnoty parametru Ra od jednotlivých brousících kotoučů při nastaveních A až E.

3.3.4.2 Srovnání přímosti

Na obr. 3.12 jsou znázorněny hodnoty přímosti, na kterou má vliv zejména opotřebení kotouče, z hlediska jeho udržení tvaru. Dle výkresu je maximální povolená hodnota přímosti 3 μm a v grafu je tato hranice znázorněna červenou linkou.

Na úvod je třeba konstatovat, že míra 3 μm je v případě přímosti poměrně volnou mírou, a i přes poměrně necitlivé nastavení procesu broušení (obzvláště v nastavení E) byla tato míra dodržena všemi testovanými kotouči. Zároveň jsou ale patrné určité rozdíly mezi jednotlivými výsledky. U některých kotoučů je patrné zlepšení hodnoty přímosti po zvýšení obvodové rychlosti obrobku, nicméně jsou tyto rozdíly poměrně malé. Všechny jemně zrnité kotouče dosahují přibližně stejných hodnot přímosti, pouze středně zrnitý kotouč AT60 při nastavení E výrazně uniká svojí hodnotou (přestože je stále v toleranci), což je způsobeno kratší dobou kontaktu kotouče s obráběnou plochou (důvodem je vysoký radiální záběr) a zmíněnou vyšší zrnitostí, tedy větší velikostí zrn, která se projevila již při porovnání parametru Ra.

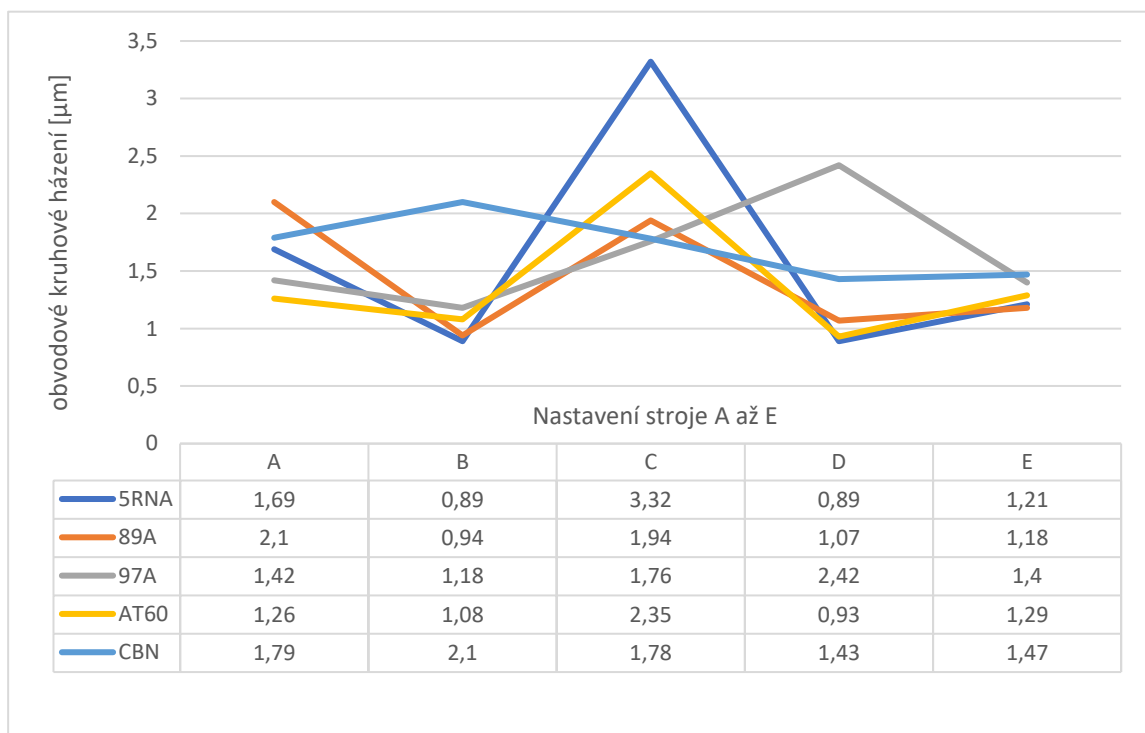


Obr. 3.12 Hodnoty parametru přímosti od jednotlivých brousicích kotoučů při nastaveních A až E.

3.3.4.3 Srovnání obvodového kruhového házení

Na obr. 3.13 jsou znázorněny hodnoty obvodového kruhového házení. Tento parametr vlastně vyjadřuje shodu mezi vnějším povrchem a broušeným otvorem (dáno základnou). Jelikož je obrobek broušen v lunetách (opěrkách), jak bylo popsáno v kap. 3.1.2, při broušení otvoru dochází v podstatě ke kopírování vnějšího povrchu a tento parametr by neměl být problém splnit. Dle výkresu je dána maximální hodnota obvodového kruhového házení 20 μm , což je natolik vzdáleno od dosažených hodnot, že z důvodu přehlednosti tato hranice nebyla do grafu vložena.

Z těchto hodnot je velmi patrné zlepšení výsledků po zvýšení obvodové rychlosti obrobku, a naopak výrazné zhoršení při zvětšení radiálního záběru, přičemž ono zhoršení při zvětšení radiálního záběru je snadno vysvětlitelné nárůstem síly, kterou kotouč působí na obrobek a případně i částečným rozkmitáním celé soustavy. Při hodnocení jednotlivých kotoučů je nutné podotknout, že u tohoto konkrétního parametru nejsou mezi kotouči výrazněji patrné rozdíly, jelikož všechny dosahují velmi vysoké přesnosti, pouze kotouč 5RNA dosahuje při nastavení C velmi vzdálené úchyvky 3,32 μm , což je pravděpodobně způsobeno jeho vyšší tvrdostí a pórovitostí, než mají kotouče 89A, 97A a AT60.

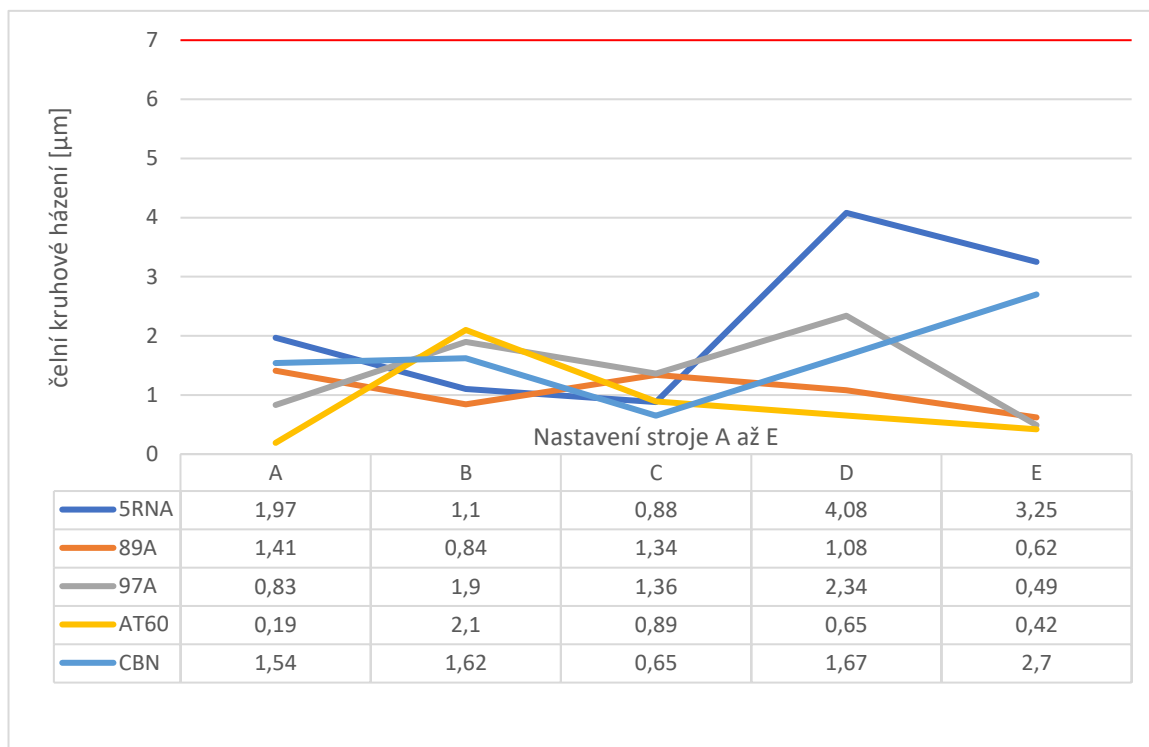


Obr. 3.13 Hodnoty obvodového kruhového házení od jednotlivých brousících kotoučů při nastaveních A až E.

3.3.4.4 Srovnání čelního kruhového házení

Na obr. 3.14 jsou znázorněny hodnoty čelního kruhového házení. Tento parametr, podobně jako obvodové kruhové házení, vyjadřuje shodu mezi základním čelem obrobku a broušeným otvorem. Jelikož je čelo nabroušeno a obrobek je upnut letmo na magnetu, je opět velmi nepravděpodobné, že by došlo k nesplnění požadované hodnoty tohoto parametru, která je výkresem stanovena na 7 μm a v grafu je znázorněna červenou linkou.

Je překvapivé, že u nastavení C tentokrát nedošlo ke zhoršení sledovaného parametru téměř u žádného z testovaných kotoučů (pouze mírně u kotouče 89A). Toto je nicméně možné vysvětlit velmi dobrou schopností kotoučů zachovat osu broušeného otvoru, a tedy kolmost této osy na čelo kroužku, jelikož tento parametr závisí především na této přesnosti. U kotoučů 89A, 97A a CBN lze pozorovat velice podobný průběh, jako v grafu obvodového kruhového házení obr. 3.14. U kotouče 5RNA došlo při nastavení C, tedy zvětšení radiálního záběru, k mírnému zlepšení dosahované přesnosti, ale po zvýšení otáček obrobku naopak k výraznému zhoršení. Toto náhlé zhoršení nelze vysvětlit jinak, než hůře broušeným (pouze o něco hůře, jelikož tolerance je stále splněna) čelem obrobku z předchozí operace.

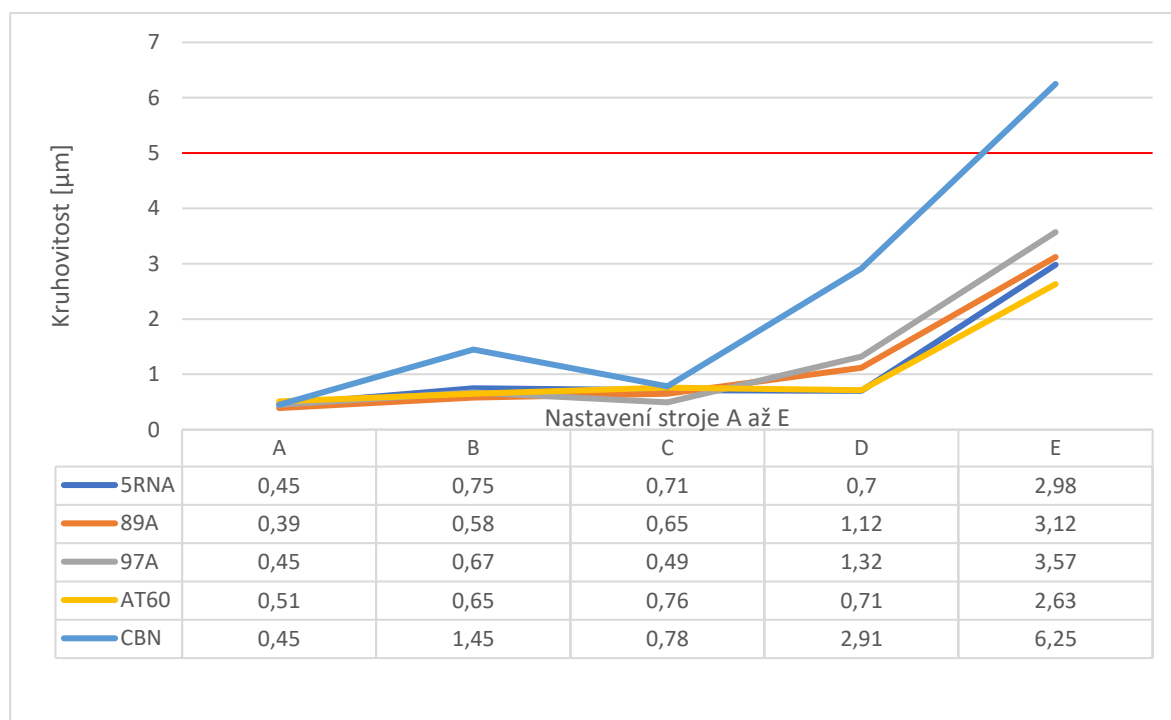


Obr. 3.14 Hodnoty čelního kruhového házení od jednotlivých brousících kotoučů při nastaveních A až E.

3.3.4.5 Srovnání kruhovitosti

Na obr. 3.15 jsou znázorněny hodnoty kruhovitosti, které jsou opět významně ovlivněny dobou vyjiskření. Maximální hodnota kruhovitosti je dle výkresu stanovena na 5 μm a v grafu je znázorněna červenou linkou.

Při nastaveních A až D dosahují všechny kotouče podobných výsledků (s výjimkou CBN, který se vzdaluje již při nastavení D), což je způsobeno stabilní, určitou dobou vyjiskření a opět způsobem upnutí obrobku. Tím, že je při broušení v opěrkách v podstatě kopírován vnější povrch, tak u parametru kruhovitosti, který není tak náchylný na drobné odchylky jako například: Ra nebo vlnitost, dochází ke kopírování broušeného vnějšího povrchu. Významné zhoršení hodnot tohoto parametru nastává až při nastavení E, při kterém chybí potřebná doba vyjiskření na korekci broušeného povrchu. Je překvapivé, že danou hodnotu kruhovitosti překročil při nastavení E pouze CBN kotouč a nebylo jich více. Je to způsobeno tím, že je tento kotouč nejtvrdějším a veškeré možné kmity soustavy způsobené narůstajícími silami při dalších nastaveních nejnázne přenáší do broušeného povrchu.

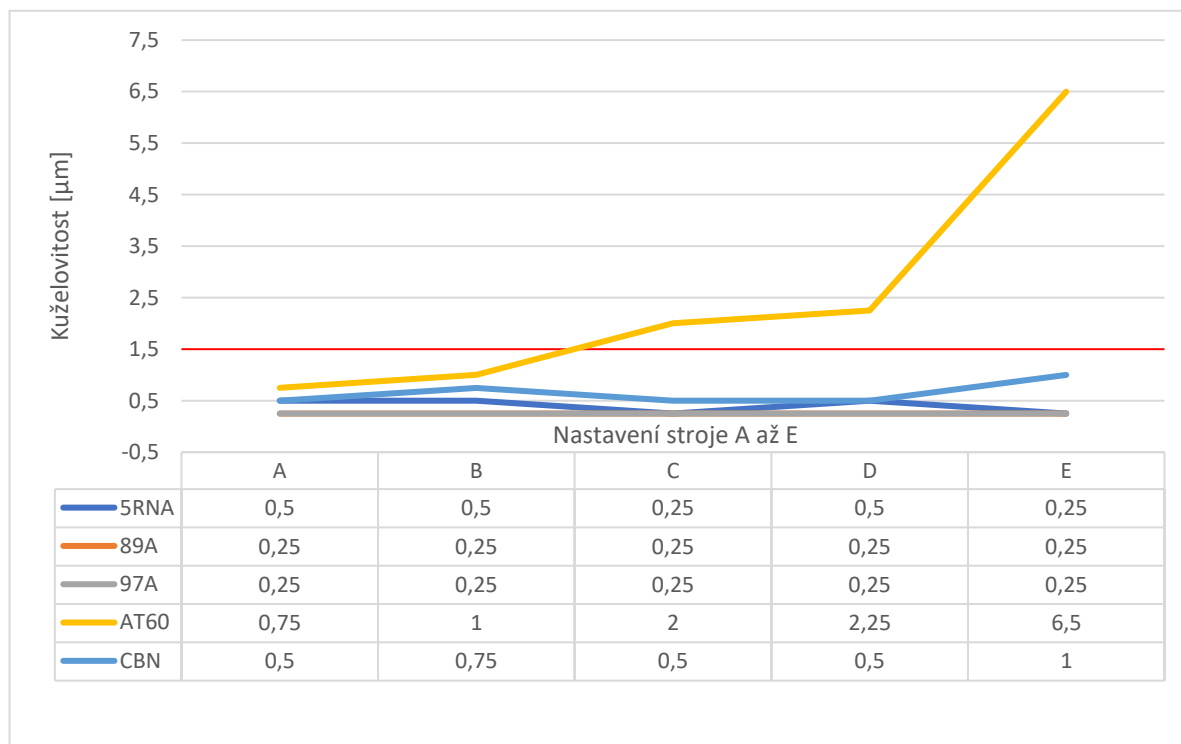


Obr. 3.15 Hodnoty kruhovitosti od jednotlivých brousících kotoučů při nastaveních A až E.

3.3.4.6 Srovnání kuželovitosti

Na obr. 3.16 jsou znázorněny hodnoty kuželovitosti. Tento parametr má výkresem danou maximální hodnotu 1,5 μm , která je v grafu znázorněna červenou linkou. Vysoká kuželovitost bývá způsobena nerovnoměrnou řeznou silou kotouče na broušený povrch, tedy vyšším opotřebením kotouče na jedné straně než na straně druhé.

Všechny jemně zrnité kotouče dosahují přibližně stejných hodnot, a ani při nastavení E u nich nedošlo k překročení předepsané tolerance. Pouze kotouč AT60, u kterého je doporučena mnohem vyšší řezná rychlost, je výrazně nestejně opotřebováván. Důvodem je střední zrnitost tohoto kotouče, a tedy vyšší náchylnost zrn k uvolnění, obzvláště při dané, poměrně nízké řezné rychlosti.

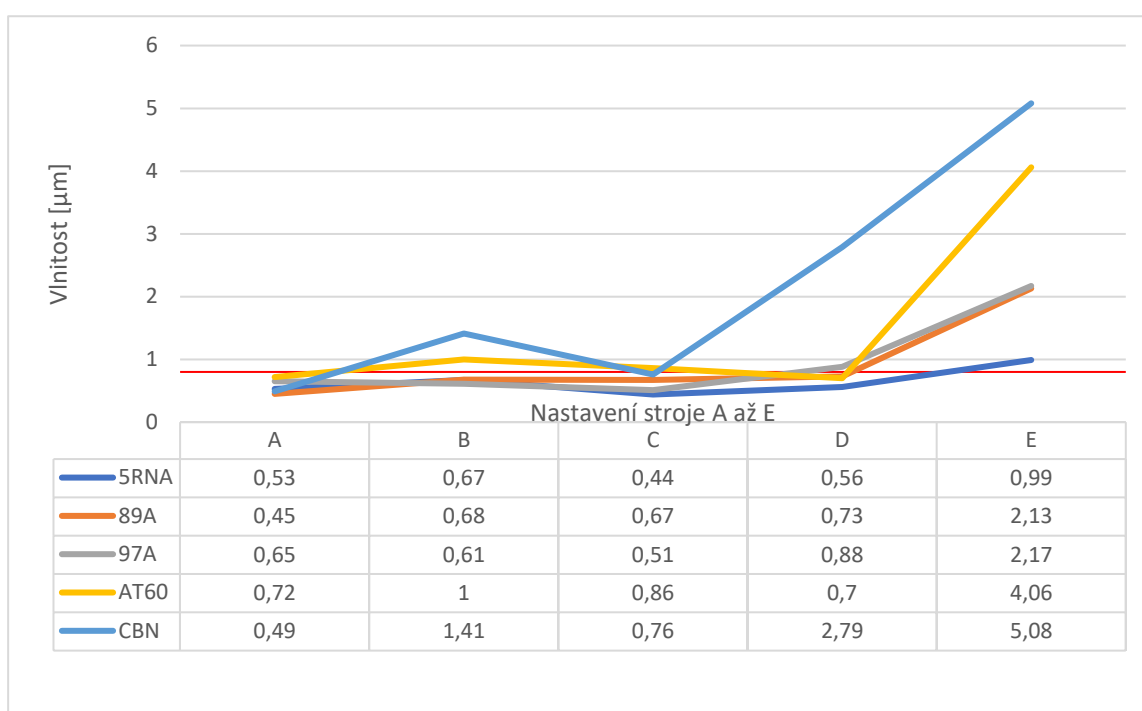


Obr. 3.16 Hodnoty kuželovitosti od jednotlivých brousících kotoučů při nastaveních A až E.

3.3.4.7 Srovnání vlnitosti

Na obr. 3.17 jsou znázorněny hodnoty vlnitosti. Tento parametr má výkresem danou, velmi nízkou hodnotu $0,8 \mu\text{m}$, která je v grafu znázorněna červenou linkou. Na parametr mají velmi výrazný vliv otáčky obrobku a doba vyjiskření. Zatímco vyšší doba vyjiskření má téměř vždy pozitivní vliv na tento parametr, nastavení otáček obrobku je spíše záležitostí vyzkoušení na reálných kusech.

Hodnota předepsaná výkresem je skutečně velmi utažená a z grafu je velmi jasně patrné, jak velký vliv má doba vyjiskření, jelikož při nastavení E nebyla tolerance splněna u žádného z kotoučů. Nejhorší výsledky lze při hodnocení tohoto parametru přičítat kotouči CBN, který je i přes jemné zrno nejtvrdší, a tedy nejvíce náchylný na otřesy soustavy dané jak řeznou silou, tak chvěním obrobku při zvyšující se rychlosti jeho rotace. Zvýšení vlnitosti mezi nastavením C a D je způsobeno zvýšením otáček pracovního vřetene a tím i vyšším rozkmitáním obrobku, což se nejvíce projeví u tvrdších kotoučů s jemným zrnem.

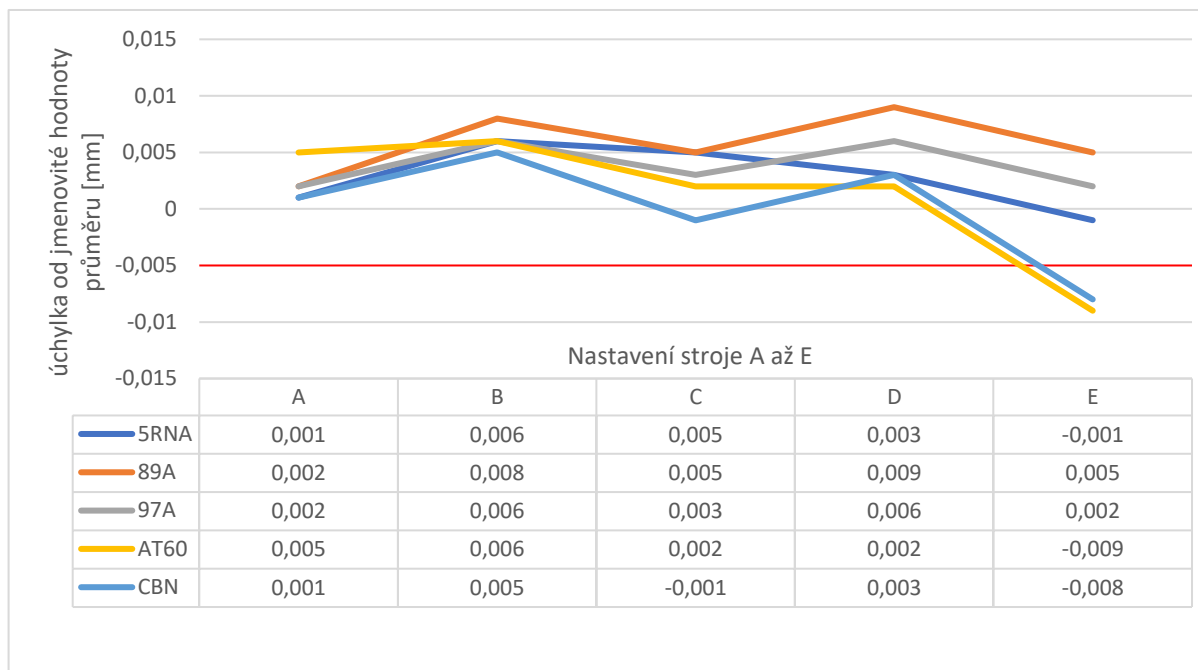


Obr. 3.17 Hodnoty vlnitosti od jednotlivých brousících kotoučů při nastaveních A až E.

3.3.4.8 Srovnání průměru otvoru

Na obr. 3.18 jsou znázorněny hodnoty úchylnosti od jmenovitého průměru broušeného otvoru 31,000 mm. Povolená tolerance je -0,005 mm až +0,015 mm, přičemž spodní tolerance je pro přehlednost znázorněna červenou linkou.

Jelikož je při procesu broušení vždy nutné dělat drobné korekce v nastavení finální pozice broušícího kotouče (provádí se korekcí pozice diamantu pro orovnění), neslouží tento parametr k posouzení stálosti tvaru kotouče a schopnosti udržet konstantní průměr broušeného povrchu. Na grafu lze ale pozorovat významný vliv doby vyjiskření na výsledný průměr broušeného otvoru.



Obr. 3.18 Hodnoty úchylnosti od jmenovité hodnoty průměru otvoru od jednotlivých broušících kotoučů při nastaveních A až E.

3.3.5 Rozbor naměřených hodnot

Mezi nejdůležitější měřené parametry je možné zahrnout: Ra, kruhovitosť, kuželovitosť a vlnitosť, které mají poměrně přísně nastavené maximální hodnoty a nejvíce vypovídají o rozdílnostech jednotlivých broušících kotoučů.

Kotouč CBN dosahoval ve většině měřeních velmi dobrých výsledků, i přes nevhodnost jeho použití. Obvykle se používá pro broušení výrazně tvrdších materiálů při vyšší řezné rychlosti. Jako nesmírnou výhodou tohoto kotouče je nutno uvést jeho velmi dobré samoostřící vlastnosti, potažmo velmi vysokou odolnost, která mu umožňuje obrábět mnohem déle, bez nutnosti orovnění/oživení. Naopak velkou nevýhodou tohoto kotouče je jeho přílišná tvrdost a náchylnost na kmity v soustavě, což vedlo ke špatným hodnotám vlnitosti. I přes jeho výhody je nutné konstatovat, že tento typ kotouče se pro výše popsanou operaci nehodí z důvodu obráběného materiálu, vlastností brusky (slabší dosažitelné řezné podmínky) a velmi vysoké ceně.

Kotouč AT60 (Columbia) dosahoval při porovnáních poměrně špatných výsledků. V mnoha případech je to z důvodu střední zrnitosti, která v kombinaci s mnohem nižší řeznou rychlostí, než je předepsána, způsobuje nepravidelné opotřebení, horší dosažené hodnoty Ra a vlnitosti. Tento kotouč je opět poměrně nákladný a při testovacím broušení nebyla použita

jeho předepsaná řezná rychlost. Nicméně je pravděpodobné, že z důvodu střední zrnitosti by ani při splnění vhodných podmínek pro broušení tento kotouč nedosahoval takových hodnot, jako zbývající kotouče. Toto by bylo výhodou, při větším úběru broušeného materiálu (vyšším technologickém přídávku). Je nutné konstatovat, že tento kotouč se pro výše popsanou operaci nehodí jednak z důvodu nedosažitelných vhodných řezných podmínek, ale hlavně z důvodu specifického složení kotouče a volby zrnitosti. Také z důvodu vysoké ceny.

Dále je nutné porovnat kotouče 89A (bílý korund) a 97A (speciální korund - monokrystal), které mají jinak totožně popsané vlastnosti. Jsou měkké, jemně zrnité a polohutné s keramickým pojivem a liší se pouze typem použitého korundu, který dodává kotoučům například rozdílnou maximální obvodovou rychlost, což naznačuje, že kotouč 97A by měl být vhodnější pro použití při vyšší řezné rychlosti (max. 60 m.s^{-1}). Při srovnání dosažených hodnot je zcela patrné, že mezi těmito dvěma druhy korundu není při nastavených podmínkách téměř žádný rozdíl, je pouze možné, že by se vyšší kvalita kotouče 97A projevila při výrazném zvýšení řezné rychlosti. Oba kotouče dosahovaly dobrých a vyrovnaných výsledků (splnění předepsaných parametrů ve většině nastaveních stroje) a jsou vhodné k použití při nastavených podmínkách.

Posledním testovaným kotoučem je 5RNA, který je specifický tím, že se jedná o směs světle růžového a hnědého korundu, dále je měkký až středně tvrdý a má středně otevřenou strukturu. Tyto vlastnosti mu dávají lepší schopnost zachovat tvar, nicméně horší schopnost samoostření a mírně vyšší náchylnost na kmity v soustavě. Dle dosažených výsledků je ale patrné, že tento kotouč je pro konkrétní použití vhodný. Dosahuje poměrně stabilních, dobrých výsledků u měřených parametrů jakosti povrchu a v porovnání s ostatními kotouči jsou jeho výsledky ve většině případů jedny z nejlepších. Svoji maximální řeznou rychlostí 40 m.s^{-1} se hodí pro použití na konkrétní, méně výkonné brusce.

Z těchto srovnání je nutné konstatovat, že vhodnými kotouči pro konkrétní operaci jsou 89A, 97A a 5RNA, přičemž jsou mezi nimi rozdíly, které by se patrně projevily při dlouhodobějším testování. Z uvedených srovnání je velmi jasně patrný vliv doby vyjiskření na výslednou jakost povrchu, a tedy velký význam této části broušícího cyklu. Nicméně lze také vidět, že při nastavení C, kdy je zvýšen radiální záběr, je poměrně radikálně snížen strojní čas a parametry jakosti povrchu jsou u všech tří těchto kotoučů stále v toleranci.

3.3.6 Testování s odlišnou řeznou rychlostí

Pouze jako rozšíření testování bylo přistoupeno k vytvoření dodatečného nastavení stroje A', které vychází z nastavení A (dle tab. 3.1), avšak je v tomto nastavení odlišná řezná rychlost (obvodová rychlost kotouče). Nově nastavená rychlost je $v_c = 25 \text{ m.s}^{-1}$ oproti původně nastavenému $v_c = 28,07 \text{ m.s}^{-1}$ použitým pro předchozí testování. Tento krok nebyl původně zamýšlen z důvodu předpokladu horších dosažených parametrů jakosti povrchu a také zdánlivé nesmyslnosti nastavení nižší řezné rychlosti u brusky, jejíž maximální výkon je poměrně malý. Literaturou je obecně udávána doporučená řezná rychlost pro vnitřní obvodové broušení na $v_c = 25\text{--}35 \text{ m.s}^{-1}$, čímž je vysvětlena nastavená řezná rychlost na $v_c = 25 \text{ m.s}^{-1}$. Podrobně jsou nastavení A' a A popsána v následující tab. 3.2 [15].

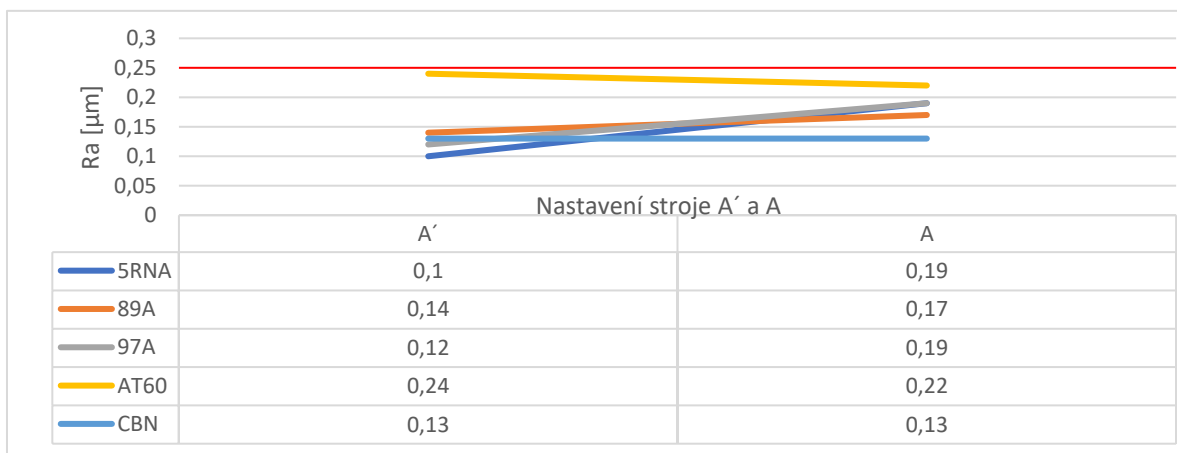
Tab 3.2 Hodnoty měnicích se parametrů v procesu broušení.

Nastavení	Obvodová rychlost broušícího kotouče v_c [m.s^{-1}]	Obvodová rychlost obrobku v_w [m.min^{-1}]	Radiální záběr a_e [mm]	Doba vyjiskření		Celkový čas broušení t_{As} [s]
				t_{v1} [s]	t_{v2} [s]	
A'	25	15,6	0,005	6	18	133
A	28,07	15,6	0,005	6	18	133

Jak je vidět z tab. 3.2 jsou všechna nastavení, s výjimkou řezné rychlosti, stejná a provedená měření mají za cíl porovnat závislost jednotlivých měřených parametrů jakosti povrchu na velikosti řezné rychlosti. Jelikož mají všechny použité brousící kotouče doporučenou řeznou rychlost vyšší než $v_c = 28,07 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, je předpokladem výsledná horší jakost povrchu při nastavení A' než při nastavení A.

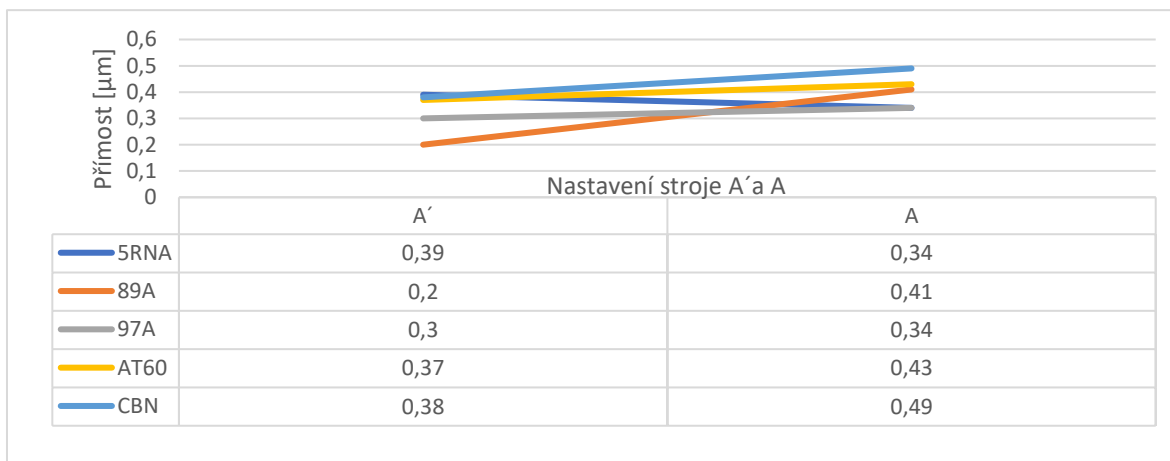
Dále jsou uvedeny grafy (obr. 3.19, obr. 3.20, obr. 3.21, obr. 3.22, obr. 3.23, obr. 3.24 a obr. 3.25), které porovnávají dosažené výsledky jakosti povrchu. Tyto výsledky jsou uvedeny podobně jako u předchozího srovnání, nicméně jsou srovnány pouze naměřené hodnoty z nastavení A' a A (dle tab. 3.2).

Na obr. 3.19 jsou znázorněny naměřené hodnoty Ra pro nastavení stroje A' a A. Jak bylo předpokládáno, u kotoučů CBN a AT60 je hodnota Ra vyšší nebo stejná při nastavení A', což je způsobeno nevhodností těchto kotoučů pro broušení při takto nízkých řezných rychlostech a také jejich specifickými vlastnostmi. Naproti tomu ostatní kotouče dosáhly nižší hodnoty Ra, což je překvapivé a pravděpodobně způsobeno nižší mírou opotřebování kotouče při nižší řezné rychlosti v poslední fázi cyklu – vyjiskření (následuje po orovnání kotouče).



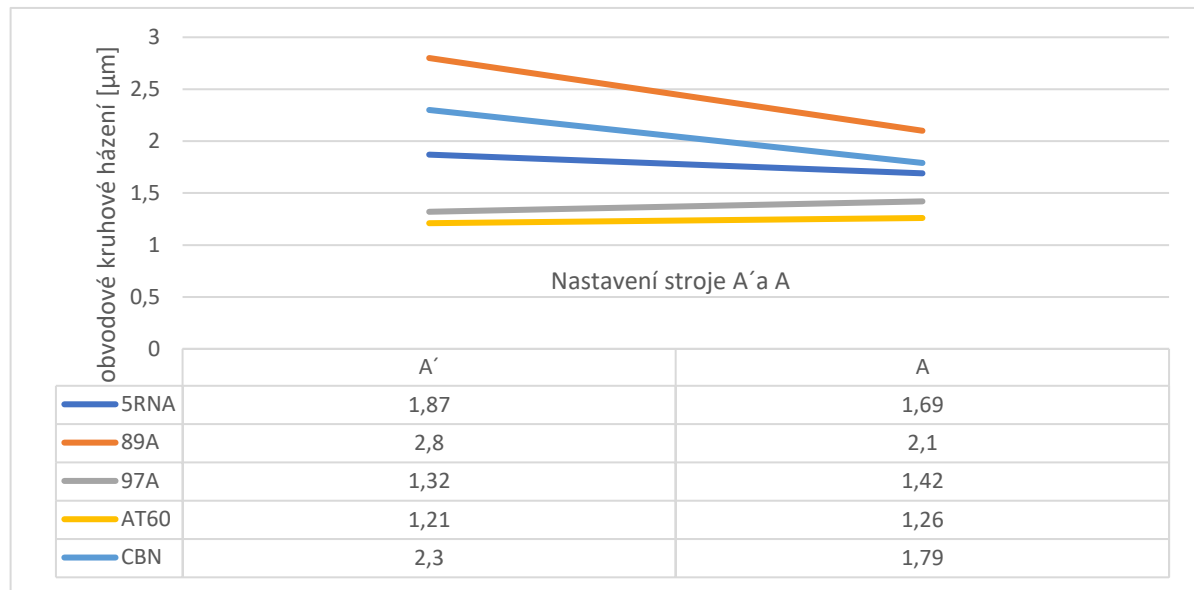
Obr. 3.19 Hodnoty parametru Ra od jednotlivých brousících kotoučů při nastaveních A' a A.

U parametru přímosti, jehož srovnání je na obr. 3.20, jsou dosažené hodnoty měřených parametrů velmi podobné. Je překvapivé, že některé hodnoty jsou při nastavení A' nižší, nicméně se jedná jen o velmi malý rozdíl. Na grafu není znázorněna maximální úchylnka přímosti $3 \mu\text{m}$, jelikož je příliš vzdálena naměřeným hodnotám.



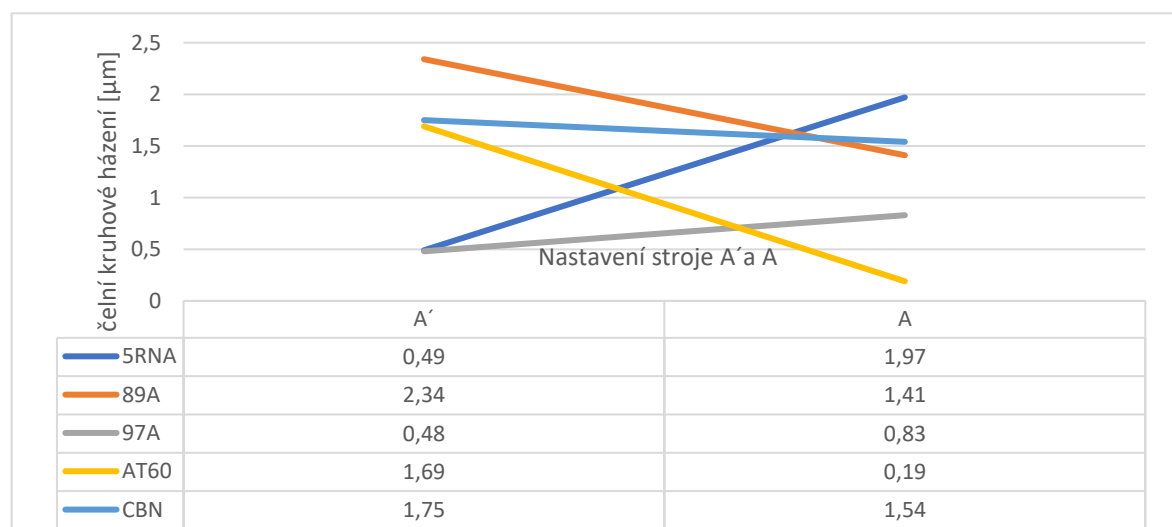
Obr. 3.20 Hodnoty parametru přímosti od jednotlivých brousících kotoučů při nastaveních A' a A.

Dosažené hodnoty obvodového kruhového házení, znázorněné na obr. 3.21, jsou opět dle předpokladu, že zvolená nižší řezná rychlost má spíše negativní vliv. Naměřené hodnoty jsou vesměs horší než při nastavení A. Limitní hodnota 20 μm opět není uvedena, jelikož je příliš vzdálena naměřeným hodnotám.



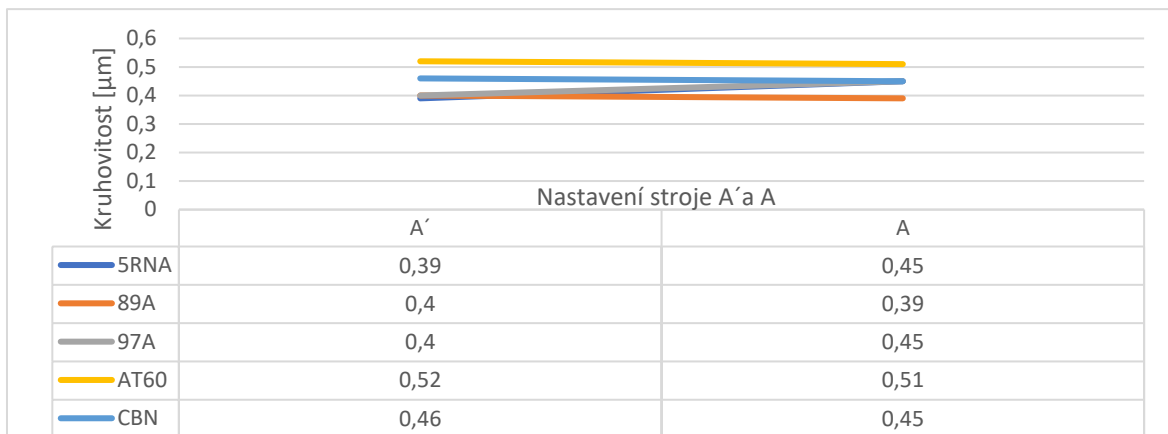
Obr. 3.21 Hodnoty obvodového kruhového házení od jednotlivých brousících kotoučů při nastaveních A' a A.

U čelního kruhového házení, jehož hodnoty jsou znázorněny na obr. 3.22, je výsledek na první pohled poněkud matoucí. U kotoučů CBN, AT60 a 89A došlo k předpokládanému výsledku, nicméně zejména u kotouče 5RNA je naměřená hodnota u nastavení A' znatelně lepší než při nastavení A. Jelikož naneštěstí není možné tento experiment opakovat a znovu provést měření, není zcela jisté možné odlišit pozitivní reakci kotouče 5RNA na nižší řeznou rychlost a chybu měření. Nicméně jak lze vidět na ostatních srovnáních, kotouč 5RNA skutečně dosahuje lepších výsledků i u jiných měřených parametřů při nastavené nižší řezné rychlosti. Limitní hodnota 7 μm opět není uvedena.



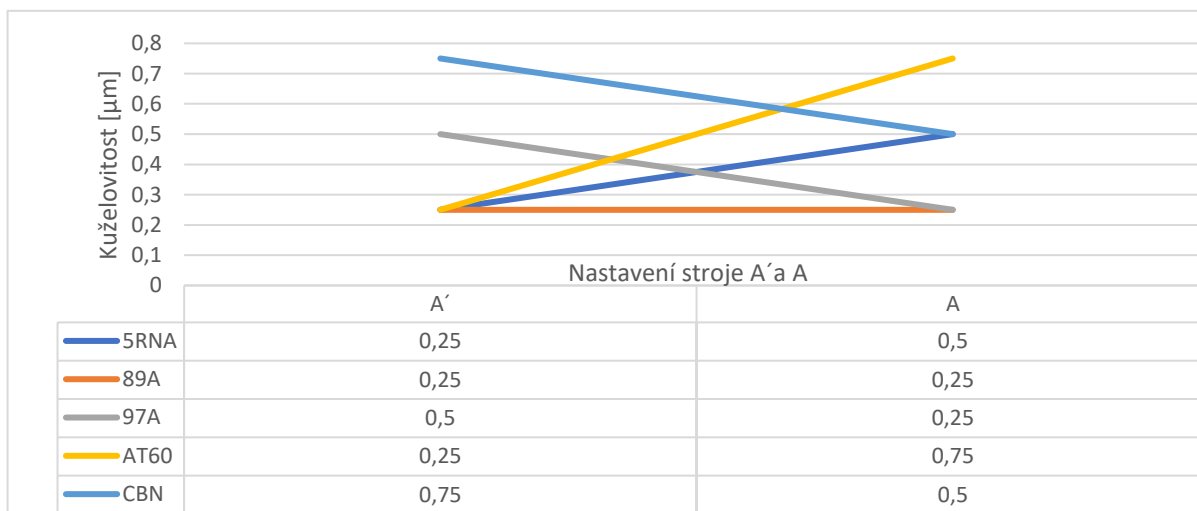
Obr. 3.22 Hodnoty čelního kruhového házení od jednotlivých brousících kotoučů při nastaveních A' a A.

Z obr. 3.23, který srovnává naměřené hodnoty kruhovitosti je patrné, že rozdíly v nastaveních jsou jen velmi malé a nastavená nižší řezná rychlost nemá na hodnotu kruhovitosti výrazný vliv. Limitní hodnota 5 μm opět není uvedena.



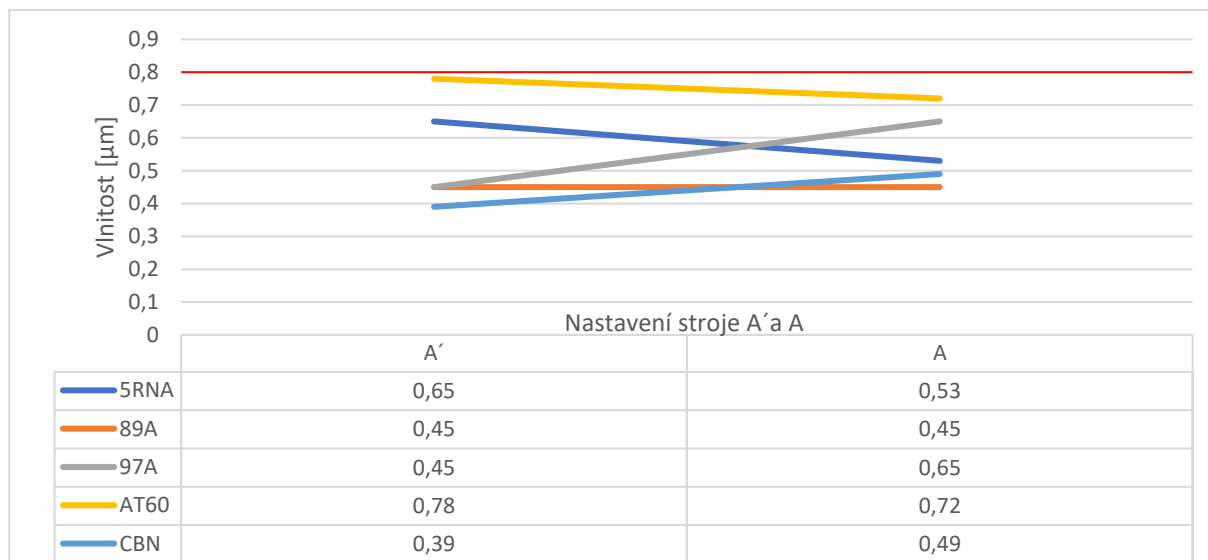
Obr. 3.23 Hodnoty kruhovitosti od jednotlivých brousicích kotoučů při nastaveních A' a A.

Hodnoty na obr. 3.24 srovnávající kuželovitost opět ukazují, že kotouč 5RNA dokáže velmi dobře pracovat i při nižších nastavených řezných rychlostech. Je nutné zmínit i kotouč AT60, jehož střední zrnitost je nevýhodou při rostoucí řezné rychlosti a jak bylo vidět dříve (obr. 3.16) i při rostoucí obvodové rychlosti obrobku. Tento kotouč má ovšem doporučenou rychlost kolem $v_c = 60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, tudíž při výraznějším zvýšení řezné rychlosti by dosažené hodnoty měřených parametrů byly pravděpodobně výrazně lepší. Limitní hodnota 1,5 μm opět není znázorněna.



Obr. 3.24 Hodnoty kuželovitosti od jednotlivých brousicích kotoučů při nastaveních A' a A.

Na posledním grafu (obr. 3.25) jsou znázorněny naměřené hodnoty vlnitosti. Již dříve bylo popsáno, že na vlnitost mají nejvýraznější vliv otřesy soustavy. Z grafu je patrné, že naměřené hodnoty se pro jednotlivé kotouče velmi různí a není možné říci, že nižší řezná rychlost měla za následek nižší chvění a lepší hodnoty parametru vlnitosti, alespoň ne u měkčích kotoučů, zlepšení je vidět u kotouče CBN, který je velmi tvrdý, a i malá změna může tento parametr zlepšit, nicméně zlepšení u kotouče 97A je vysvětlitelné hůře. Je potřeba znovu zmínit domněnku z kapitoly 3.3.4.7, ve které je zmíněno, že zlepšení nebo zhoršení tohoto parametru je ovlivněno mnoha podněty a nelze s jistotou říct, pro konkrétní brousící kotouče, bude mít změna řezných podmínek jaký vliv.



Obr. 3.25 Hodnoty vlnitosti od jednotlivých brousících kotoučů při nastaveních A' a A.

Poslední parametr, průměr otvoru, není uveden z důvodu malé vypovídací hodnoty. Při nastaveních A' a A není rozdílná doba vyjiskření a dosažený průměr broušené díry závisí především na nastavení hodnoty orovnění kotouče, a právě době vyjiskření.

Kotouč CBN dosahoval při nižší nastavené obvodové rychlosti brousícího kotouče zpravidla horších výsledků, což bylo předpokládáno. Tento kotouč je určen pro broušení při mnohem vyšších řezných rychlostech a také pro broušení tvrdších materiálů, nicméně je možné pozorovat zlepšení u parametru Ra a vlnitosti. Toto zlepšení je možné vysvětlit velmi vysokou tvrdostí tohoto kotouče a snížením otáček brusného vřeteníku se pravděpodobně snížilo kmitání stroje a bylo možné dosáhnout těchto výsledků, patrných právě u vlnitosti a Ra.

Kotouč AT60 dosahoval při nižší nastavené obvodové rychlosti brousícího kotouče také zpravidla horších nebo podobných výsledků. Výrazné zlepšení nastalo pouze u měřených hodnot kuželovitosti, což doplňuje trend, který je možné vyčíst z hodnot kuželovitosti od kotouče AT60 v grafu na obr. 3.16, které s rostoucími otáčkami pracovního vřeteníku také rostou. Při snížení řezné rychlosti není pravděpodobně kotouč tolik nestejně opotřebováván a výsledná kuželovitost je tedy lepší. Naopak zlepšení hodnot při zvyšující se řezné rychlosti by se patrně dostavilo až s výraznějším zvýšením této řezné rychlosti.

Kotouč 97A dosahuje na rozdíl od ostatních u většiny parametrů lepších výsledků, než s vyšší řeznou rychlostí, i přes to, že maximální řezná rychlost tohoto kotouče je až 60 m.s⁻¹. Parametr Ra je lepší u všech tří měkčích, jemně zrnitých kotoučů (5RNA, 89A, 97A) a je velmi obtížné tento jev teoreticky vysvětlit. Naproti tomu, hodnota kuželovitosti je 2x vyšší, než při vyšší řezné rychlosti a je tedy patrné, že při nižší řezné rychlosti tento kotouč mnohem hůře drží tvar. Při samotné operaci broušení za snížené řezné rychlosti

byl při použití tohoto kotouče slyšet velmi nepříjemný zvuk, charakterizující nevhodné řezné podmínky.

Dalším kotoučem je 89A, jehož výsledky mnohem lépe odpovídají předpokladům, než u předchozích kotoučů, jelikož jsou ve většině případů s nižší řeznou rychlostí horší nebo přinejmenším stejné. Mírně lepší výsledek je u parametru Ra, který je vysvětlen u obr. 3.19 a dále u přímosti, kde dosáhli lepších hodnot téměř všechny porovnávané kotouče. Při samotné operaci broušení za snížené řezné rychlosti byl při použití tohoto kotouče slyšet velmi nepříjemný zvuk, charakterizující nevhodné řezné podmínky.

Posledním porovnávaným kotoučem je 5RNA, který u parametru Ra dosáhl patrně nejvýraznějšího zlepšení. Nižší hodnota byl naměřena i u kuželovitosti, tedy parametru popisujícím schopnost kotouče udržet tvar bez nerovnoměrného opotřebení. Nicméně horší hodnota je vidět u parametru vlnitosti, který je ovšem, jak již bylo zmíněno, ovlivněn velkým množstvím podnětů a bylo by velmi obtížné pokusit se teoreticky vysvětlit změnu tohoto parametru u každého z kotoučů.

4 TECHNICKO – EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

V této kapitole budou shrnuty závěry z provedeného testování brousicích kotoučů a také bude porovnána jejich ekonomická výhodnost. Dále budou předloženy závěry ohledně nejvhodnější volby nastavení obráběcího stroje.

4.1 Závěry testování

Podrobný rozbor výsledků stěžejního srovnání je uveden v kap. 3.3.5 a je konstatováno, že kotouče AT60 a CBN nejsou pro broušení na dané brusce vhodné. Kotouč AT60 je koncipován na výrazně vyšší řeznou rychlost, a také jeho složení (střední zrnitost) není nejvhodnější na velmi přesné broušení. Kotouč CBN, i přes poměrně dobré výsledky (v některých případech vůbec nejlepší výsledky ze všech testovaných kotoučů) je koncipován na obrábění spíše tvrdších materiálů při vyšších řezných rychlostech a jeho vysoká tvrdost byla nevýhodou při porovnávání parametru vlnitosti.

Další tři testované kotouče 97A, 89A a 5RNA dopadly vesměs dobře a poměrně vyrovnaně. Nebyly mezi nimi zpozorovány výraznější rozdíly a pro broušení daných kroužků na konkrétní brusce je možné je všechny doporučit. Menší rozdíly se projevily při broušení se sníženou řeznou rychlostí na $v_c = 25 \text{ m.s}^{-1}$, kde se při použití kotoučů 97A a 89A vyskytl nepříjemný zvuk v průběhu broušení, charakterizující nevhodné řezné podmínky. Z tohoto důvodu je pro broušení menších otvorů, a tedy použití ještě menších brousicích kotoučů vhodnější volit kotouč 5RNA, který snese i menší řeznou rychlost. Kotouče 97A a 89A jsou naopak vhodné (kotouč 5RNA taktéž) při zajištění řezné rychlosti alespoň okolo $v_c = 28 \text{ m.s}^{-1}$.

4.2 Zhodnocení

Mimo volbu kotoučů je velmi důležitým poznatkem dodržení předepsaných parametrů (dáno výkresy) broušené oběžné dráhy obrobku při nastavení stroje C, tedy při zvýšeném radiálním záběru. Strojní čas klesl při tomto nastavení přibližně o 35 %, což je velmi znatelné snížení a poukazuje na neekonomicky provozované nastavení A, které je používáno běžně (případně s drobnými korekcemi).

Jelikož je opotřebení kotoučů synchronizováno stejně velkou hodnotou orovnění kotouče diamantem, je možné jednoduše porovnat nákladnost kotoučů dle pořizovací ceny a minimálního odběrného množství. Tyto údaje jsou uvedeny v tab. 4.1.

Tab. 4.1 Cena kotoučů.

Označení brousicího kotouče	Jednotková cena N_k [Kč/ks]	Minimální odběr [ks]
5RNA	41,61	50
89A	41,61	25
97A	43,82	25
AT60	65,17	25
CBN	1.065,-	1

Minimální odběr 50 ks u kotouče 5RNA je dán tím, že tyto kotouče jsou vyráběny na zakázku a nejsou běžně drženou skladovou zásobou výrobce. Tím je specifický právě tento typ brousicího kotouče a je výhodou, že lze požadovat konkrétní rozměr za cenu kotoučů s katalogovými rozměry. Nevýhodou je samozřejmě vyšší minimální množství.

Kotouče 97A a 89A se neliší minimálním odebíraným množstvím, ani dostupností různých rozměrů dle katalogu a s přihlédnutím k testování je nutné konstatovat, že se významně neliší

ani výsledky broušení a je tedy možné je srovnat dle prodejní ceny, která je mírně nižší u kotouče 89A.

Při žádném z testování nedošlo k takovému opotřebení kotouče (postupnému orovnění), aby se výrazněji změnila řezná rychlost a nebyl tedy důvod toto opotřebení v průběhu broušení nějak korigovat. Nicméně při dlouhodobějším používání by k takovému opotřebení a snížení řezné rychlosti nevyhnutelně došlo. Jak bylo zmíněno v kap. 3.3.1, všechny kotouče byly zpočátku orovnány na míru 19,8 mm. Součástí broušícího cyklu je i orovnění o 0,02 mm, tedy po broušení každého ložiskového kroužku je broušící kotouč na průměru menší o 0,02 mm.

Jelikož bylo provedeno druhé testování s řeznou rychlostí $v_c = 25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, je možné spočítat dle vztahu (3.2), jaký průměr broušícího kotouče odpovídá této rychlosti při ponechaných otáčkách brusného vřeteníku $n_s = 27\,075 \text{ min}^{-1}$. Vypočtený průměr broušícího kotouče je 17,64 mm a pro účely výpočtu bude tento rozměr použit jako míra, kdy je broušící kotouč vyměněn za nový. Při využití této hodnoty je patrné, že na broušícím kotouči je v průběhu broušení provedeno 108 orovnění a při zaokrouhlení z důvodu občasně potřeby na vícenásobné orovnění je tedy možné jedním kotoučem obrobit přibližně 100 ks daných ložiskových kroužků. Toto množství se dá označit jako limitní pro broušící kotouče 97A a 89A, jelikož již při řezné rychlosti dané tímto průměrem je při broušení slyšet nepříjemný zvuk signalizující špatné řezné podmínky. Broušící kotouč 5RNA je možné použít při daném nastavení i dále, nicméně nebylo testováno, na jakou minimální míru je možné jej orovnat tak, aby byly zachovány dostačující výsledky broušení.

Při využití kotouče 5RNA pouze na 100 ks ložiskových kroužků, by CBN kotouč musel dokázat obrobit 2.500 těchto obrobků, přičemž zbytek z kotouče 5RNA by bylo možné využít pro broušení menších otvorů za použití jiné lunety (jiného převodového poměru). Tato výkonnost je možná a pokud by CBN kotouč dosahoval lepších hodnot při měření parametru vlnitosti, bylo by možné zvažovat jeho ekonomickou výhodnost.

Při úvaze z odstavců výše, že 100 ks obrobených kroužků je limitní množství pro kotouče 97A a 89A bude toto množství pro následující výpočet použito jako limitní i pro kotouče 5RNA a AT60. Pouze pro porovnání bude uvažováno, že kotouč CBN je schopný obrobit 2.500 kroužků, než bude potřeba jej vyměnit.

Z grafů porovnávajících dosažené parametry broušení při nastaveních A až E lze vybrat nejefektivnější možná nastavení pro jednotlivé kotouče. V následující tabulce (tab. 4.2) jsou uvedeny nejnižší dosažitelné časy broušení jednoho obrobku od jednotlivých kotoučů t_{AS} , potřebný počet kotoučů a celkový čas t_{ASC} (v minutách z důvodu následného výpočtu nákladů) pro obrobení $m = 2.500$ obrobků, který je vypočítán dle vzorce (4.1) (bez času nastavení stroje a výměny obrobku), přičemž je předpokládáno, že výměna a první orovnění kotouče zabere $t_v = 20 \text{ s}$. Pro výpočet celkových nákladů N jsou použity ceny jednotlivých kotoučů z tab. 4.1, jejich potřebné množství a celkový čas broušení na danou sérii a rovnice (4.2), která dále počítá s teoretickou cenou za 1 minutu strojního času $N_m = 20,- \text{ Kč}$. Tato výsledná cena je pro každý kotouč zanesena do tab. 4.2 a následně zobrazena v grafu na obr. 4.1.

Při tomto srovnání je nutno poznamenat, že se jedná jen o teoretické hodnoty a reálné náklady jsou pravděpodobně odlišné, zejména u kotoučů 5RNA a CBN. Kotouč 5RNA je pravděpodobně možné použít na broušení více než 100 obrobků, a kotouč CBN, přestože by zřejmě dokázal obrobit sérii 2.500 obrobků, potřeboval by pravděpodobně více strojního času. Jednak z potřeby občasně oživení kotouče, tak z důvodu vysoké hodnoty vlnitosti při využitím nastavení C (čas bez orovnění $t_{AS} = 77 \text{ s}$), která nemusí být s celou sérií udržitelná.

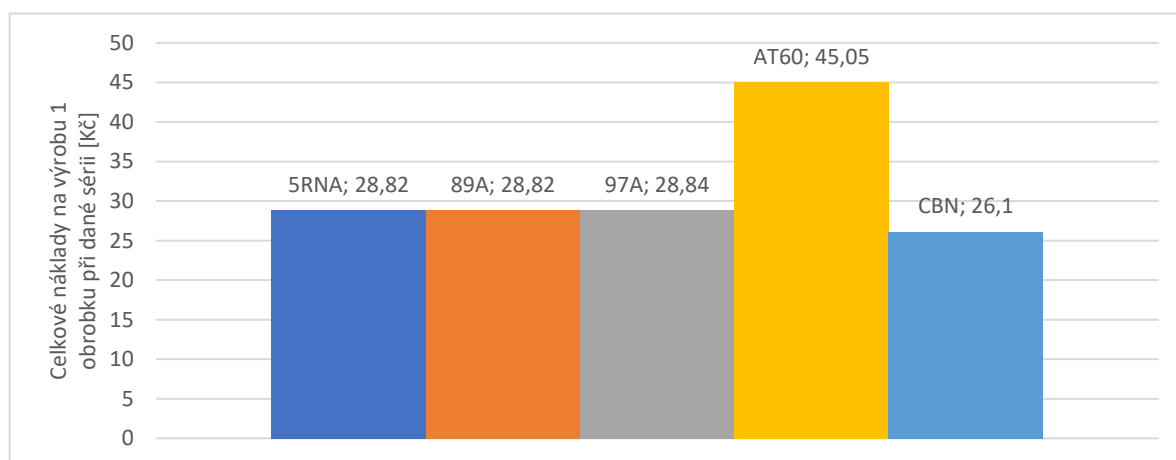
$$t_{ASC} = \frac{t_{AS} \cdot m + n \cdot t_v}{60} \text{ [min]} \quad (4.1)$$

$$N = \frac{N_m \cdot t_{ASC} + N_k \cdot n}{m} \text{ [Kč]} \quad (4.2)$$

- Kde:
- t_{ASC} [min] - celkový čas pro obrobení m obrobků,
 - t_{AS} [s] - celkový čas broušení na 1 obrobek,
 - n [ks] - potřebný počet kotoučů pro obrobení m obrobků,
 - m [ks] - série obrobků ($m = 2.500$ ks),
 - t_v [s] - čas na výměnu a první orovnění kotouče ($t_v = 20$ s),
 - N_m [Kč] - cena za 1 minutu strojního času ($N_m = 20,-$ Kč),
 - N_k [Kč] - cena za 1 kus kotouče.
 - N [Kč] - celkové náklady na výrobu 1 obrobku při dané sérii.

Tab. 4.2 Výkonnost kotoučů.

Označení broušícího kotouče	Minimální čas broušení na obrobek t_{AS} [s]	Počet kotoučů na obrobení 2.500 obrobků n [ks]	Celkový čas broušení na sérii obrobků t_{ASC} [min]	Náklady na výrobu 1 obrobku N [Kč]
5RNA	85	25	3.550	28,82
89A	85	25	3.550	28,82
97A	85	25	3.550	28,84
AT60	133	25	5.550	45,05
CBN	77	1	3.209	26,1



Obr. 4.1 Celková cena na broušení 1 obrobku (při daných podmínkách).

Na základě zhodnocení výhod a dosažených výkonů jednotlivých broušících kotoučů je autorem doporučeno používat převážně kotouče 5RNA, které jsou v porovnání s ostatními vysoce univerzální. Pro broušení otvorů menších než při testování, případně při broušení nižší řeznou rychlostí než $v_c = 25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, je doporučeno používat výlučně kotouče 5RNA. Naopak pro větší otvory a při dosažení řezné rychlosti alespoň $v_c = 28 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, je možné kotouče volně zaměňovat (5RNA a 89A), přičemž pro vyšší výrobní dávky a často opakovanou výrobu je vhodné udržovat skladovou zásobu na míru zhotovených kotoučů 5RNA a naopak v případě potřeby menšího množství kotoučů nebo spěšné výroby bez potřebného kotouče skladem objednat katalogový rozměr kotouče 89A. Velmi zajímavým řešením může být použití kotouče CBN, jehož ekonomická výhodnost je ovšem pouze vysoce teoretická a bez dodatečného testování jej nelze doporučit.

5 DISKUSE

5.1 Hodnocení z hlediska autora

Při řezné rychlosti okolo $v_c = 28 \text{ m.s}^{-1}$ se všechny testované kotouče při daných nastaveních stroje A – E chovali poměrně předpověditelně a jako nejvhodnější vyšly na základě testování 3 měkčí, jemně zrnité kotouče 5RNA, 89A a 97A. Dále testovaný kotouč AT60 nesplňoval řadu předepsaných parametrů zejména z důvodu střední zrnitosti a naprosto nedostatečného výkonu brusky. Poslední testovaný kotouč CBN dosahoval velmi dobrých výsledků (ovšem kromě parametru vlnitosti, kde se negativně projevila jeho přílišná tvrdost) a v případě opětovného testování tohoto kotouče by bylo vhodné jej podrobit časově náročnějším testům, aby bylo možné prokázat jeho ekonomickou výhodnost (míru opotřebení v závislosti na pořizovací ceně) oproti ostatním kotoučům.

Další část testování byla zaměřena na broušení obrobku při snížené řezné rychlosti na $v_c = 25 \text{ m.s}^{-1}$ (dodatečné nastavení A'), což mělo významný vliv zejména na broušící kotouče 89A a 97A, které při broušení vydávaly nepříjemný zvuk naznačující nevhodné řezné podmínky. Při této části testování bylo mnohokrát zmíněno, že naměřené hodnoty parametrů přesnosti neodpovídají předpokladům a mnohdy jsou dosaženy lepší hodnoty než při broušení s vyšší řeznou rychlostí. U kotouče 5RNA je tento jev vysvětlen vysokou univerzálností, a tedy možným zlepšením výsledků při použití nižší řezné rychlosti, nicméně u dalších kotoučů jsou uvedeny domněnky související se specifickým složením jednotlivých kotoučů ba i s možnou chybou měření nebo vadným obráběným kusem. Nicméně takové výsledky byly pouze ojedinělé.

Výsledky měření a jejich porovnání mezi jednotlivými testovanými kotouči byly získány celkem ze šesti specifických nastavení brusky, které dle předpokladu zachycují průřez možných řezných podmínek, které tato bruska umožňuje nastavit. Tyto porovnávané řezné podmínky platí pouze pro danou velikost testovaných broušících kotoučů a při použití zejména větších, jsou řezné podmínky při totožném nastavení stroje zcela jiné. Při daných podmínkách bylo dosaženo vypovídajících a názorných výsledků popisujících kvality a nedostatky jednotlivých testovaných broušících kotoučů a bylo možné specifikovat výhodnost použití kotouče 5RNA a kotouče 89A, které jsou z výčtu testovaných pro podobné aplikace nejvhodnější.

5.2 Hodnocení z hlediska firmy SLB, spol. s r.o.

Téma této práce bylo vytvořeno na základě potřeby firmy SLB, spol. s r.o. průzkumu trhu s broušícími kotouči pro konkrétní aplikaci. Cílem této firmy nebylo mít doporučen pouze 1 typ broušícího kotouče pro použití ve všech aplikacích a na všech bruskách, nýbrž získat představu o vhodnosti různých typů kotoučů na konkrétní aplikaci nebo jí podobné.

Autorem této práce je firmě SLB, spol. s r.o. doporučeno pro podobné aplikace využívat kotouče s obdobným složením jako testovaný 5RNA, který je vhodný i pro aplikace s nižší řeznou rychlostí a v případě náhlé potřeby použít katalogové kotouče 89A, které jsou drženy jako skladová zásoba u výrobce.

Pro tuto firmu je z výsledků testování také velmi důležité zjištění o neefektivnosti běžného nastavení brusky pro konkrétně popsanou aplikaci, kdy je pravděpodobně z důvodu strachu z možného nedosažení předepsaných parametrů nastaven delší cyklus stroje, než je ve skutečnosti potřeba a broušená oběžná dráha vnějších ložiskových kroužků je obráběna příliš přesně na úkor času, a tedy i zisku z prodeje těchto ložisek.

5.3 Hodnocení z hlediska světové situace

Broušení zaujímá při výrobě ložisek stále poměrně nezastupitelnou roli a vyrábět kvalitně s co možná nejnižšími náklady je cílem každého výrobce. Je proto nutné čas od času provést podobné testování a zjistit jaké existují na trhu novinky a zda mají pro konkrétní výrobu význam. Tato práce popisuje jedno z možných řešení testování nových produktů, konkrétně pro účel broušení vnitřní oběžné dráhy valivých ložisek a stanovuje závěry pro použití na konkrétním stroji.

Výsledky této práce jsou omezeny použitým strojem, brusku BDU 80, která je poměrně málo výkonná a nebylo možné nastavit větší rozdíly v řezných podmínkách (zejména řezné rychlosti). Závěrem v tomto ohledu může být tvrzení, že nově vyvinuté a používané materiály na broušení jako korund AT60 (Columbia) nebo CBN jsou vhodné převážně pro novější, potažmo výkonnější brusky, kde je možné využít jejich potenciál.

5.4 Návrhy na pokračování řešení

Testování provedené autorem v této práci bylo omezeno zejména výkonem použité brusky a daným rozměrem broušených ložiskových kroužků. Pro definování širších závěrů bude vhodné použít výkonnější CNC brusku s možností plynulé regulace otáček a zadání přesné řezné rychlosti (měnící se otáčky s postupným orovnáváním broušícího kotouče). Na takové brusce na otvory bude možné nastavit doporučenou řeznou rychlost, která se u jednotlivých broušících kotoučů významně liší.

Dalším krokem v pokračování řešení je vyšší rozmanitost testovaných broušících kotoučů, které se nemusí lišit v první řadě typem korundu, ale i složením. K většímu rozšíření počtu testovaných kotoučů nebylo v této práci přistoupeno z důvodu finanční nákladnosti, vyšší časové náročnosti a také menší přehlednosti dosažených výsledků, při použití více typů kotoučů.

Posledním návrhem na pokračování řešení je dodatečné testování CBN kotouče při totožných podmínkách, jaké byly nastaveny v praktické části této práce. Tento kotouč má velkou výhodu v tom, že není třeba jej často orovnávat a velmi málo se opotřebovává. Při dlouhodobém testování (stovky obroběných kusů) je možné dojít k závěru, zda je ekonomicky výhodnější než použití jiných zmíněných broušících kotoučů.

ZÁVĚR

Výsledkem této práce je podrobné porovnání pěti testovaných brousicích kotoučů, které byly postupně použity pro broušení oběžných drah vnějších ložiskových kroužků ložiska SLB 84-74 při šesti různých nastaveních brusky na díry BDU 80. Tato nastavení byla rozdílná dosaženými řeznými podmínkami. Porovnání je graficky i numericky znázorněno dle hodnot parametrů jakosti povrchu, daných výkresovou dokumentací a v technicko – ekonomickém zhodnocení je nastíněna i nákladnost jednotlivých kotoučů. Jednotlivá nastavení simulovala zhoršující se řezné podmínky a snižující se strojní čas za účelem vyšší efektivity práce. Použitá bruska BDU 80 nabízí pouze omezený výkon, a tak nebylo možné naplno využít potenciál brousicích kotoučů AT60 (Columbia) a CBN, které jsou hodnoceny jako nevhodné pro použití při daných podmínkách. Dodatečná část testování při snížené řezné rychlosti přinesla zjištění, že korundové brousicí kotouče 89A a 97A nejsou vhodné pro broušení při takto snížené řezné rychlosti. Za nastavených podmínek bylo vyneseno doporučení používat hlavně korundové brousicí kotouče 5RNA, přičemž při řezných rychlostech pod $v_c = 28 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ je používat výhradně. Nicméně z důvodu nutné výroby každé objednávky kotoučů 5RNA (nejedná se o produkt, který drží výrobce skladem), je dalším doporučením této práce používat v případě nutnosti korundové kotouče 89A, které již jsou výrobcem drženy jako skladová zásoba a jejich dodací lhůta je zpravidla velmi krátká. Dodatečným výsledkem této práce bylo zjištění, že udávané běžné nastavení brusky pro danou aplikaci je z hlediska dosažení předepsaných parametrů jakosti povrchu sice vhodné, nicméně časově náročné a neefektivní. Dle výsledků měření dosažených parametrů byla patrná úspora času až o 35 % při nastavení s vyšším radiálním záběrem, přičemž při tomto nastavení byly rovněž splněny předepsané parametry.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. ZKL GROUP. *Pro konstruktéry* [online]. 2012 [cit. 2015-02-02]. Dostupné z: <http://www.zkl.cz/cs/pro-konstruktery>
2. E-LEARNING VUT: Konstruování strojů - strojní součásti (5KS 14/15Z). *VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ* [online]. c2015 [cit. 2015-02-02]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/elearning/course/view.php?id=151304>
3. Volba valivého ložiska. In: *MITCalc* [online]. c2003-2014 [cit. 2015-02-02]. Dostupné z: http://www.mitcalc.cz/doc/help/cz/c_bearing_choice.htm
4. ELOtechnik.cz: *Ložiska* [online]. [cit. 2017-11-15]. Dostupné z: <http://www.elotechnik.cz/loziska/>.
5. Technologie obrábění: E_OPORY. HUMÁR, Anton. *Technologie I* [online]. 2003, 15. 02. 2013 [cit. 2017-11-16]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/dtb/eopory.php>
6. Speciální Ložiska Brno [online]. 2017 [cit. 2017-11-23]. Dostupné z: <http://www.slb.cz/>.
7. Feron: *Značení ocelí* [online]. 2017 [cit. 2017-11-23]. Dostupné z: <https://online.ferona.cz/znaceni-oceli/>.
8. ZEMČÍK, Oskar. *Technologické procesy: část obrábění* [online]. Brno [cit. 2017-11-23]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TechnProcesy.pdf>. Učební text. Vysoké Učení Technické v Brně.
9. OCEL 14 209 CR-MN. ČSN 41 4209. ÚNMZ, 1976.
10. Kalení a popuštění (zušlechťení). *Bodycote* [online]. London, c2012-2017, 2017 [cit. 2018-01-27]. Dostupné z: <http://www.bodycote.cz/cs-CZ/services/heat-treatment/harden-and-temper.aspx>
11. SVOBODA, Pavel, Brandejs JAN, Dvořáček JIŘÍ a FRANTIŠEK. *Základy konstruování*. Vyd. 4. Brno: CERM, 2011, 234 s. ISBN 978-80-7204-750-5.
12. PERNIKÁŘ, Jiří a Miroslav TYKAL. *Strojírenská metrologie II*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 180 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-3338-8.
13. ČECH, Jaroslav, Jiří PERNIKÁŘ a Kamil PODANÝ. *Strojírenská metrologie I*. Vyd. 5., V Akademickém nakl. CERM vyd. 3. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 183 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 978-80-214-4010-4.
14. ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. 1999.
15. KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.
16. Přesné broušení. *Katalog výrobků: Pro průmyslové aplikace* [online]. Schwaz, 2016, s. 181-233 [cit. 2018-03-27]. Dostupné z: <https://www.yumpu.com/en/embed/view/gYokS5pw3yE9Peav/229>
17. Značení tvaru, rozměrů a specifikace. *Katalog skladových výrobků: Pro univerzální broušení* [online]. Benátky nad Jizerou, 2016, s. 7-8 [cit. 2018-04-12]. Dostupné z: https://www.tyrolit.cz/fileadmin/Documents/Trade/Catalogues/TYROLIT_CZ_2016_A5_Univerza__lni__.pdf
18. Diamantové a CBN brusné kotouče. *Techcentrum* [online]. Česká Třebová: Techcentrum, 2018 [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: <https://www.prodejbrusiva.cz/diamantove-a-cbn-brusne-kotouce>

19. *Abranova: Korund* [online]. Postoloprty: Abranova, 2018 [cit. 2018-04-26].
Dostupné z: <http://abranova.cz/korund>
20. ČZ STRAKONICE. *BDU 80: UNIVERZÁLNÍ BRUSKA NA VNITŘNÍ BROUŠENÍ*.
1986, 77 s.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
5RNA	[-]	směs korundů 98A (světle růžový) a 96A (hnědý); kotouč 5RNA 80 K 9 V C40
89A	[-]	bílý korund; kotouč 89A (A99B) 802 I5 V111
97A	[-]	mikrokrystal; kotouč 97A 802 I5 V112
Al₂O₃	[-]	kysličník hlinitý (umělý korund)
AT60	[-]	monokrystal; kotouč AT60 J6 VCOL (Columbia)
CBN	[-]	kubický nitrid bóru; kotouč CBN B107 K100
CNC	[-]	Computer Numeric Control – číslicové řízení počítačem
HRC	[-]	značka zkoušky tvrdosti podle Rockwella
IT	[-]	stupeň přesnosti
N, NU, NJ	[-]	způsob vedení válečků u válečkových ložisek
NC	[-]	Numeric Control – číslicové ovládání (bez počítače)
P_p	[-]	nástrojová rovina zadní
P_r	[-]	nástrojová rovina základní
P_f	[-]	nástrojová rovina boční
PFS, PFSH	[-]	označení přesných vodících kolejnic
SiC	[-]	karbid křemíku (karborundum)
SLB, spol. s r.o.	[-]	Speciální Ložiska Brno, společnost s ručením omezeným
Symbol	Jednotka	Popis
A_D	[mm ²]	jmenovitá plocha řezu třísky
a_e	[mm]	pracovní záběr
b_d	[mm]	šířka brousicího kotouče
C	[mm]	velikost přeběhu kotouče
C_m	[-]	konstanta charakterizující obrobek při výpočtu řezné síly
D_{max}	[mm]	maximální průměr brousicího kotouče
d_m	[mm]	průměr řemenice u motoru
d_s	[mm]	průměr brousicího kotouče
d_{sv}	[mm]	průměr řemenice u brousicího kotouče (u brusného vřeteníku)
d_w	[mm]	průměr broušeného otvoru
F_c	[N]	řezná síla
f_a	[mm] [mm.zdvih ⁻¹]	axiální záběr

f_r	[mm]	radiální záběr
h	[mm]	vzdálenost os obrobku a podávacího kotouče
h_{eq}	[mm]	ekvivalentní tloušťka třísky
i	[-]	převodový poměr
K	[mm]	velikost překrytí kotouče
k_c	[MPa]	měrná řezná síla
l	[mm]	délka obráběné plochy
M	[mm]	velikost průsvitu kotouče
m	[ks]	definovaná série obrobků (m = 2.500 ks)
N	[Kč]	celkové náklady na výrobu 1 obrobku při sérii m
N_k	[Kč]	cena 1 ks kotouče
N_m	[Kč]	cena 1 minuty strojního času (N _m = 20,- Kč)
n	[ks]	potřebný počet kotoučů pro obrobení m obrobků
n_m	[min ⁻¹]	frekvence otáčení motoru
n_s	[min ⁻¹]	frekvence otáčení broušícího kotouče (brusného vřeteníku)
n_w	[min ⁻¹]	frekvence otáčení obrobku (pracovního vřeteníku)
R_a	[μm]	průměrná aritmetická úchylna povrchu
t	[μm]	šířka tolerančního pole
t_{AS}	[s]	celkový čas broušení (na 1 obrobek)
t_{ASC}	[min]	celkový čas pro obrobení m obrobků
t_v	[s]	doba výměny a 1. orovnění kotouče (t _v = 20 s)
t_w	[s]	doba vyjiskření
u	[-]	převodové číslo
v_c	[m.s ⁻¹]	obvodová rychlost broušícího kotouče; řezná rychlost
v_f	[m.min ⁻¹]	posuvová rychlost
v_{fa}	[m.min ⁻¹]	axiální rychlost posuvu stolu; vodorovná složka v _{pk}
v_{fr}	[m.min ⁻¹]	radiální rychlost posuvu stolu
v_{ft}	[m.min ⁻¹]	tangenciální rychlost posuvu stolu
v_{pk}	[m.min ⁻¹]	obvodová rychlost podávacího kotouče
v_{vř}	[m.min ⁻¹]	rychlost obíhání brusného vřetena kolem osy broušeného otvoru
v_w	[m.min ⁻¹]	obvodová rychlost obrobku
γ_n	[°]	normální úhel čela
α_n	[°]	normální úhel hřbetu

SEZNAM PŘÍLOH

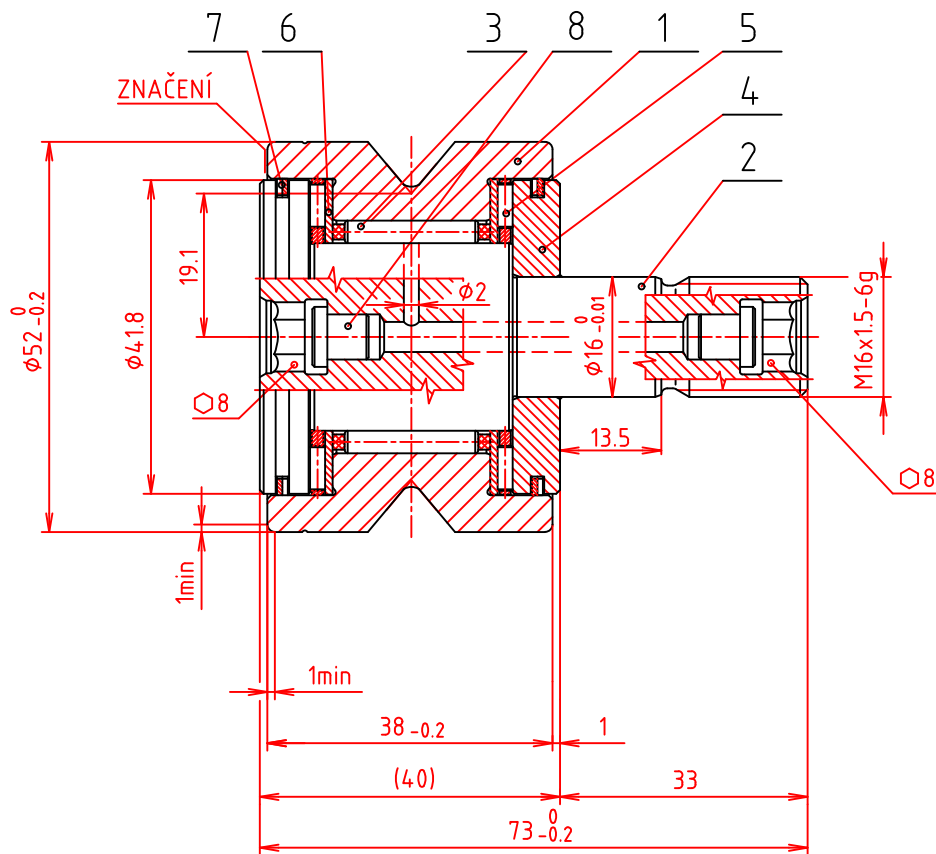
- Příloha 1 Technický popis brusky BDU 80.
- Příloha 2a Výkres sestavy ložiska SLB 84-74
- Příloha 2b Výkres vnějšího kroužku ložiska SLB 84-74 – měkké operace
- Příloha 2c Výkres vnějšího kroužku ložiska SLB 84-74

PŘÍLOHA 1

Technický popis brusky BDU 80 [20].

název	- Univerzální bruska na vnitřní broušení BDU 80
výrobce	- ČZ Strakonice
rok výroby	- 1986
minimální průměr broušeného otvoru	- 3 mm
maximální průměr broušeného otvoru	- 120 mm
maximální délka broušení	- 150 mm
maximální oběžný průměr	- 220 mm
oběžný průměr v podpěře	- 100 mm
maximální délka broušeného obrobku	- 450 mm
natačení unášecího vřeteníku	- 45°
maximální zdvih podélného stolu	- 550 mm
minimální délka oscilace	- 3 mm
otáčky unášecího vřetená	- 60, 90, 160, 280, 430, 740 min ⁻¹
otáčky vybrušovacích vřeten	- 10 000 – 60 000 min ⁻¹
posuv podélného stolu při broušení	- 0,1 – 5,5 m.min ⁻¹
přísuv brusného kotouče v úvrati při	
hrubování a dokonč. broušení	- 0,001 – 0,01 mm
elektrický příkon	- 8,5 kVA
hmotnost stroje	- 2600 kg
půdorysná plocha stroje	- 2630 x 1490 mm

Příloha 2a



Tento výkres je důležitým majetkem S L B s.r.o. a nesmí být bez jeho svolení rozmnožován ani postoupen třetí osobě. Příjemce výkresu ručí za jeho důvěrné užití a za škody vzniklé zneužitím.

Pouze pro informativní účely

ZÁKLADNÍ PARAMETRY RADIÁLNÍ

Cr (kN)	24.7
Cor (kN)	38

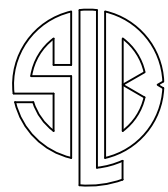
AXIÁLNÍ

Ca (kN)	14.7
Coa (kN)	58

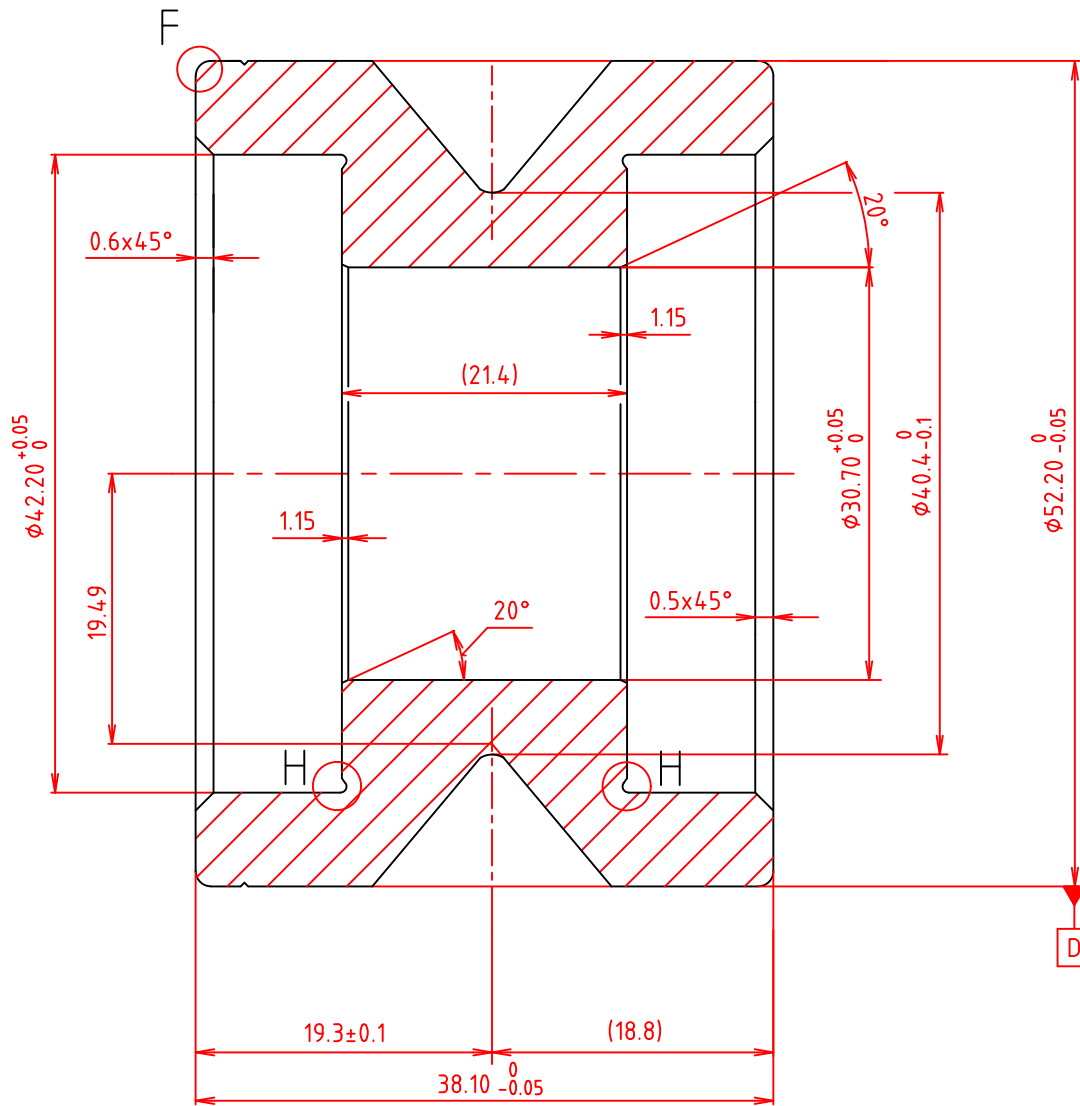
- 3. PLNĚNO PĚŠTIVÝM MAZIVEM CASTROL SPHEEROL EPL 2 NEBO SHELL ALVANIA R3
- 2. AXIÁLNÍ VŮLE V LOŽISKU Ga : 0.05 AŽ 0.15
- 1. RADIÁLNÍ VŮLE V LOŽISKU Gr : 0.020 AŽ 0.045

8	MAZACÍ ZÁTKA			2
7	TĚSNIČÍ KROUŽEK			4
6	AXIÁLNÍ KROUŽEK			2
5	AXIÁLNÍ KLEC S JEHLAMI			2
4	PŘÍLOŽNÝ KROUŽEK	14-SLB 84-74-75		1
3	JEHLOVÁ KLEC			1
2	ČEP	14-SLB 84-74-20		1
1	VNĚJŠÍ KROUŽEK	14-SLB 84-74-10		1

Pos.	Součást	Číslo výkresu	Materiál	Odpad	Kusů
Změny	Ind.	Dříve	Nyní	Dat. - Pod.	
CAD DESIGN					
Kreslil Zháněl 24.7.2017		Norm.		Hmotnost ≈ 0.6 kg	
Prezkouš.		Schválil		Dne	
Měřítko 1:1		Starý výkres		Nový výkres	
Název sestavy			14-SLB 84-74-00		
KOMBINOVANÉ JEHLOVO-VÁLEČKOVÉ LOŽISKO			2		
SLB 84-74					



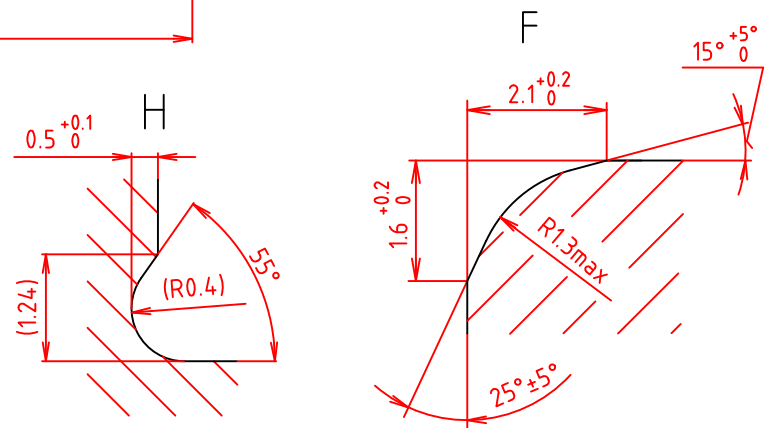
SLB s.r.o.
BRNO



Tento výkres je duševním majetkem S.L.B. s.r.o. a nesmí být bez jeho svolení rozmnožován ani postoupen třetí osobě. Příjemce výkresu ručí za jeho důvěrné užití a za škody vzniklé zneužitím.

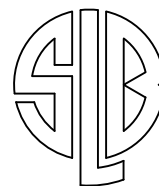
Pouze pro informativní účely

KALENO A POPUŠTĚNO NA (58^{+2}_0) HRC



1. ÚCHYLKY NETOLEROVANÝCH ROZMĚRŮ DLE ISO 2768-m

Ind.	Dřive	Nyní	Dat. - Pod.
Materiál 14 109.3 (14 209.3)		Dřpad 021	
Polotovár		Pozice 1	
C A D D E S I G N		14	
Kreslil Zháněl 24.7.2017		Norm.	
Prezkouš.		Schválil Dne	
Název sestavy KOMBINOVANÉ JEHLOVO-VÁLEČKOVÉ LOŽISKO SLB 84-74			
Součást VNĚJŠÍ KROUŽEK-MĚKKÉ OPERACE			



SLB s.r.o.
BRNO

Hmotnost ≈ 0.28 kg

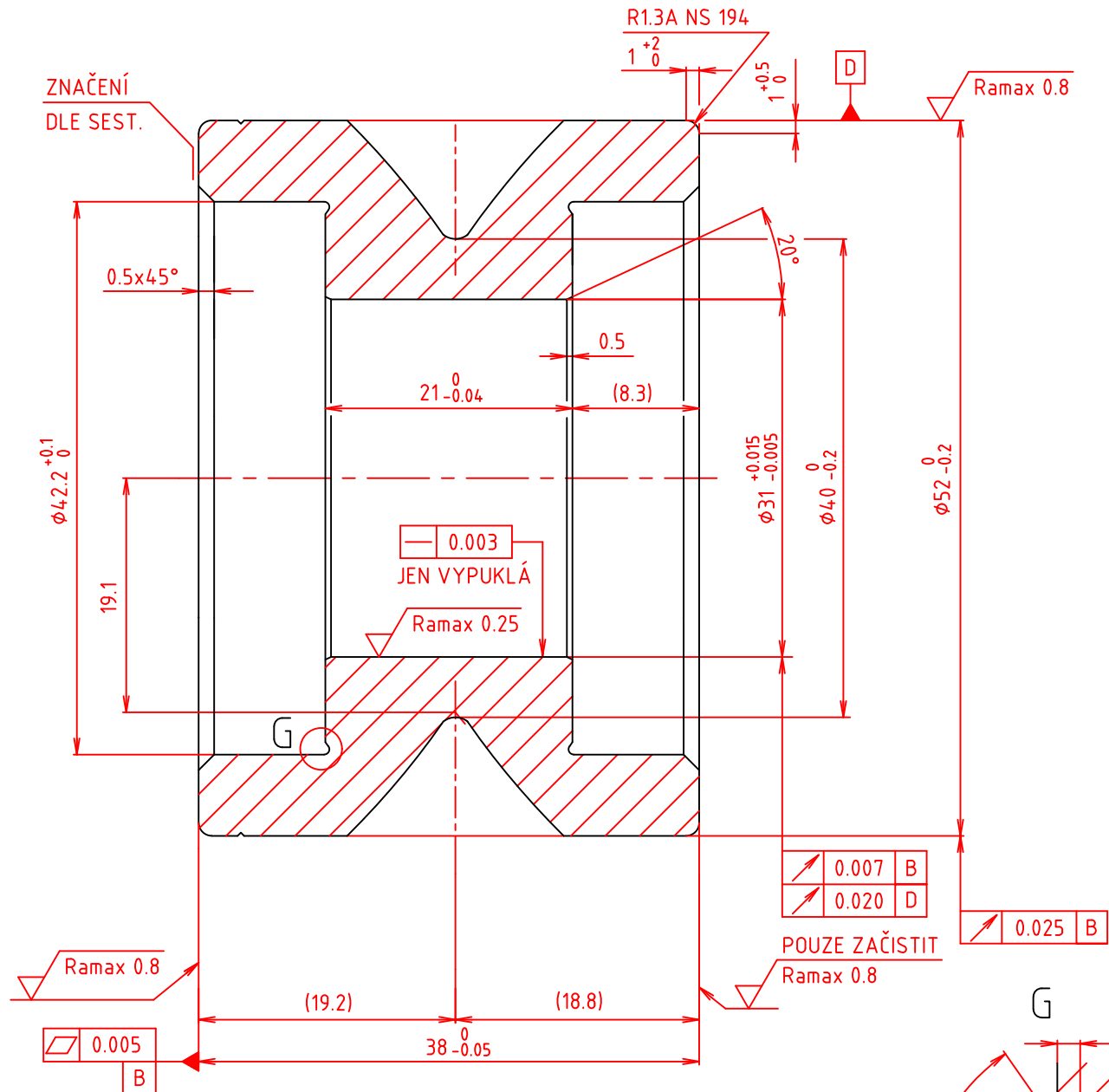
Měřítko N

Starý výkres

Nový výkres

14-SLB 84-74-10/M

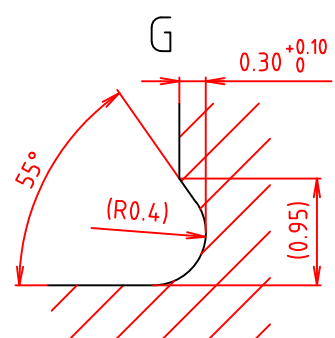
2



Pouze pro informativní účely

Tento výkres je důležitým majetkem SLB s.r.o. a nesmí být bez jeho svolení rozmnožován ani postupem třetí osoby. Při jeho výkresu učít za jeho důvěrné užití a za škody vzniklé zneužitím.

- 3. ÚCHYLKY NETOLEROVANÝCH ROZMĚRŮ DLE ISO 2768-m
 - 2. KUŽELOVITOST OBĚŽNÉ DRÁHY 0.0015 max
 - 1. VLNITOST RADIÁLNÍ OBĚŽNÉ DRÁHY 0.0008 max ; TROJHRAN 0.005 max
- KALENO A POPUŠTĚNO NA (58⁺²₀) HRC



Změny	Ind.	Dřive	Nyní	Dat. - Pod.
Materiál 14 109.3 (14 209.3)		Odpad 021		
Polotovar		Pozice 1		
C A D D E S I G N		14		
Kreslil Zháňel 24.7.2017		Norm.		
Prezkuš.		Schválil Dne		
Název sestavy KOMBINOVANÉ JEHLOVO-VÁLEČKOVÉ LOŽISKO SLB 84-74				
Součást VNĚJŠÍ KROUŽEK				



SLB s.r.o.
BRNO

Hmotnost ≈ 0.28 kg

Měřítko N

Starý výkres

Nový výkres

14-SLB 84-74-10

2