



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

MĚŘENÍ A KONTROLA ROZMĚRŮ U BROUSICÍCH OPERACÍ

MEASUREMENT AND CHECKING OF DIMENSIONS IN GRINDING OPERATIONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michael Kovařík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Trčka

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Michael Kovařík**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Tomáš Trčka**
Akademický rok: 2021/22

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

Měření a kontrola rozměrů u brousicích operací

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Dokončovací operace prováděné broušením vyžadují jak precizní strojové vybavení, tak kvalifikovanou obsluhu. Tyto záležitosti zachycuje zadané téma.

Cíle bakalářské práce:

- Charakteristika dokončovacích operací.
- Přehled materiálů k broušení.
- Dosahované parametry broušených ploch.
- Vybavení měřidly a přípravky.
- Kvalifikace obsluhy.
- Ukázková zvolená dokončovací operace.
- Zhodnocení.

Seznam doporučené literatury:

FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. Strojnické tabulky. 3. vyd. Úvaly: ALBRA, 2006. 914 s. ISBN 80-7361-033-7.

MÁDL, Jan et al. Jakost obráběných povrchů. 1. vyd. Ústí nad Labem: UJEP, 2003. 180 s. ISBN 80-7044-639-4.

PÍŠKA, Miroslav et al. Speciální technologie obrábění. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2009. 252 s. ISBN 978-80-214-4025-8.

Příručka obrábění, kniha pro praktiky. 1. vyd. Praha: Sandvik CZ, s. r. o. a Scientia, s. r. o., 1997. 857 s. ISBN 91-972299-4-6.

PTÁČEK, Luděk et al. Nauka o materiálu I. 2. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2003. 516 s. ISBN 80-720-4283-1.

PTÁČEK, Luděk et al. Nauka o materiálu II. 2. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2003. 516 s. ISBN 80-720-4283-1.

SHAW, Milton Clayton. Metal Cutting Principles. 2nd ed. Oxford: Oxford University Press, 2005. P. 651. ISBN 0-19-514206-3.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Bakalářská práce se věnuje tématu měření a kontrole rozměrů u brousicích operací. Pro uvedení do dané problematiky je v úvodní části práce stručná charakteristika a rozdělení jednotlivých dokončovacích operací. Důraz je kladen na broušení, které je hlavním tématem této práce. V souvislosti s broušením jsou zmíněny především základní brousicí materiály a dosahované parametry broušených ploch. Dále se práce zaměřuje na měřicí techniku používanou pro vyhodnocování struktury povrchu, měřidla používaná pro měření a kontrolu délkových rozměrů a na základní rozdělení a popis vybraných přípravků. V další části jsou uvedeny předpoklady pro kvalifikaci obsluhy v oblasti technologie broušení. V závěru této práce je zvolena součástka, na které je aplikována vybraná metoda broušení, kdy řešení je provedeno analyticky. Po ní následuje zhodnocení.

Klíčová slova

broušení, brousicí materiál, parametry broušených ploch, měřidla, dokončovací operace

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with the topic measurement and checking of dimensions in grinding operations. To introduce the issue there is in the introductory part of the work a brief characteristic and distribution of particular finishing operations. Emphasis is put on grinding that is the main subject of this work. In connection with grinding there are mentioned mainly basic abrasive materials and achieved parameters of ground surface. Then the work focuses on measuring instruments that are used for evaluating surface structure, gauges that are used for measuring and controlling longitudinal dimensions and on basic distribution and description of chosen jigs. In another part are introduced conditions for operator qualifications in the area of grinding technology. In conclusion of this work is chosen a component on which is applied chosen grinding, the solution is analytical. After it follows evaluation.

Key words

grinding, abrasive material, parametres of ground surface, gauges, finishing operations

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOVAŘÍK, Michael. *Měření a kontrola rozměrů u brousicích operací* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/137045>.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav
strojírenské technologie. Vedoucí práce Tomáš Trčka.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Měření a kontrola rozměrů u brousicích operací vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

Brno, 20. 5. 2022

místo, datum

Michael Kovařík

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu Ing. Tomáši Trčkovi za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

ÚVOD.....	9
1 CHARAKTERISTIKA DOKONČOVACÍCH OPERACÍ.....	10
1.1 Abrazivní metody obrábění	10
1.2 Beztržiskové metody obrábění	12
2 BROUŠENÍ.....	14
2.1 Základní metody broušení	14
2.1.1 Obvodové broušení vnějších ploch do kulata	15
2.1.2 Obvodové broušení vnitřních ploch do kulata	16
2.1.3 Tvarové broušení	17
2.1.4 Rovinné broušení	17
2.2 Přehled materiálů k broušení	18
2.2.1 Přírodní brousicí materiály.....	18
2.2.2 Umělé brousicí materiály	19
2.3 Supertvrdé řezné materiály	20
2.3.1 Diamant.....	20
2.3.2 Kubický nitrid boru.....	22
2.4 Brousicí nástroje	22
2.4.1 Standardní brousicí kotouče.....	22
2.4.2 Brousicí kotouče ze supertvrdých řezných materiálů	24
2.5 Brousicí stroje – brusky.....	25
3 DOSAHOVANÉ PARAMETRY BROUŠENÝCH PLOCH	27
3.1 Struktura povrchu.....	27
3.1.1 Vlnitost povrchu	27
3.1.2 Drsnost povrchu.....	27
3.2 Podmínky ovlivňující drsnost broušeného povrchu.....	28
3.2.1 Drsnost povrchu při broušení diamantem a kubickým nitridem boru	30
4 VYBAVENÍ MĚŘIDLY A PŘÍPRAVKY	31
4.1 Měřidla pro měření a kontrolu délkových rozměrů	31
4.1.1 Přímá délková měřidla	31
4.1.2 Nepřímá délková měřidla.....	33
4.2 Měřicí technika pro přesné vyhodnocování struktury povrchu	34
4.2.1 Dotykové měřicí přístroje	34
4.2.2 Bezdotykové měřicí přístroje	35
4.2.3 Porovnání dotykových a bezdotykových měřicích přístrojů.....	36
4.3 Výrobci měřidel a měřicí techniky.....	36
4.4 Charakteristika přípravků a jejich rozdělení.....	37
4.4.1 Kontrolní přípravky	38
4.4.2 Měřicí přípravky	38
5 KVALIFIKACE OBSLUHY	40
6 UKÁZKOVÁ ZVOLENÁ DOKONČOVACÍ OPERACE	41
6.1 Materiál polotovaru.....	41
6.2 Volba brousicího stroje a brousicího kotouče	41

6.3	Technologický postup výroby	43
6.4	Řezné podmínky	43
6.5	Výpočet parametrů broušicího procesu	44
6.6	Zhodnocení	47
ZÁVĚR		49
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ		50
SEZNAM POUŽITÝCH SYMOBLŮ A ZKRATEK		53
SEZNAM PŘÍLOH		54

ÚVOD

Ve strojírenské výrobě jsou požadavky na přesnost rozměrů a kvalitu povrchové vrstvy součástí stále vyšší. Dokončovací operace patří mezi technologie obrábění, kterými lze tyto požadavky splnit. Dokážou zajistit přesnost rozměrů v řádech mikrometrů a drsnost obrobené plochy běžně v řádech desítek až stovek mikrometrů, lapováním lze dokonce docílit drsnosti povrchu s přesností až na tisíce mikrometrů.

Jednou z předních dokončovacích operací je broušení, které má své uplatnění v kusové i sériové výrobě. Broušení nabízí mnoho výhod, ať už je to možnost využít ho jako hrubovací nebo dokončovací operaci, tak i obrábět široké spektrum součástí různých tvarů a rozměrů díky rozsáhlé škále metod, které broušení nabízí. Celý tento proces je poměrně složitý, ať už z fyzikálního, mechanického nebo chemického hlediska. Je ovlivněn mnoha faktory, které se přímo podílí na výsledné kvalitě opracované součásti. Mezi ty nejdůležitější patří brousicí materiál. Když se řekne pazourek, tak si všichni vybaví dobu kamennou spolu s nástroji a zbraněmi, které si z něj lidé vyráběli. Pazourek má své místo v oblasti broušení dodnes, spolu s dalšími přírodními materiály. Avšak nové možnosti, nejen v oblasti broušení, s sebou přinesly synteticky vyrobené materiály jako je diamant nebo kubický nitrid boru. Především jejich vysoká tvrdost a odolnost umožnila obrábět materiály, které by byly za použití jiných rezných materiálů těžko obrobitelné.

S rostoucími nároky na rozměrovou přesnost a kvalitu povrchové vrstvy součástí se rovněž zvyšují požadavky v oblasti měření a kontroly. Pro vyhodnocování struktury povrchu, jejíž hlavní složku tvoří drsnost povrchu, je možnost využít porovnávací vzorky. Ale vzhledem k vysokým přesnostem, kterých se dnes dosahuje, je jejich použití omezené, a ne vždy přesné. Namísto toho mají mnohem větší využití kontaktní a bezkontaktní měřicí zařízení. Dále měřidla jako jsou kalibry, posuvná měřidla, mikrometry a další, která se používají pro kontrolu a měření délkových rozměrů a patří k základnímu vybavení každé dílny. K efektivitě a úspoře času při kontrole a měření napomáhají také přípravky, které mají ve strojírenství velké zastoupení, ať už jsou to přípravky měřicí nebo kontrolní.

Cílem bakalářské práce je objasnit problematiku dokončovací operace broušení, poukázat na materiály, které se pro broušení používají, uvést parametry dosažené broušením a poukázat na faktory, které brousicí proces ovlivňují. Dále přiblížit oblast měření a kontroly rozměrů i struktury povrchu. Uvést požadavky, které by měla kvalifikovaná osoba splňovat, a nakonec navrhnout zvolenou dokončovací operaci.

1 CHARAKTERISTIKA DOKONČOVACÍCH OPERACÍ

Při běžných třískových metodách obrábění často nelze dosáhnout požadované přesnosti a hladkosti obráběného povrchu, proto se využívají dokončovací operace obrábění. Dokončovací operace se řadí mezi technologie obrábění, při kterých je dosažena zejména vysoká jakost a přesnost obrobku. Vysoké přesnosti je dosaženo v důsledku malých průřezů třísek. Ty mají za následek snížení velikosti řezných sil. Deformace obrobku, upínače, nástroje a stroje pak dosahují nízkých hodnot. Dále jsou zdokonaleny fyzikální a mechanické vlastnosti obrobku. Především požadavek na tvar, jakost a přesnost obráběného povrchu rozhoduje o tom, jakou dokončovací operaci je vhodné zvolit. Jejich použití je poměrně nákladné, a proto musí vždy dojít k jeho odůvodnění. Dokončovací operace je možné dále rozdělit na abrazivní a bezřískové metody obrábění. [7]

1.1 Abrazivní metody obrábění

Abrazivní metody obrábění jsou charakteristické využitím mnohobřítých nástrojů, které nemají definovanou geometrii břitu. Tyto metody patří k nejvíce využívaným technologiím obrábění v případech, kdy jsou požadavky na přesnost tvaru, rozměrů a drsnost povrchu obráběných ploch velmi vysoké. Mezi hlavní abrazivní metody obrábění patří honování, lapování, superfinišování a broušení. [8]

Honování

Při této metodě se pro odebrání materiálu obrobku využívají broušící zrna, která jsou na pevno vázaná pojivem v honovacích lištách nebo kamenech. O procesu honování rozhodují 3 parametry: řezná rychlost v_c (m.s^{-1}), rychlost posuvového vratného pohybu v_f (m.min^{-1}) a měrný tlak p_k (MPa), kterým honovací kameny působí na obrobek. Při honování je část nástroje ve stálém kontaktu s obráběnou plochou, kdy nástroj vykonává současně pohyb rotační a přímočarý vratný. Obrobek pak může vykonávat rotační pohyb společně s nástrojem. Další možností je rotační pohyb obrobku a přímočarý vratný pohyb nástroje. [7]

Nejčastěji se honování používá pro dokončování válcových děr, které tvoří 80 % této operace. Dále se honují např. hřídele, rovinné plochy. Výhodou je velká škála materiálů, které lze obrábět. Lze honovat litinu, kalenou i nekalenou ocel, mosaz, bronz apod. Mezi typické součásti dokončené honováním patří válce spalovacích motorů, ložiskové kroužky, kluzná ložiska, pneumatické válce. Pro ukázkou jsou zde uvedeny honovací stroje firmy Gehring (obr. 1). [7]

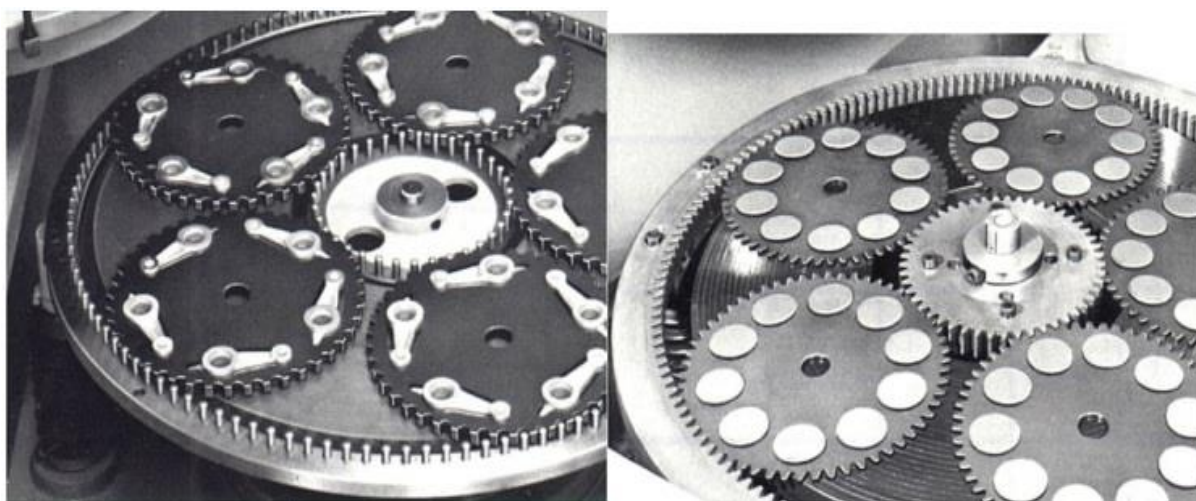


Obr. 1 Honovací stroje firmy Gehring [9].

Lapování

Lapování je abrazivní metoda obrábění, při které je materiál odebírán velmi jemným broušením prostřednictvím volného brusiva, které je ve stálém kontaktu mezi nástrojem (obr. 2) a obrobkem (měkké lapovací nástroje pak mají brusivo v nástroji zamačkané nebo jinak upevněné). Nástroj a obrobek se vůči sobě vzájemně pohybují. Dělí se na hrubovací, jemné a velmi jemné lapování. Lapování je málo produktivní a v porovnání s dalšími dokončovacími metodami obrábění je vysoce nákladné. Další nevýhodou je jeho pracnost. [9]

Lapováním se opracovávají plochy vnější a vnitřní rovinné, válcové a tvarové. Při této metodě je v porovnání s ostatními dokončovacími operacemi dosažena nejvyšší rozměrová přesnost a také nejmenší drsnost povrchu obrobku. Velké využití má při opracovávání funkčních ploch měřidel (např. kalibry), součástí motorů automobilů, závitových spojení, ozubení apod. Lze lapovat: slitiny mědi (bronz a mosaz), slitiny hliníku, nitridované povrchy, slinuté karbidy apod. Po skončení lapovací operace je velmi důležité lapovanou součást řádně očistit. Na očištění od zrn brusiva, pasty a kapaliny se používá např. petrolej nebo roztok nitridu sodného. [7; 9]



Obr. 2 Lapovací kotouče [9].

Superfinašování

Superfinašování je dokončovací metoda obrábění, charakterizovaná také jako jemné broušení. Nerovnosti na obráběném povrchu se odebírají superfinašovacími kameny, které obsahují velmi jemná zrna. Proces superfinašování probíhá při malých řezných rychlostech a při kmitavém pohybu nástroje (superfinašovacích kamenů). Při obrábění dochází ke vzájemnému pohybu nástroje a obrobku, kdy obrobek vykonává pohyb rotační a nástroj kmitavý přímočarý posuvový. Pohyb nástroje pak směřuje kolmo na směr rotačního pohybu obráběné součásti. Před superfinašováním se zpravidla provádí broušení, popřípadě vyvrtávání nebo jemné soustružení. [8]

Z velké části se superfinašování používá pro dokončování vnějších válcových ploch, dále se používá pro dokončování děr a rovinných ploch. Superfinašovat lze materiály z litiny, neželezných kovů, kalené a měkké oceli. Příkladem součástí zhotovených superfinašováním jsou valivé prvky ložisek, čepy a koncové části hřídelů používané pro kluzná uložení. [5]

Mezi další abrazivní metody obrábění patří broušení. Broušení je hlavním tématem této bakalářské práce a budou se jím zabývat následující kapitoly.

1.2 Beztrískové metody obrábění

U beztrískových metod obrábění je důležitým aspektem plastická deformace, která vzniká na povrchu obráběného materiálu. Některé metody (např. kuličkování, otryskávání) se využívají pro jejich čistící účinek. Vlivem plastické deformace jsou hodnoty parametrů struktury povrchu zlepšeny, je zvýšena tvrdost a pevnost. Plastická deformace je dále doprovázena vznikem tlakových zbytkových napětí v místě povrchové vrstvy materiálu, čímž dochází ke zvýšení meze únavy, odolnosti proti korozi a opotřebení. [8]

Otryskávání, kuličkování, balotínování

Tyto beztrískové metody obrábění využívají k úpravě povrchu aktivní částice (abrazivní zrna, skleněné, kovové nebo keramické kuličky), které jsou tlakem stlačeného vzduchu nebo kapaliny vrhány na povrch upravované součásti. Parametry částic (jejich tvar, hmotnost, rozměr a materiál) určují, jak dlouho bude úprava povrchu probíhat a jaká bude jeho výsledná kvalita. Otryskávání využívá abrazivních zrn vyrobených z organických nebo minerálních materiálů. Kuličkování využívá zejména litinové nebo ocelové kuličky, balotínování skleněné kuličky. Kovové kuličky jsou výhodné vzhledem k jejich vysoké pevnosti, avšak při úpravě po nich zůstávají na povrchu stopy otěru. Skleněné a keramické kuličky stopy otěru na povrchu nezanechávají. Nevýhodou je jejich křehkost, kdy při nárazu na upravovaný povrch dochází ve značné míře k jejich poškození. Celý cyklus otryskávání, kuličkování a balotínování probíhá ve speciálních komorách. Cyklus probíhá při ručně naváděných tryskách, při pohybu trysky nebo součásti jejich automatizací, často se využívá i CNC řízení. Příkladem součástí upravovaných těmito metodami jsou ozubená kola, podvozkové nápravy, spojovací tyče, motorové bloky, ventily. [9]

Válečkování

Tato metoda využívá kalená tvářecí tělíska, která jsou otočně uložena v přípravku a jsou přitlačována na upravovaný povrch součásti. Přitlačování je buď mechanické za pomoci pružin, nebo hydraulické tlakem kapaliny. Válečkováním je zpevněna povrchová vrstva a zahlazováním nerovností je zlepšena drsnost povrchu. Podle pohybu tvářecího tělíska a obrobku se dělí na statické a dynamické. Při statickém válečkování se otáčí tvářecí tělísko a obrobek. U dynamického válečkování pak tvářecí tělísko navíc vykonává kmitavý pohyb. Používá se pro dokončování vnitřních i vnějších ploch. Válečkování je možné provést po frézování, soustružení, hoblování a vyvrtávání. [5]

Hlazení

Hlazení je dokončovací operace, při které je upravovaný povrch vyhlazován diamantem s kuželovou špičkou, ta má jasně definovaný poloměr zaoblení. Kuželová špička působí na povrch součásti konstantní silou. Tato operace slouží pro součásti, které jsou vyrobeny z tepelně zpracovaných ocelí. Při hlazení vznikají vhodné podmínky pro kluzné tření, jelikož v místě kontaktu nástroje s obrobkem nedochází k odvalování (na rozdíl od válečkování). Hodnota drsnosti povrchu se odvíjí od materiálu součásti a od pracovních podmínek, nejlepších výsledků je dosaženo u ocelí s tvrdostí 50 až 55 HRC. [8]

V tab. 1 jsou doplněny další technologie obrábění, které lze taky použít jako dokončovací operace a nebyly zde zmíněny.

Tab. 1 Přehled dokončovacích operací obrábění [7].

Druh obrábění	Drsnost povrchu Ra (μm)	Stupeň přesnosti IT
Soustružení	0,4 až 1,6	7 až 9
Jemné soustružení	0,2 až 0,8	5 až 7
Vyvrtávání	0,2 až 0,8	4 až 6
Vystružování	0,2 až 0,8	5 až 7
Frézování	0,4 až 1,6	7 až 8
Zaškrabávání	0,4 až 1,6	3 až 6
Běžné broušení	0,4 až 1,6	5 až 7
Jemné broušení	0,1 až 0,4	3 až 5
Klasické honování	0,1 až 0,8	3 až 5
Diamantové honování	0,2 až 0,8	2 až 4
Vibrační honování	0,1 až 0,4	2 až 4
Elektrochemické honování	0,2 až 0,8	3 až 5
Superfinišování	0,01 až 0,2	1 až 3
Lapování	0,005 až 0,2	1 až 3
Leštění kotouči	0,1 až 0,4	4 až 7
Leštění pásy	0,1 až 0,4	3 až 6
Chemické leštění	0,1 až 0,4	5 až 8
Elektrochemické leštění	0,1 až 0,8	6 až 9
Kartáčování	0,2 až 0,8	6 až 10
Vibrační leštění	0,2 až 1,6	6 až 10
Omílání	0,4 až 1,6	7 až 11
Válečkování	0,1 až 0,4	6 až 7
Kuličkování	0,2 až 0,8	7 až 9
Protlačování	0,2 až 0,8	5 až 7

2 BROUŠENÍ

Broušení je jedna z hlavních dokončovacích metod, při které se dosahuje vysoké rozměrové přesnosti a jakosti obrobených ploch. Historicky se řadí k nejstarším metodám obrábění. V současné době vlivem narůstajících technologií a nových možností má broušení uplatnění nejen u dokončovacích operací, ale také v oblasti hrubování, kdy svou produktivitou dosahuje srovnatelných výsledků jako ostatní metody obrábění. Velké uplatnění má při výrobě valivých ložisek. [10]

Broušení je charakteristické následujícími znaky [10]:

- zrna brusiva jsou v brousicím nástroji nepravidelně rozmístěna a jednotlivá zrna se liší svou geometrií, proto dochází k nepravidelnému úběru třísky,
- jednotlivá zrna mají záporné úhly čela odlišná a často dosahují velkých hodnot, což má za následek ovlivnění oblastí primární plastické deformace,
- zrna jsou pojivem slabě upevněna a díky tomu jsou přenášeny řezné síly velmi malé, při obráběcím procesu se jednotlivá zrna nebo jejich části samovolně uvolňují, čímž dochází k „samoostření“ brousicího kotouče,
- průřez třísek dosahuje hodnoty cca 10^{-3} mm^2 a je proměnlivý (stejně jako u frézování), při broušení vznikají vlivem velkých plastických deformací vysoké teploty (až $1500 \text{ }^{\circ}\text{C}$), kdy dochází k roztavení a shoření některých třísek,
- jednotlivá brusná zrna jsou v záběru velmi krátkou dobu kvůli vysokým řezným rychlostem ($30\text{--}100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) a vysokým hodnotám měrných řezných sil, jejichž hodnoty se mohou pohybovat až v desetitisících MPa,
- kvůli vysokým teplotám při obrábění je zapotřebí přivést řeznou kapalinu mezi obrobek i řezný kotouč,
- při broušení jsou ostří jednotlivých brusných zrn otupovány a póry jsou zanášeny třískami, čímž dochází ke ztrátě řezivosti, ta se pak dá obnovit za pomoci orovnávačů (jednokamenové, více kamenové, ploché, tvarové).

2.1 Základní metody broušení

Strojírenská výroba v současnosti využívá několik rozsáhlých metod broušení, které se provádí zpravidla na standardních nebo číslicově řízených bruskách [2]. Mezi základní metody broušení patří [2]:

- obvodové broušení vnějších ploch do kulata: axiální broušení, hloubkové, radiální, bezhroté,
- obvodové broušení vnitřních ploch do kulata: broušení axiální, bezhroté, planetové,
- broušení tvarové,
- broušení rovinné: obvodové, čelní.

2.1.1 Obvodové broušení vnějších ploch do kulata

Axiální broušení

Axiální broušení má velké využití při obrábění dlouhých rotačních součástek válcového nebo kuželového tvaru. Pro podepření dlouhých a štíhlých součástek se používá luneta. Broušení probíhá při podélném (axiálním) posuvu, kde jsou pohyby obrobku a nástroje následující: obrobek se současně otáčí mezi hroty (n_w) a koná posuvový pohyb (v_{fa}) rovnoběžný s osou obrobku nebo se obrobek pouze otáčí (n_w) a nástroj koná posuvový pohyb (v_{fa}) podél osy obrobku. Kotouč nebo obrobek vykonává radiální posuv (f_r) o hodnotu pracovního záběru ($a_e = f_r$) na každý zdvih nebo dvojzdvih stolu, tím dochází k úběru obráběného materiálu. [8]

Hloubkové broušení

U této metody broušení dochází k úběru obráběného materiálu během jednoho podélného zdvihu stolu při malé axiální rychlosti posuvu. Hloubkové broušení je vysoce produktivní metoda, přídavky na broušení jsou zde malé. Při obrábění je malé množství brousících zrn odřezáno odebraným materiálem, u zbylých brousících zrn dojde k jejich vyjiskření, což je u této metody velkou výhodou. Pracovní (radiální) záběr (a_e) se nastavuje na hodnotu 0,1–0,4 mm. Výkon u hloubkového broušení je o 25–75 % vyšší než u axiálního broušení. [2]

Radiální broušení

Při radiálním (zapichovacím) broušení musí být splněna podmínka, kdy předmětem obrábění je tuhý obrobek, jehož maximální délka je zpravidla $l_w = 350$ mm a tato délka nesmí být větší než šířka brousícího kotouče b_s (musí platit $b_s > l_w$). U radiálního broušení je potřeba vhodně zvolit hodnotu radiálního posuvu stolu (nebo kotouče) na jednu otáčku obrobku (f_r). U broušení na hrubo se volí $f_r = 0,0025$ až $0,0075$ mm, u broušení na čisto pak $f_r = 0,001$ až $0,005$ mm. Dále je možné využít šikmý posuv brousícího kotouče v případě, kdy dochází k současnému broušení více ploch. [8]

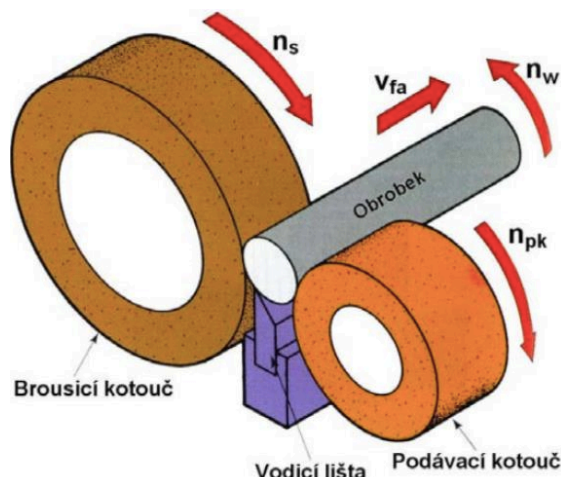
U radiálního broušení se dosahuje o 40–80 % vyššího výkonu než u broušení axiálního. Obrobek se při axiálním, hloubkovém a radiálním broušení upíná mezi hroty, na kuželový nebo válcový trn, popřípadě do sklíčidla. V případě obrobku o malém průměru se využívají seříznuté hroty. [8]

Bezhruté broušení

Tato metoda broušení je vysoce produktivní a své využití má v hromadné a velkosériové výrobě. Bezhruté broušení se dále rozděluje na bezhruté průběžné a bezhruté zápichové broušení. [2]

Při bezhrutém průběžném broušení je obrobek umístěn mezi dva kotouče, brousící a podávací (obr. 3). Obvodová rychlost podávacího kotouče udává při obrábění rychlost otáčení obrobku. Při natočení podávacího kotouče dochází k rozložení jeho obvodové rychlosti do dvou složek, vodorovné a svislé. Vodorovná složka obvodové rychlosti obrobku uděluje potřebný axiální pohyb posuvový, svislá složka pak obrobku uděluje potřebnou obvodovou rychlost. Tato metoda má použití zejména pro broušení hladkých válcových součástí. [2]

Obrobek je při bezhrutém zápichovém broušení umístěn axiálně shora k dorazu mezi brousící a podávací kotouč, přičemž osy těchto kotoučů jsou rovnoběžné. Tato metoda obrábění má své použití u součástí, které mají nákrůžek, tvarové nebo kuželové plochy, a které nemají středící důlky. [2]



Obr. 3 Bezhruté průběžné broušení (n_s – frekvence otáčení brousicího kotouče, n_w – frekvence otáčení obrobku, n_{pk} – frekvence otáčení podávacího kotouče, v_{fa} – axiální rychlost posuvu stolu) [9].

2.1.2 Obvodové broušení vnitřních ploch do kulata

Axiální broušení

Metoda vnitřního axiálního broušení se zpravidla používá v případě, kdy délka obrobku l_w je větší než šířka brousicího kotouče b_s . Při obrábění se obrobek otáčí obvodovou rychlostí v_w kolem své osy proti směru pohybu brousicího kotouče, který se uvnitř obráběné díry otáčí řeznou rychlostí v_c a posouvá se ve směru osy. [10]

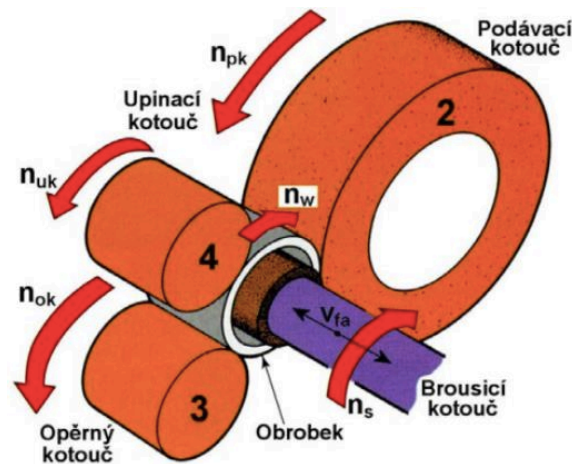
Používá se převážně pro obrábění děr za podmínky, kdy velikost brousicího kotouče může dosáhnout maximálně 0,7–0,9 násobku průměru broušené díry. V případě broušení malých děr se proto musí použít brousicí kotouče velmi malých průměrů. U takových brousicích kotoučů dochází k jejich rychlému opotřebení, brousicí zrna jsou vysoce namáhána, kotouče se zanáší a dochází ke ztrátě řezné schopnosti a geometrického tvaru. [10]

Planetové broušení

Planetové broušení se používá pro obrábění otvorů u obrobků velkých rozměrů a velké hmotnosti, u kterých není možné jejich upnutí na brusce na díry do sklíčidla nebo čelistí. Obrábí se na tzv. planetových bruskách. Obrobek nekoná pohyb, všechny pohyby koná nástroj. Otáčí se kolem své vlastní osy, ve směru broušeného otvoru koná pohyb posuvový a současně obíhá kolem osy obrobku. Při planetovém broušení se dosahuje menších přesností z důvodu nízké tuhosti vřetena. [8; 9]

Bezhruté broušení

Základní pohyby brousicího kotouče a obrobku jsou při bezhrutém broušení stejné jako při broušení axiálním, rozdíl mezi těmito dvěma metodami je v upínání součásti. Součást se při bezhrutém broušení vloží mezi tři kotouče: podávací, opěrný a upínací (obr. 4). Podávací kotouč zajišťuje, aby se součást otáčela, opěrný kotouč slouží k určení polohy součásti a upínací kotouč upíná během broušení součást tím, že ji přitlačuje ke kotouči podávacímu a opěrnému. Tuto metodu broušení lze použít pouze v případě, kdy je u součásti souosost válcového vnějšího povrchu s broušeným vnitřním povrchem. [8]



Obr. 4 Bezhruté obvodové broušení vnitřních ploch do kulata (n_s – frekvence otáčení brousícího kotouče, n_w – frekvence otáčení obrobku, n_{pk} – frekvence otáčení podávacího kotouče, n_{uk} – frekvence otáčení upínacího kotouče, n_{ok} – frekvence otáčení opěrného kotouče, v_{fa} – axiální rychlost posuvu stolu) [9].

2.1.3 Tvarové broušení

Tato metoda slouží pro broušení součástí, jejichž tvar povrchu je často složitý a komplikovaný. Mezi součásti obráběné tvarovým broušením patří např. kotoučové nože, různé tvarové kalibry nebo šablony. [2]

Používají se v podstatě dva způsoby, kterými se takové tvary brousí [2]:

- profilovými kotouči,
- kotouči obvyklého tvaru, kde se využívá šablona, prostřednictvím které koná brousící kotouč nebo součást kopírovací pohyb, další možností je tvar definovat číslicově v programových blocích a následná realizace za pomoci číslicového řízení (CNC brusky).

Při metodě tvarového broušení se používají hrotové brusky, rovinné brusky s vodorovným vřetenem, bezhruté brusky, jednoduché nebo speciálně upravené (kopírovací) hrotové brusky, speciální brusky a brusky číslicově řízené. [2]

2.1.4 Rovinné broušení

Metoda rovinného broušení slouží zpravidla jako operace na čisto, po níž následuje hoblování nebo frézování. Často také nahrazuje frézování při obrábění materiálů s vysokou tvrdostí nebo tvrdou kůrou. Broušení rovinné plochy probíhá celým obvodem nebo čelem brousícího kotouče. [8]

Obvodové broušení

Při obvodovém broušení se brousí poměrně úzkým kotoučem a deformace obrobku způsobená teplem vzniklým při broušení je nepatrná. Obrobek koná pohyb přímočarý nebo otáčivý. Brousící kotouče se nezanáší a vlivem odstředivé síly a tlaku brousící nebo řezné kapaliny jsou čištěny od třísek. Jedná se o nejpřesnější metodu, kterou lze brousit rovinné plochy. Nejčastější využití má při broušení přesných rovinných ploch, popřípadě lze brousit i plochy tvarové. Dále se touto metodou vyrábí měřidla, nástroje, přípravky atd. [8; 12]

Čelní broušení

Čelním broušením se nedosahuje takových přesností jako broušením obvodovým, avšak tato metoda je mnohem výkonnější. Brousí se čelem kotouče a používá se pro broušení ploch větší

šířky, kdy je obvykle průměr broušícího kotouče větší než šířka obráběné plochy. Obrobek vykonává pohyb přímočarý nebo otáčivý, stejně tak jako při obvodovém broušení. V sériové a hromadné výrobě se často využívá broušení při přímočarém pohybu stolu, kde se brousí hlavně malé součásti, např. pístní kroužky, čelní plochy ozubených kol atd. [10]

2.2 Přehled materiálů k broušení

Brusivo je řezným materiálem broušících nástrojů, zrna brusiva jsou spojena pojivem. Brusiva jsou ostrohranná zrna různých velikostí, vyznačují se velkou tvrdostí a houževnatostí. Ostré hrany jednotlivých zrn vystupují nad povrch broušícího nástroje, čímž vznikají břity. Tyto břity mají různou geometrii, úhel řezu bývá zpravidla větší než 90°. [5; 21]

Na základě tvaru se brusiva rozdělují na [5]:

- volná zrna: broušící, lapovací a lešticí prášky,
- zrna rozptýlená v mazadlech: broušící pasty,
- zrna přilepená k podkladu: lešticí plátna, broušící papíry,
- broušící nástroje a pomůcky, u kterých jsou brusná zrna sjednocena a spojena různými druhy pojiv.

Podle původu se broušící materiály rozdělují na **přírodní** a **umělé (syntetické)**. Volba broušícího materiálu závisí na vlastnostech obráběného materiálu. [5; 21]

2.2.1 Přírodní broušící materiály

Přírodní brusiva charakteristické svou zrnitou nebo porézní strukturou mají v přírodě velké zastoupení. Jedná se o horniny a nerosty, patří sem: pískovec, břidlice, pemza, granát, chalcedon, křemen, přírodní korund, smírek a diamant. Při výrobě se některé z nich používají celé, jiné se zase zpracovávají (např. ve formě prášku). Z velké části jsou tyto materiály použity pro výrobu broušících plátů. Zpravidla se přírodní brusiva používají v případě, kdy za pomoci umělého brusiva není možné dosáhnout stejných výsledků, popřípadě pokud je levnější než umělé. [5; 21; 22; 23] V následujícím textu je charakteristika vybraných přírodních brusiv.

Přírodní korund

Jedná se o minerál, který je tvořen převážně krystalickým oxidem hlinitým (oxid hlinitý – dále jen Al_2O_3), má šedobílou až nazelenalou barvu. Má velkou tvrdost, hodnota tvrdosti na Mohsově stupnici je 9 – 9,5. V přírodě se vyskytuje několik jeho druhů. Jeho cena je vysoká, protože je obtížné ho získat. Používá se pro broušení oceli, temperované litiny, tvrdého bronz, oceli na odlitky, často se také používá pro broušení dřeva. [22; 24]

Smírek

Je to jeden z nejstarších broušících materiálů. Podobně jako korund je tvořen krystalickým Al_2O_3 , ale zde jeho obsah není větší než 60 %. Není chemicky čistý, kvůli příměsím jsou omezeny jeho broušící vlastnosti. V dnešní době má stále využití, je vhodný pro výrobu broušících plátů a papírů, zejména na kovy. [22; 24]

Pískovec

Pískovec je hornina tvořená z velké části křemennými zrny, která jsou spojena přírodními cementy: křemičitý, jílovitý, vápenitý. Ze všech broušících materiálů je pískovec nejstarší. K jeho výhodám patří schopnost samoostření a tzv. studený výbrus. Během broušení se jako chlazení používá voda, bývá označován jako „vodní broušící kámen“. [22]

Břidlice

Jedná se o usazenou horninu, složení a velikost břidlice má více variant. Pro broušení se používá pouze homogenní břidlice, která obsahuje velké množství oxidu křemičitého (dále jen SiO_2). Její využití je při výrobě jemných dokončovacích obtahovacích kamenů. Pro chlazení se používá řidší olej, popřípadě olej s petrolejem. Dále existuje i tzv. „vodní břidlice“. [22]

Chalcedon

Chalcedon je hornina, která je tvořena až z 99,5 % SiO_2 , je vhodná pro výrobu brousků. Existuje několik druhů chalcedonu. Druh ARKANSAS patří mezi nejkvalitnější, nejčastěji se vyskytuje v bílé barvě a je charakteristický velkou tvrdostí a jemností. Dalším je např. druh MISSISSIPPI, který je v porovnání s ARKANSASEM méně kvalitní, je měkčí a hrubší. Patří sem také pazourek, což je chalcedon s jemnozrnným křemenem. Pazourek byl používán už v době pravěku a i v dnešní době má své využití. Používá se převážně pro výrobu brousicích plátů a papírů pro broušení dřeva. [22]

Granát

V čisté formě se jedná o polodrahokam. Má větší tvrdost a houževnatost než pazourek. Granát je nejpoužívanějším přírodním brusivem. [24]

2.2.2 Umělé brousicí materiály

Umělé (syntetické) brousicí materiály mají výrazně větší použití oproti přírodním brousicím materiálům, slouží pro výrobu brousicích nástrojů. Patří sem umělý korund, monokorund, karbid křemíku, karbid boru, kubický nitrid boru, syntetický diamant, oxid hlinitý a oxid ceritý. [5; 21]

Umělý korund

Mezi brusivy je umělý korund nejrozšířenější. Jedná se o tavený Al_2O_3 , jeho výroba probíhá v elektrické obloukové peci. Obsah Al_2O_3 může být různý, podle toho se také odvíjí zbarvení korundu. Běžný umělý korund obsahuje 85–98 % Al_2O_3 , podle čistoty surovin je zbarven do hněda až do černa. Bílou barvu má umělý korund, který je vyrobený z čistého Al_2O_3 . Přidáním přísady oxidu chromu k tomuto umělému korundu vznikne tzv. korund rubínový, který má růžovou barvu. I přes jeho velkou tvrdost dochází rychle k jeho otupení. Je vhodný pro obrábění materiálů, které dávají dlouho jiskru, pro obrábění velkých ploch, profilů a pro broušení nástrojů. Používá se pro broušení ocelí, temperované litiny, tvrdého bronzu a ocelí na odlitky. [5; 21; 25]

Karbid křemíku (SiC)

Karbid křemíku, známý také pod názvem karborundum, se vyrábí redukcí SiO_2 velmi čistým koksem. V porovnání s korundem má karbid křemíku větší tvrdost, houževnatost a odolnost. Po diamantu patří k nejtvrdějšímu a nejostřejšímu materiálu, ale jeho zrna jsou poměrně křehká. Je světle zelené barvy, v přítomnosti méně čistých surovin je tmavě zelený. Je vhodný pro broušení šedé litiny, mosazi, mědi, nitridované oceli, měkkých bronzů, lehkých kovů, keramické hmoty, skla, kamene a slinutých karbidů. [5; 26; 27]

Karbid boru (B_4C)

Výchozími surovinami pro výrobu karbidu boru jsou kyselina boritá a velmi čistý koks. Produktem jsou pak malé, kovově lesklé krystalky, které mají vysokou tvrdost. Karbid boru patří k nejtvrdějším umělým materiálům, Mohsova stupnice tvrdosti udává hodnotu 9,36. Při styku s kyselinami a zásadami je neutrální. Jeho výroba je značně nákladná, často se používá jako náhrada za diamantové brusivo. Své využití má v jaderném a zbrojním průmyslu. Je vhodný pro broušení slinutých karbidů, leštění diamantů a karbidu wolframu. [27; 28]

Monokorund

Monokorund se vyrábí redukcí bauxitu, obsah Al_2O_3 u něj představuje více než 99 %. Tvoří ho jednotlivé krystaly, které jsou omezeny přirozenými krystalovými plochami. Tvar zrn je pravidelný a zrna jsou stejnorodá. Zrna nejsou doprovázena vnitřním pnutím, na povrchu tak nejsou trhliny. Výjimečná je u něj jeho samobrousící schopnost. Je vysoce tvrdý a mechanicky odolný. Vhodný je pro broušení nástrojů, vysokolegované rychlořezné oceli a složených profilů. [5; 29]

Dalšími materiály jsou kubický nitrid boru a diamant, tyto materiály jsou popsány v následující podkapitole. V tab. 2 je uvedeno označení vybraných brusiv.

Tab. 2 Označení vybraných brusiv [5].

Materiál brusiva	Barva	Označení dle ČSN
Přírodní		
Granát		G
Smirek		S
Pazourek		P
Umělá		
Al_2O_3	Bílý	99A
	Růžový	98A
	Hnědý	96A
	Černý	85A
SiC	Zelený	49C
	Černý	48C
B_4C		B
Kubický nitrid boru		BN
Diamant (přírodní i umělý)		D

2.3 Supertvrde řezné materiály

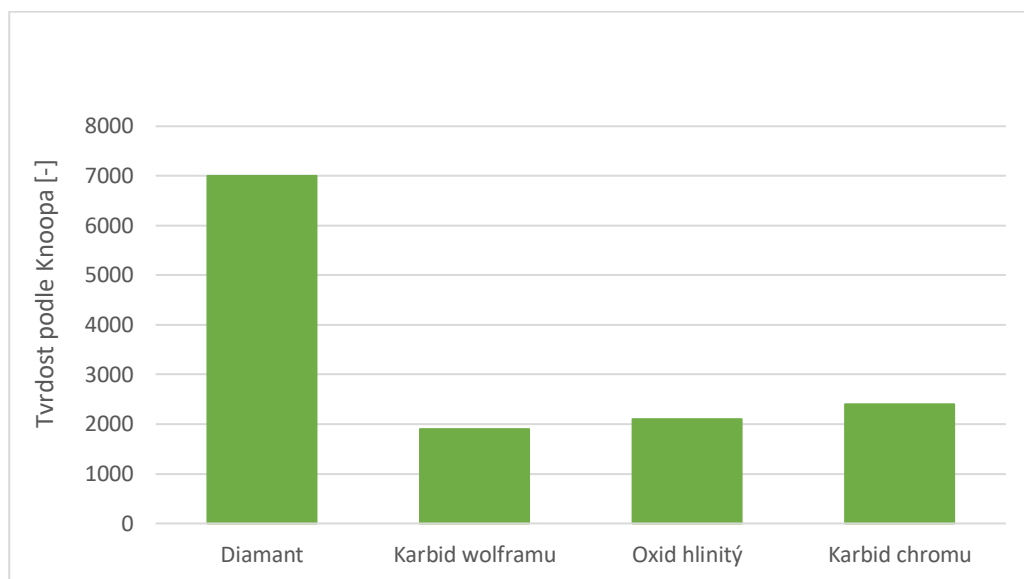
Vlastnosti supertvrdých materiálů – diamantu a kubického nitridu boru, především vysoká tvrdost a tepelná odolnost, umožňují výrobu brousících nástrojů (zejména brousících kotoučů), které se vyznačují: vysokou odolností proti opotřebení, jemnou strukturou a stálostí tvaru a řezných vlastností. [19]

2.3.1 Diamant

Diamant představuje čistou formu uhlíku, která krystalizuje v kubické soustavě. Je nejtvrdším minerálem. K významnému vývoji došlo v 50. letech minulého století, kdy byla vyrobena umělá (syntetická) verze diamantu. Diamanty se používají ve šperkařství, využívají se pro výrobu řezných nástrojů, brousících past, prášků, elektronických součástek apod. Fyzikální vlastnosti syntetického diamantu jsou v mnoha případech lepší v porovnání s jeho přírodní verzí. [30]

V porovnání s ostatními materiály má diamant největší tvrdost (obr. 5), jeho tvrdost je dle Mohse 10. Vyskytuje se téměř ve všech barvách, nejčastější je bílá varianta. Má vysoký index

lomu světla, vysokou měrnou hmotnost a jeho tepelná vodivost je nejvyšší ze všech látek. Tepelná roztažnost je u něj velice malá, je chemicky inertní vůči většině kyselin a zásad. [31]



Obr. 5 Porovnání tvrdosti vybraných materiálů podle Knoopovi stupnice tvrdosti [19].

Při obrábění je potřeba zohlednit jeho tepelnou stálost, ta je zhruba do 800 °C. Kvůli afinitě k železu při vysokých teplotách není vhodné diamant používat pro broušení ocelí. Vysoké teploty v místě řezu jsou doprovázeny chemickou reakcí, při které se mění struktura diamantu spolu s broušeným povrchem. Kromě brousicích kotoučů se diamant také používá ve formě brousicích těles nebo jemných prášků k honování, leštění a lapování. [19]

Pro syntetizaci diamantů se používají především dvě metody. Metoda HPHT (High Pressure High Temperature) (obr. 6) dokáže snadno nasimulovat přirozené prostředí, ve kterém diamanty vznikají. Tato metoda probíhá za působení tlaku okolo 55 000 atm a při teplotě okolo 1500 °C za pomoci katalyzátorů. Tím jsou vytvořeny vhodné podmínky pro přeměnu hexagonální mřížky grafitu na kubickou mřížku. Další metodou syntetizace je metoda CVD (Chemical Vapour Deposition). [32]



Obr. 6 HPHT lis pro výrobu syntetických diamantů [32].

2.3.2 Kubický nitrid boru

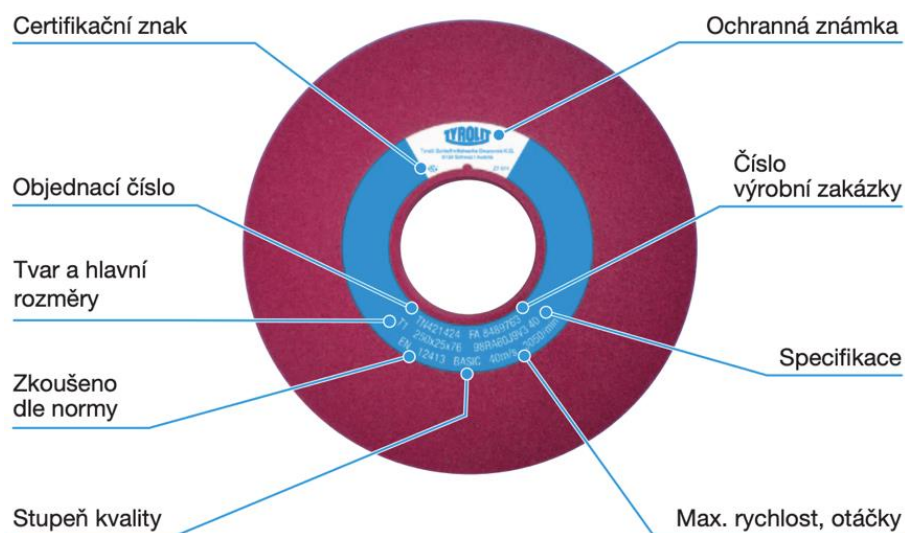
Kubický nitrid boru (KNB) je poměrně novým brousicím materiálem, nevyskytuje se v přírodě. Jeho výroba se provádí syntézou z hexagonálního nitridu boru za působení vysokých tlaků a teplot. [30; 33]

Má nižší tvrdost než diamant (dle Mohse 9). S diamantem mají mnoho společných vlastností. Hlavním rozdílem je především tepelná odolnost, ta je u kubického nitridu boru přibližně do 1200 °C, dále má mnohem vyšší chemickou stálost. Proto se používá především pro obrábění kalených ocelí, jejichž tvrdost je vyšší než 58 HRC. V případě, kdy obráběný materiál nedosahuje této tvrdosti, brousicí vrstva kotouče je zanášena a dochází ke ztrátě brousicích vlastností. [33]

Pro výrobu brousicích kotoučů se používají dva druhy pojiv: keramické a pryskyřičné. Kotouče s pryskyřičným pojivem se používají zejména k dokončovacímu broušení kalených ocelí, které může probíhat s chlazením nebo bez chlazení. Kotouče s keramickým pojivem jsou vhodné pro polohrubovací a dokončovací broušení kalených ocelí, pro chlazení se používají vodní roztoky rozpustných olejů. Povrchy dokončené kotouči z kubického nitridu boru mají vesměs lepší vlastnosti, než kdyby bylo použito jiné brusivo. Proto je kubický nitrid boru vhodný pro výrobu ložisek, nástrojů, v leteckém a automobilovém průmyslu apod. [19; 33]

2.4 Brousicí nástroje

Mezi brousicí nástroje patří brousicí kotouče, kameny, pásy a segmenty. Tyto nástroje obsahují zrna brusiva, u nichž je důležitá vhodná volba pojiva. Zrna brusiva mohou být volná nebo vázaná. V případě volných zrn brusiva jsou to brousicí a lešticí pasty a prášky. Vázaná zrna brusiva jsou buď nanesená a zakotvená na brousicích páslech a brousicích a lešticích papírech a plátnech, nebo v tuhých a pružných tělesech (brousicí pilníky, brousicí segmenty, superfinašovací a honovací kameny, brousicí kotouče, brousicí tělíska aj.). Standardní značení brousicích nástrojů je uvedeno na obr. 7. Pro operaci broušení se nejčastěji používají brousicí kotouče. [7]



Obr. 7 Standardní značení brousicích nástrojů [15].

2.4.1 Standardní brousicí kotouče

Mezi technologicky nejrozšířenější materiály, které se používají pro výrobu standardních brousicích kotoučů, patří oxid hlinitý (umělý korund, elektrit) a karbid křemíku (karbidsilicium, karborundum). [14]

Brousicí kotouče jsou specifikovány kvalitou [36]:

Rozměr A	Druh zrna B	Zrnitost C	Tvrdost D	Struktura E	Druh pojiva F	Pracovní rychlost
-------------	----------------	---------------	--------------	----------------	------------------	----------------------

Příklad označení brousicího kotouče [36]:

125 × 10 × 20 99BA 60 L 9 V C35

A – rozměr: vnější průměr × šířka × průměr otvoru, v tab. 3 jsou k rozměrům uvedeny i tvary vybraných brousicích kotoučů,

B – druh základního brousicího materiálu,

C – zrnitost: značí se od čísla 14 (velmi hrubý) do čísla 600 (velmi jemný),

D – tvrdost: písmena dle abecedy G (velmi měkký) – S (velmi tvrdý),

E – struktura: značí se čísla, obvykle 0–14,

F – druh pojiva: V – keramické, B – umělá pryskyřice, R – pryž, M – magnezit.

Druh brousicího materiálu se volí podle vlastností obráběného materiálu. Oxid hlinitý se používá pro broušení ocelí, ocelí na odlitky, tvrdých bronzů a temperovaných litin. Karbid křemíku slouží pro broušení mosazi, skla, keramiky, šedé litiny, lehkých kovů a jejich slitin, slinutých karbidů a mědi. [14]

Zrnitost brusiva se volí na základě požadované drsnosti povrchu obráběné součásti. Pro použití obecně platí, že při jemnějším zrně dochází k menšímu zahřívání obrobku a je dosaženo lepších kvalit povrchu. Hrubší zrno se používá pro úběr většího množství materiálu, kvalita povrchu dosahuje nižších hodnot, je vhodné pro broušení mosazi, hliníku a mědi. [14; 17]

Tvrdost kotouče vyjadřuje odpor, který při broušení klade pojivo proti uvolňování jednotlivých zrn brusiva z nástroje. Na základě způsobu broušení a druhu brousicího materiálu se zvolí požadovaná tvrdost. Pro použití platí: čím je hodnota tvrdosti broušeného materiálu větší a čím je větší broušená plocha společně se styčnou plochou brousicího kotouče, tím měkkší se volí brousicí kotouč. [14; 18]

Pod pojmem **struktura** (sloh) se rozumí vzdálenost mezi jednotlivými brousicími zrny, popřípadě struktura také vyjadřuje hutnost brousicího nástroje. S rostoucím číslem roste vzdálenost mezi zrny. Obecně platí, že s rostoucí tvrdostí broušeného materiálu jsou póry v kotouči menší, protože se méně zanášejí. V případě nižší tvrdosti broušeného materiálu je tomu přesně naopak. [14; 17]

Pojivo je látka, která spojuje jednotlivá zrna brusiva. Na základě pojiva se pak odvíjí tvar brousicího nástroje, jeho rozměr a mechanická pevnost. Velký význam má také při samoostření brousicího nástroje, kdy jeho vlivem dochází při broušení k uvolňování opotřebovaných a otupených zrn. Nepřispívá k brousicím účinkům. Pojivo dále musí splňovat řadu podmínek, např. odolávat vlivům řezných kapalin, teploty a další. [5]

Tab. 3 Označování tvarů a rozměrů vybraných brousících kotoučů [8].

Typ	Vyobrazení	Název, základní rozměry
1		Kotouče ploché $D \times T \times H$ (Carborundum, FAG)
2		Kotouče prstencové $D \times T \times W$
3		Kotouče kuželové $D/J \times T/U \times H$
4		Kotouče oboustranně kuželové $D/J \times T/U \times H$
5		Kotouče hrncovité $D \times T \times H - W, E$

2.4.2 Brousící kotouče ze supertvrdých řezných materiálů

Brousící kotouče vyrobené z diamantu (obr. 8) a kubického nitridu bóru jsou zárukou pro dosažení vysoké přesnosti a jakosti obrobenej plochy. Těmito kotouči je možné obrábět velmi tvrdé materiály, které by za použití klasických brusiv byly těžko obrobitelné. Další výhodou je vysoký výkon při broušení, vysoká životnost a stálost tvaru kotouče. [19]



Obr. 8 Diamantový brousící kotouč SBC pro DG 26 [20].

Diamant se používá pro broušení slinutých karbidů, oxidických keramických materiálů, žáruvzdorných materiálů, polykrystalických řezných materiálů, skla, porcelánu apod. Kotouče vyrobené z kubického nitridu bóru slouží pro broušení rychlořezných ocelí, cementovaných ocelí, tvrzených litin, kuličkových ocelí, kalených ocelí apod. Mezi nejdůležitější charakteristiky těchto brousících kotoučů patří druh brusiva, zrnitost brusiva a koncentrace brusiva, druh pojiva, tvar kotouče a jeho rozměry. [19]

2.5 Brousící stroje – brusky

Brusky se na základě jejich účelu rozdělují na brusky nástrojové a výrobní (produkční). Nástrojové brusky se používají pro broušení nástrojů k jejich ostření. Výrobní brusky slouží pro broušení strojních součástí. [5]

Hrotové brusky

Hrotová bruska (obr. 9) slouží pro broušení rotačních ploch. Podle pohybu brousícího kotouče vzhledem k ose obrobku může být broušení axiální (pohyb podél osy obrobku) nebo zapichovací (kolmo k této ose). Pro broušení vnějších a vnitřních ploch se používá rovný brousící kotouč, obrábění je definované třemi pohyby (jeden hlavní a dva vedlejší). [5]

Hlavní pohyb je rotační a je vykonáván brousícím kotoučem, vedlejší rotační pohyb je vykonáván obrobkem, přičemž směr otáčení obrobku a brousícího kotouče je stejný. Dalším vedlejším pohybem je pohyb posuvný, který vykonává nástroj nebo obrobek. [5]



Obr. 9 Hrotová bruska GU42x60S [13].

Bezhraté brusky

Na bezhraté brusce se brousí rotační plochy, zejména válcové nebo kuželové. Může se brousit buď průběžným, nebo zapichovacím způsobem (viz 2.1.1). Brusný vřeteník spolu s brousícím kotoučem tvoří hlavní část bezhraté brusky, s ložem pak tvoří pevný celek. Na suportu je uložen podávací vřeteník, ten se za pomoci mechanismu přisunuje k brusnému vřeteníku a tím dochází k nastavení vzdálenosti kotoučů na daný průměr obrobku. Vřeteníky mají své vlastní elektromotory. [5]

Bezhraté broušení je výhodné díky velkému výkonu a velkým přesnostem, kterých se dosahuje při broušení rotačních součástí. Mezi ně patří například kroužky valivých ložisek, válečků aj.

Bezhraté brusky se využívají zejména v automobilovém průmyslu a při výrobě valivých ložisek. [5]

Brusky na díry

Bruska na díry (obr. 10) je stroj, kterým se brousí vnitřní rotační a čelní plochy. Brousící kotouč a obrobek se vůči sobě otáčejí opačným směrem. Pro každý různý průměr díry je zapotřebí použít vřeteno specifické velikosti, vřetena na brusce jsou vyměnitelná. Brusky na díry se používají především v sériové výrobě pro přesné broušení válcových a kuželových děr. Brusky na díry je pak dále možné rozdělit na brusky s otáčejícím se obrobkem a na brusky planetové. [5]



Obr. 10 CNC bruska na díry OIG 150 BLACK [13].

Vodorovné rovinné brusky

Vodorovné rovinné brusky se používají pro broušení rovinných a tvarových součástí, mají své uplatnění především v kusové a sériové výrobě. Lze brousit součásti z litin, ocelí a ostatních kovů. Tyto stroje poskytují velkou přesnost (až 0,001 mm) a kvalitu obrobené plochy (R_a až 0,025 μm). Brousí se celým obvodem plochého brousícího kotouče, kdy je osa vřetene vodorovná. S použitím tvarového kotouče lze na vodorovné rovinné brusce brousit složité profily (např. předfrézované tvary). Výhodou u tohoto typu stroje je i možnost broušení velmi tvrdých materiálů, jako například keramiky nebo kalené oceli. [5]

Svislé rovinné brusky

Tyto stroje se používají zejména v kusové a zámečnické výrobě, kde nejsou kladeny vysoké požadavky na přesnost obrobené plochy. Vřeteno je vzhledem ke stolu umístěno svisle a broušení probíhá čelem hrncového kotouče. Součástí svislého vřetena bývá také segmentový brousící kotouč, tento kotouč je namontovaný na hřídeli motoru a svým velkým průměrem přesahuje celou šířku stolu. U brusek menších rozměrů je stejně jako u vodorovných brusek možný podélný i příčný pohyb, u brusek větších rozměrů pak jen podélný posuv stolu. [5]

Speciální brusky

Mezi speciální brusky se řadí takové brusky, které mají speciální technologické zaměření. Jsou to brusky na ostření nástrojů, brusky na broušení ozubení, brusky pro broušení závitů, brusky na broušení vačkových hřídelí, souřadnicové brusky, brusky na broušení klikových hřídelí aj. [8]

3 DOSAHOVANÉ PARAMETRY BROUŠENÝCH PLOCH

Technologie broušení se používá převážně jako dokončovací operace, proto se požaduje, aby tomu odpovídala přesnost rozměrů a byla zajištěna spolehlivá funkce strojních součástí. Spolehlivá funkce strojních součástí závisí především na drsnosti (mikrogeometrii) broušeného povrchu a na kvalitě povrchové vrstvy, kterou charakterizuje její stav (zbytkové pnutí, struktura atd.). [7; 34]

Drsnost povrchu obrobku je u součásti důležitá hlavně během jejího počátečního opotřebení, kvalita povrchové vrstvy pak ovlivňuje opotřebení při jejím dlouhodobém provozu. Z fyzikálního hlediska je proces vytváření mikrogeometrie a kvality povrchové vrstvy velmi složitý, dochází při něm k vzájemnému chemickému a mechanickému působení všech přítomných materiálů. [34]

3.1 Struktura povrchu

Při jakékoliv technologické metodě zůstávají na povrchu nerovnosti, které také mají vliv na funkci ploch součástí. V případě obrobeného povrchu se jedná o stopy, které zanechává řezný nástroj, popř. brusivo nebo jiskrový výboj. U neobrobených ploch jsou to podle způsobu zpracování: otisky nerovností forem u odlitků, zápustek a kovadel u výkovků, průvlaků, válců atd. [35]

Při posuzování nerovností na povrchu součásti je potřeba definovat dva pojmy [35]:

- Nedokonalosti povrchu: vznikají náhodně v průběhu výroby, skladování nebo při funkci povrchu. Patří mezi ně např.: póry, trhliny, rýhy, koroze, mikrotrhliny, staženiny (lunkry) apod. Do hodnocení struktury povrchu se tyto a další nedokonalosti povrchu nezahrnují.
- Struktura povrchu: jsou to úchyly od geometrického povrchu, které se opakují nebo vznikají náhodně. Podle velikosti rozteče nerovností se struktura povrchu dělí na jednotlivé složky. První složku tvoří **drsnost povrchu**, která má nejmenší rozteč nerovností. Další složkou je **vlnitost povrchu** a poslední složka s největší roztečí nerovností je tvořena **základním profilem**.

3.1.1 Vlnitost povrchu

Kromě mikronerovností (označované jako drsnost povrchu) mají při broušení velký význam také makronerovnosti, které jsou definovány jako vlnitost povrchu. Nejčastěji vznikají vibrační soustavy Stroj – Nástroj – Obrobek – Prostředí. [5]

Při broušení na čisto má na tvoření vln největší vliv pracovní pohyb obrobku, broušícího vřeteníku, kotouče a jeho tvarová úchylka (neokrouhlost, ovalita). Do značné míry má vliv také velikost kotouče a obrobku, poměr jejich obvodových rychlostí, počet záběrů kotouče a fázový posun vln při dalších průchodech kotouče. Dojde-li ke zvětšení obvodové rychlosti broušícího kotouče v určitém intervalu, intenzita chvění technologické soustavy roste a je omezena možnost snižovat velikost vlnitosti. [34]

3.1.2 Drsnost povrchu

Dle ČSN EN ISO 4287 je drsnost povrchu definovaná jako souhrn nerovností povrchu s relativně malou vzdáleností, které nevyhnutelně vznikají při výrobě nebo jejím vlivem [5].

Základními parametry popisující profil drsnosti povrchu jsou [35]:

- Ra: parametr profilu drsnosti povrchu ve směru výšky,

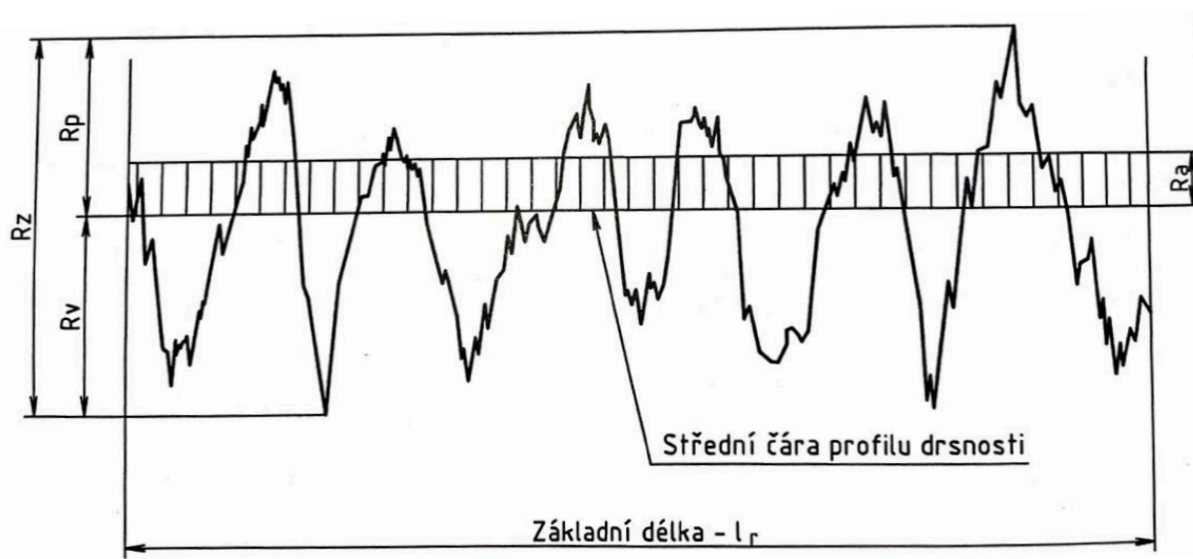
- R_z : parametr vyjadřující největší výšku profilu.

Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu R_a je vyjádřena jako aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky l_r (obr. 11) [35]. Hodnota R_a se vyjádří vztahem [35]:

$$R_a = \frac{l}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad (\mu m), \quad (3.1)$$

kde: $Z(x)$ - hodnota pořadnice, výška posuzovaného profilu v libovolné poloze x ,

l_r - základní délka, délka ve směru osy x použitá pro rozlišení nerovností charakterizující vyhodnocovaný profil (drsnost, vlnitost nebo základní profil).



Obr. 11 Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu R_a (R_z – největší výška profilu, R_p – výška nejvyššího výstupku profilu, R_v – hloubka nejnižší prohlubně profilu, l_r – základní délka) [35].

3.2 Podmínky ovlivňující drsnost broušeného povrchu

O tom, jaké drsnosti broušené plochy se dosáhne, rozhodují všechny brousící podmínky: řezné podmínky, druh a charakteristika brousícího kotouče, orovnávaní kotouče apod [34]. V následujícím textu jsou vybrané podmínky, kterými lze ovlivnit drsnost.

Velký vliv na drsnost broušené plochy má **obvodová rychlost brousícího kotouče**. V praxi se obvykle používají hodnoty obvodových rychlostí v rozsahu $10\text{--}30 \text{ m.s}^{-1}$. Při zvýšení obvodové rychlosti jsou zrna brusiva méně zatížena a mikronerovnosti broušené plochy se zmenšují. Pro příklad: při broušení kotoučem zrnitosti 16 při obvodové rychlosti 10 m.s^{-1} je hodnota drsnosti povrchu větší než při broušení kotoučem zrnitosti 40, který pracuje při obvodové rychlosti 30 m.s^{-1} . [34]

Analýza ploch, které byly broušeny při různých rychlostech, dospěla k těmto závěrům [34]:

- čím vyšší je obvodová rychlost kotouče, tím kratší jsou na povrchu stopy po broušení,
- u plochy broušené vyšší rychlostí je počet rýh na plošnou jednotku výrazně větší.

Ze závěrů lze tedy vyvodit, že zvýšením obvodové rychlosti broušicího kotouče se dosáhne lepší drsnosti broušené plochy. Toto platí nezávisle na tom, jaký je materiál obrobku. [34]

Drsnost broušené plochy je dále možné ovlivnit **výrazným zvětšením průměru broušicího kotouče** při zachování jeho obvodové rychlosti. Při takové změně dojde k prodloužení stykového oblouku kotouče a obrobku, zmenšuje se tloušťka třísky a tím se sníží drsnost povrchu obrobku. Jak již bylo řečeno, změna průměru musí být výrazná. Pokud by se průměr broušicího kotouče změnil např. z 275 na 350 mm a byly by zachovány původní podmínky, drsnost povrchu by se prakticky nezměnila. [34]

Zrnitost broušicího kotouče a počet zdvihů při broušení na čisto jsou dalšími faktory, které mají vliv na drsnost broušeného povrchu. Platí, že při použití kotouče s jemnější zrnitostí a při zachování všech původních podmínek je hodnota drsnosti obrobené plochy vždy nižší. Pro příklad: při broušení kotoučem E40 SM1 K (A 99 40KV) při posuvu $f = 0,005$ mm a obvodové rychlosti $v_c = 8 \text{ m.s}^{-1}$ se dosáhne drsnosti povrchu $R_a = 1,12 \text{ } \mu\text{m}$. Při stejných podmínkách je kotoučem E25 SM2 K (A 99 25 LV) s jemnější zrnitostí dosaženo drsnosti $R_a = 0,64 \text{ } \mu\text{m}$. Při vysokých řezných rychlostech už zrnitost nemá takový velký vliv na drsnost povrchu, protože broušící kotouč je ve styku s určitým úsekem obrobku velmi často. Vyjiskřováním se také snižuje drsnost povrchu, u broušení na čisto je doporučeno vyjiskřování po pět až osm zdvihů bez příčného posuvu. [34]

Podélný posuv při broušení také ovlivňuje průběh mikronerovností. Při každém dalším kontaktu kotouče s daným úsekem obrobku při podélném posuvu většinou zrna brusiva nezapadnou do stopy, která na povrchu zůstala při posledním průchodu kotouče. Pokud se podélný posuv zmenší, pak se kotouč častěji dostává do styku s určitým úsekem obrobku a mikronerovnosti se z povrchu snadněji odstraňují. Pro dosažení nízké drsnosti je tedy vhodné volit nízké hodnoty podélného posuvu na jednu otáčku obrobku. [34] V tab. 4 jsou uvedeny hodnoty přesnosti a drsnosti povrchu R_a dosahované různými způsoby broušení.

Tab. 4 Hodnoty přesnosti a drsnosti povrchu dosahované různými způsoby broušení [7].

Tvar broušené plochy	Způsob broušení	Přesnost rozměrů IT	Drsnost povrchu R_a (μm)
Rovinná	Hrubování	9 až 11	0,8 až 6,3
	Čelem	8 až 11	0,8 až 3,2
	Obvodem	5 až 7	0,2 až 1,6
	Načisto	5 až 7	0,2 až 1,6
	Obvodem	5 až 7	0,2 až 1,6
Vnitřní válcová	Hrubování	9 až 11	1,6 až 3,2
	Načisto	5 až 7	0,4 až 1,6
	Jemné broušení	3 až 6	0,05 až 0,4
Vnější válcová	Hrubování	9 až 11	1,6 až 3,2
	Načisto	5 až 7	0,4 až 1,6
	Jemné broušení	3 až 6	0,025 až 0,4

3.2.1 Drsnost povrchu při broušení diamantem a kubickým nitridem boru

Použití diamantu a kubického nitridu boru napomáhá značnému zlepšení kvality broušení, protože síly, teploty a tloušťky třísek jsou nižší oproti běžnému broušení. Kvalita a drsnost broušené plochy se odvíjí od mechanických, chemických a fyzikálních vlastností broušeného materiálu. [34]

Při broušení kotouči z kubického nitridu boru jsou vzniklé teploty 1,5 až 2krát nižší oproti broušení kotouči z diamantu, protože zrna kubického nitridu boru s železem chemicky nereagují. Teplotu broušení ovlivňuje především přísuv a obvodová rychlost kotouče, jejich vliv ale není tak velký jako při broušení diamantem. [34]

V tab. 5 jsou uvedeny hodnoty pro volbu diamantového brusiva a drsnosti povrchu Ra, v tab. 6 jsou dále uvedeny dosahované drsnosti povrchu Ra při broušení brusivem kubického nitridu boru při různých zrnitostech.

Tab. 5 Hodnoty pro volbu diamantového brusiva a drsnosti povrchu Ra [36].

Zrnitost diamantu	Použití	Drsnost povrchu (Ra)
200/160 60/125	Pro účinné broušení a hrubování, kde záleží více na úběru než na jakosti výbrusu	1,2
125/100 100/80	Nejčastěji používaná zrnitost pro hrubování a pro předbroušení pro následující dokončení jemnějším kotoučem	0,8
80/63 63/50	Pro jemné dokončovací broušení a ostření rezných nástrojů se slinutými karbidy	0,4
50/40 10/7	Pro dokončovací broušení a lapování	0,2 0,08
7/5 5/3	Nejpoužívanější zrnitost pro leštění volným i vázaným brusivem	0,05 0,03

Tab. 6 Drsnost povrchu při broušení brusivem KNB [36].

Zrnitost	Drsnost opracovaného povrchu Ra (μm)	
	Kotouče v keramickém pojivu	Kotouče v organickém pojivu
200/160 až 100/80	1,6 až 0,8	0,8 až 0,4
80/63 až 50/40	0,8 až 0,4	0,4 až 0,2
40/32 až 5/3	-	0,2 až 0,005

4 VYBAVENÍ MĚŘIDLY A PŘÍPRAVKY

Poté, co je součást zhotovena určitou technologií obrábění, je důležité vyhodnotit, zda se dosáhlo požadovaných rozměrů a zda bylo dosaženo předepsané hlavní složky struktury povrchu – drsnosti. Struktura povrchu se vyhodnocuje kontaktními (profilová metoda) a bezkontaktními (plošná metoda) měřicími přístroji [38]. K měření a kontrole rozměrů se používají posuvná měřidla, kalibry a další, která patří k běžnému vybavení dílenského prostředí. Měření a kontrolu součástí je možné si usnadnit přípravky, které plní funkci pomocného zařízení a díky kterým se zvyšuje jakost a produktivita výroby [37].

4.1 Měřidla pro měření a kontrolu délkových rozměrů

Pro měření délkových rozměrů součástí se používají dvě metody – metoda přímá a metoda nepřímá, označována také jako porovnávací. [3]

V případě přímého měření se používají měřidla a měřicí přístroje, ze kterých se přímo odečte naměřená číselná hodnota kontrolovaného rozměru. Tento způsob měření má uplatnění především v kusové výrobě a to kvůli své hospodárnosti, kdy se využívá celý rozsah měřidel a jedno měřidlo tak může být použito pro kontrolu více rozměrů. [3]

V případě nepřímého měření se rozměr měřidla nebo měřicího zařízení, který může být stálý nebo nastavitelný, porovnává s kontrolovaným rozměrem součásti. Nepřímým měřením se pouze zjistí, jestli součást vyhovuje nebo jestli se jedná o zmetek, popřípadě jestli odchylka leží v předepsaných mezích. Používá se hlavně v hromadné výrobě, kde se těmito měřidly kontroluje většinou jeden rozměr součásti. [3]

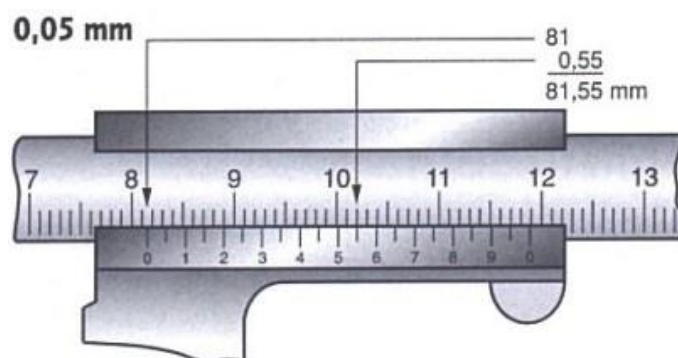
4.1.1 Přímá délková měřidla

Nejčastěji používanými měřidly v praxi pro přímé délkové měření jsou měřidla posuvná, mikrometry, dále délkové a souřadnicové měřicí stroje. [3]

Posuvná měřidla

Posuvnými měřidly jsou posuvná měřítka a hloubkoměry, které patří k základní výbavě dílenského prostředí. Rozlišitelnost posuvných měřidel závisí na způsobu jejich provedení. Rozlišitelnost měřidel vybavených noniem je běžně 0,05 mm, ve výjimečných případech 0,02 mm. U posuvných měřidel vybavených kruhovým číselníkem a posuvných měřidel digitálních je rozlišitelnost 0,01 mm. Posuvnými měřítky se měří vnější rozměry součástí a hloubky, hloubkoměry se měří hloubky děr a různá osazení. [4]

Při měření posuvným měřidlem s noniem je důležité vědět, jak naměřenou hodnotu z měřidla odečíst. Nonius je posuvná stupnice rozdělená tak, že $n-1$ dílků pevné (hlavní) stupnice se rozdělí na n dílků stupnice nonia. Nonická difference u posuvných měřidel bývá často 0,05 mm. Pro příklad: 19 mm pevné stupnice se rozdělí na 20 dílků nonia a vznikne tak nonická difference $1/20 = 0,05$, hodnota nonické difference udává rozlišitelnost měřidla. Stejně tak se postupuje i v případě rozdělení jiného počtu dílků. Na obr. 12 je znázorněn příklad odečtení hodnoty z posuvného měřítka vybaveného noniem. [4]

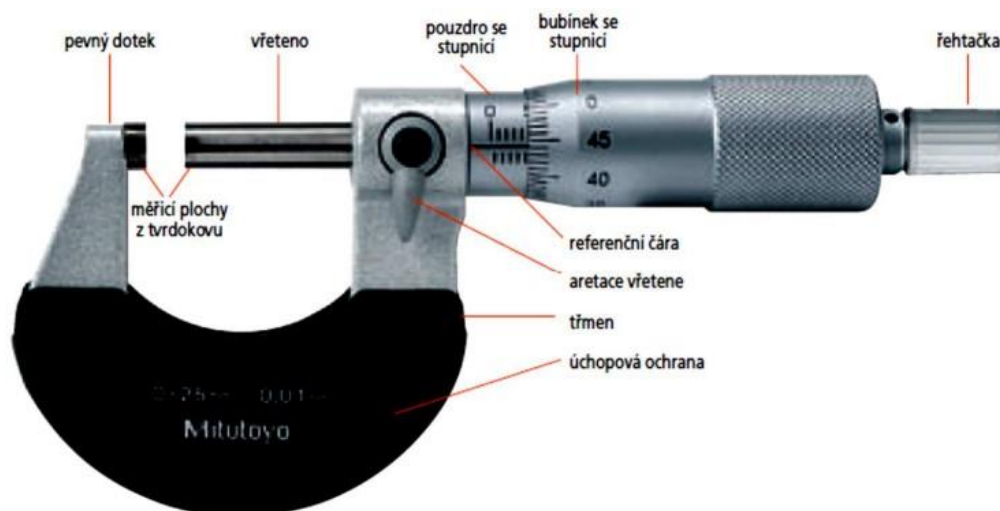


Obr. 12 Posuvné měřítko s rozlišením 0,05 mm [4].

Mikrometry

Při měření délkových rozměrů mikrometrickými měřidly se dosahuje větších přesností měření v porovnání s měřidly posuvnými. Měření se odvíjí od přesného šroubu, jehož stoupání je 0,5 mm. Na základě toho mají mikrometry různé měřicí rozsahy, které jsou stupňované po 25 mm: 0-25, 25-50, 50-75, ... mm. Na základě účelu použití se mikrometry vyrábí v různých konstrukčních provedeních. [3; 4]

Nejčastějšími jsou mikrometry třmenové, kterými se měří vnější rozměry. Při klasickém provedení (obr. 13) je jejich rozlišitelnost 0,01 mm, v digitálním provedení 0,001 mm. Pro speciální účely se vyrábí ve zvláštních provedeních: pro měření závitů, s výměnnými doteky, prizmatickými doteky apod. Dále mikrometrické odpichy, kterými se měří vnitřní rozměry větších součástí. Mikrometrickými dutinoměry se měří malé otvory a mikrometrické hloubkoměry se používají pro měření hloubek. [3; 4]



Obr. 13 Třmenový mikrometr klasického provedení [6].

Délkové měřicí stroje

Délkové měřicí stroje jsou opatřeny mikroskopy nebo digitálními ukazateli, ze kterých se odečítají měřené hodnoty. Osa měření může být podle provedení svislá nebo vodorovná. Délkovými měřicími stroji se měří rozměry vnější a vnitřní, rozměry o větších délkách, dále se používají pro kontrolu kalibrů, měřicích přípravků apod. [6]

Souřadnicové měřicí stroje

Souřadnicové měřicí stroje jsou vybaveny pracovním stolem, na kterém jsou umístěny dva stojany spojené pojezdným příčnickem. Materiálem pracovního stolu je žula, která zajišťuje pevnost a teplotní stálost. Měření probíhá tak, že se snímací hlavice, jejíž vrchol je opatřen

rubínovou kuličkou, dotkne obrobku, následně sonda vyšle signál do řídicího systému a řídicí systém vyhodnotí okamžitou polohu. Naměřená data lze uložit do počítače a provést jejich statistické zpracování, popřípadě postup měření pak může být zopakován. Souřadnicové měřicí stroje se používají zejména pro kontrolu menších sérií obrobků a obrobků složitějších tvarů. Dokáží vyhodnotit rozměry s přesností až na desetiny μm . [6]

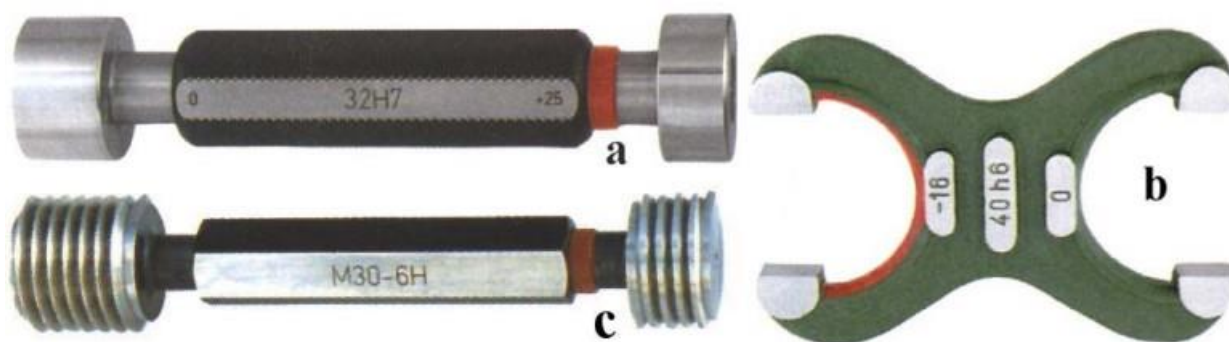
4.1.2 Nepřímá délková měřidla

Běžnými nepřímými délkovými měřidly používanými v praxi jsou kalibry, úchylkoměry a základní měrky.

Kalibry

Jedná se o pevná měřidla, kterými se kontrolují vnější a vnitřní rozměry. Kalibry mají své využití především v sériové výrobě. Při kontrole rozměrů kalibrem se nezjistí skutečná hodnota tohoto rozměru ani hodnota úchylnosti, pouze se zjistí, jestli se kontrolovaný rozměr nachází v daném tolerančním poli a je tak vyhovující. [4]

Nejrozšířenějšími jsou mezní kalibry (obr. 14), ty mají jednu stranu dobrou a druhou zmetkovitou, která bývá označena červeně. Pro příklad: při kontrole průměru válcové díry válečkovým kalibrem je průměr díry vyhovující v případě, kdy dobrá část kalibru dírou lehce projde a zmetková strana se o díru pouze zachytí. Pokud dobrá část dírou neprojde, lze tento rozměr upravit. Pokud dírou projde část zmetková, pak se jedná o zmetek a ten už nelze opravit. U dalších mezních kalibrů je postup kontroly stejný. [4]



Obr. 14 Základní druhy mezních kalibrů (a – válečkový, b – třmenový, c – na vnitřní závity) [4].

Pro kontrolu vnitřních rozměrů se používají kalibry válečkové, pro vnější rozměry kalibry třmenové. Dalšími druhy kalibrů jsou kalibry pro kontrolu vnějších a vnitřních závitů, vnějších a vnitřních kuželů apod. [4]

Úchylkoměry

Úchylkoměrem se při měření nezjistí skutečná hodnota rozměru, ale zjistí se, zda se naměřená úchylnost nachází v předepsaných mezích. Vyrábí se úchylkoměry číselníkové a digitální, číselníkové úchylkoměry mají buď mechanický, nebo pákový převod. [4]

Číselníkové úchylkoměry měří s rozlišitelností 0,01 mm, 0,002 mm nebo 0,001 mm. Pohyb měřicího doteku probíhá většinou ve svislém směru, pákové úchylkoměry jsou opatřeny otočnou dotykovou hlavou. Měření je možné si usnadnit speciálními ukazateli, kterými se na kruhovém ukazateli měřidla vyznačí požadované meze. [4]

Digitální úchylkoměry jsou elektronickými měřidly, která navíc nabízí možnost nastavit mezní hodnoty měřené veličiny, výstup naměřených hodnot k jejich dalšímu zpracování a také nastavení nuly. Vyrábí se běžně s rozlišitelností 0,001 mm a šestimístním displejem. [4]

Základní rovnoběžné měrky

Materiálem základních rovnoběžných měrek je ocel nebo keramika, bývají vyrobeny ve tvaru destiček nebo hranolu s velmi přesnými rozměry. Jejich složením je možné dosáhnout jakéhokoli rozměru. Z důvodu minimalizace úchylek se měrky skládají pokud možno z co nejmenšího počtu, maximální počet složených měrek je pět. Měrky se skládají v pořadí od nejmenší až po tu největší. Měrky mají velkou rovinnou přesnost a díky tomu drží dobře přilnavost u sebe. Při použití vhodného příslušenství je možné měrkami měřit přímo rozměry součástí. [3; 6]

Třídy přesnosti, ve kterých jsou měrky vyráběny, udává norma DIN 861 [6]:

- K: měrky používané v kalibračních laboratořích pro kalibraci,
- O: měrky používané jako přesná délková měřidla, pro kalibraci měřicích přístrojů a kalibraci koncových měrek,
- 1: pro kalibraci kalibrů, nastavování měřicích přístrojů,
- 2: k běžnému délkovému měření, kde nejsou kladeny vysoké požadavky na přesnost.

4.2 Měřicí technika pro přesné vyhodnocování struktury povrchu

S rostoucím rozvojem strojírenské výroby bylo zapotřebí určit metodu pro hodnocení struktury povrchu. Zpočátku byl zaveden subjektivní způsob, kdy se určily tři stupně nerovností, pro které byl definován pojem drsnost. Pro posuzování se používaly porovnávací povrchy. [38]

Pro objektivní hodnocení hlavní složky struktury povrchu – drsnosti povrchu, bylo klíčové zavedení parametru R_a a spolu s ním několik dalších parametrů. Metody pro hodnocení struktury povrchu lze obecně rozdělit na subjektivní a objektivní. [38]

Subjektivní hodnocení se provádí vizuální kontrolou – zrakem a hmatem. Pro posuzování se používají porovnávací vzorky (obr. 15). Tato metoda je v porovnání s objektivní metodou mnohem méně přesná, velkou roli zde hraje lidský faktor. Objektivní metoda umožňuje, podle typu měřicího zařízení, vyhodnocování ve 2D nebo 3D. [38]



Obr. 15 Detail vzorkovnice drsnosti povrchu [5].

4.2.1 Dotykové měřicí přístroje

Zdrojem informace o struktuře povrchu u dotykové metody (2D) je profil [38]. Dotykový přístroj (profilometr) je opatřen speciálně upraveným hrotem, který snímá souřadnice vyhodnocovaného povrchu, ty jsou následně zpracovány počítačem. Pro měření používá

přístroj indukční snímač. Patří k nejstarším metodám hodnocení povrchu, její první použití sahá do 20. let minulého století. [39]

Dotykový přístroj je složen ze dvou částí [39]:

- mechanická část: je opatřena stolcem, na něj se umístí měřená součást, dále je zde rameno se snímacím hrotem (snímací hlavice), rameno se konstantní rychlostí pohybuje vpřed a snímací hrot tak zaznamenává nerovnosti povrchu (elektromotorek zajišťuje přímočarý vratný pohyb),
- elektronická část: snímací hrot generuje mechanický signál, elektronická část slouží k jeho transformaci na signál elektrický, ten se pak zpracovává (číslnou hodnotou příslušného parametru drsnosti, popř. grafickým záznamem nerovnosti povrchu).

Je důležité, aby byl pohyb snímacího hrotu velmi přesný co do přímosti i rovnoměrnosti. Při volbě rychlosti je nutné brát ohled na dynamické vlastnosti snímacího systému. Data naměřená přístrojem lze prostřednictvím USB nebo COM rozhraní přenést do počítače a následně provést jejich podrobnější analýzu. Měřicí (přítlačná) síla, kterou hrot působí na měřený povrch, je velmi malá, je tak minimalizováno nebezpečí poškození povrchu. Pro kontrolu drsnosti povrchu se v dílnách často používají malé přenosné zařízení zvané drsnoměry. Drsnoměry vyhodnocují parametry drsnosti povrchu, profilometry vyhodnocují kromě drsnosti také vlnitost apod. [39]

4.2.2 Bezdotykové měřicí přístroje

V laboratořích a ve vědecké praxi se pro hodnocení struktury povrchu používá především plošná metoda – třírozměrné hodnocení struktury povrchu (3D). Tato metoda vychází již ze známých poznatků z dvourozměrného hodnocení struktury povrchu (2D), avšak pro úplný popis bylo důležité zavést několik dalších potřebných informací. U této metody je plocha hlavním zdrojem informace o struktuře povrchu. [38; 39]

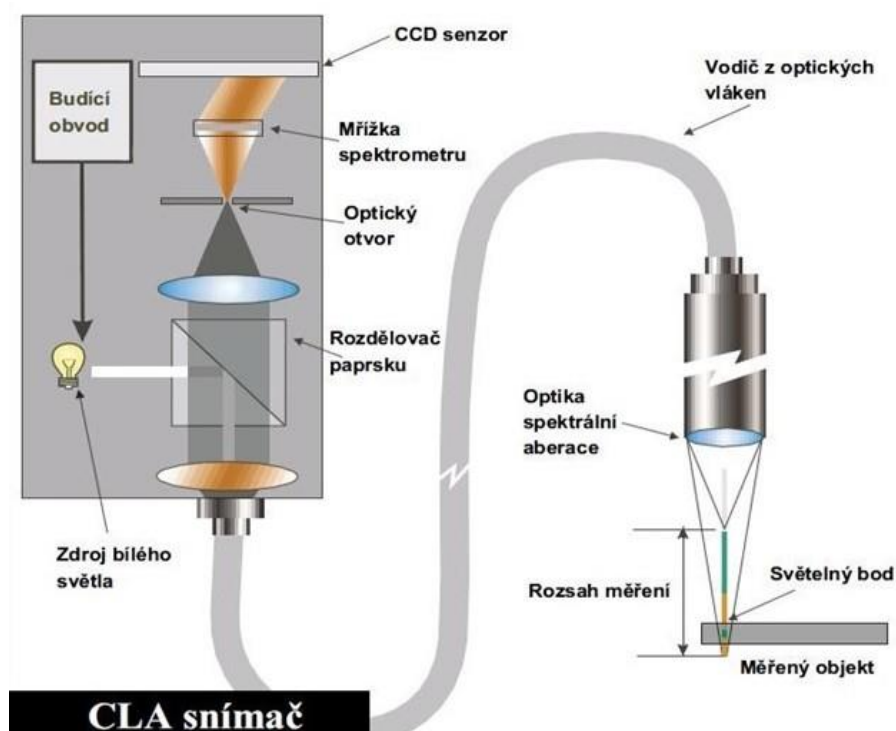
Struktura povrchu se měří přístroji, které pracují na bezkontaktním principu. Součástí těchto přístrojů jsou bezkontaktní snímače. Nejvíce se používají snímače CLA (Chromatic Length Aberration) s rozlišitelností v μm a snímače laserové, jejichž rozlišitelnost je přibližně o řád nižší. [39]

Princip CLA snímače

Bílé světlo se rozloží a přes optiku je nasměrované na kontrolovaný povrch. Optika rozloží světlo na základě vlnových délek, v každém bodě povrchu je pak zaostřena pouze určitá vlnová délka. Odražené světlo z povrchu prochází skrz otvor, kterým projde pouze světlo zaostřené vlnové délky. Následně je světlo vychýleno spektrometrem na maticový senzor, kde má každý bod připravenou prostorovou polohu. Tyto polohy jsou pak počítačem zpracovány a vyhodnoceny. Pro zpracování a přesné vyhodnocení nasnímaných prostorových poloh se používají speciální softwary, ty poskytují 3D zpracování dat a také 3D vizualizaci. Na obr. 16 je znázorněno schéma CLA snímače. [39]

Princip laserového snímače

Polovodičový laser vyšle paprsek na kontrolovaný povrch a od něj se odrazí do přijímacího optického systému. Poté je paprsek zaostřen na obrazovou matici a za pomoci jejich obrazových prvků se určí poloha zaměřeného bodu. [5]



Obr. 16 Schéma CLA snímače [5].

4.2.3 Porovnání dotkových a bezdotkových měřicích přístrojů

U těchto metod je rozdílná šířka pásma dat. Při dotkové metodě je měřený povrch při styku s hrotem "uhlazen" a dochází tak ke zmenšení šířky pásma dat pro zpracování. [40]

Dalším rozdílem mezi těmito metodami je změna ve sklonech (šikmosti) profilu povrchu. Při měření dotkovou metodou hrot na snímaném profilu zmenšuje šířku prohlubní a rozšiřuje výstupky, tím jsou ovlivněna data pro hodnocení šikmosti. Je možné to upravit softwarem. U bezdotkové metody k tomuto nedochází. [40]

Při měření bezdotkovými přístroji často dochází ke ztrátě dat v místech, kde jsou náhlé a rychlé změny tvaru profilu povrchu, dále v hraničních oblastech (na hranách). V takových místech se paprsek nemusí vždy správně odrazit zpátky do detektoru a může se stát, že se hodnoty dat nezaznamenají. Software příslušného měřicího zařízení pak tato data obvykle vyloučí, nejčastěji tak, že využije interpolace okolních dat. [40]

Dotkové přístroje mají v porovnání s bezdotkovými přístroji větší toleranci vůči znečištění. Při snímání hrot odsune malé nečistoty a také není problém, když se na měřeném povrchu vyskytuje olejová vrstva. Při bezdotkovém měření musí být povrch naprosto čistý. Ve strojírenském prostředí se často dává přednost přístrojům dotkovým. [40]

4.3 Výrobci měřidel a měřicí techniky

Mezi přední výrobce měřicí techniky patří anglická společnost Taylor Hobson Ltd. se sídlem v Leicesteru v Anglii. Taylor Hobson vyrábí vysoce kvalitní systémy a přístroje pro měření textury a tvaru povrchu, dále se aktivně soustředí na přípravu a normalizaci metodik měření, zpracování výsledků a jejich vyhodnocení ve formě parametrů. V současnosti nabízí Taylor Hobson plynulý inovovaný komplexní program Talymap, který slouží pro prostorové hodnocení textury povrchu. Program Talymap se využívá u měřicích systémů Form Talysurf PGI, Talysurf CCI, Talysurf CLI a Talyrond. [11]

Talysurf CLI

Při broušení je důležité kontrolovat jak kvalitu broušeného povrchu, tak i kvalitu povrchu brousícího nástroje, a to zejména tvar brousících zrn, jejich velikost, hustotu a rozložení. [11]

Pro efektivní kontrolu povrchu brousících nástrojů se používá metoda bezkontaktních 3D měření profilů s integrovaným vyhodnocovacím programem. Vhodným měřicím systémem pro takovou kontrolu je Talysurf CLI firmy Taylor Hobson, který pro analýzu využívá program Talymap. Povrch abrasivních výrobků je složen z velmi tvrdých částic a pro jejich kontrolu lze použít pouze bezkontaktní metody CLA a laserové sondy (viz 4.2.2), kterými je Talysurf CLA vybaven. Díky své univerzálnosti ho lze využít téměř pro všechny typy brusiv. Používá se pro kontrolu velikosti zrn, jejich struktury a rozdělení, dále pro posouzení rovnoměrnosti opotřebení. Jednotlivá zrna je možné hodnotit z hlediska určité plochy, průměru, obvodu, hustoty, tvarového faktoru a orientace. [11]

V České republice je společnost Taylor Hobson Ltd. zastoupena firmou IMECO TH, která sídlí v Brně. Dále jsou zde uvedeni významní výrobci měřidel a měřicí techniky. Německá společnost **Mahr** – jedna z nejstarších metrologických společností v Evropě, německá společnost **ZEISS**. Švýcarská společnost **DIAVITE AG** a **TESA**. Společnost **SIZE** s hlavním sídlem v Číně. Japonská společnost **Mitutoyo**, u nás zastoupena např. firmou Mitutoyo Česko s.r.o. v Teplicích. Jedním z největších dodavatelů měřidel a měřicí techniky v České republice je společnost **PRIMA BILAVČÍK**, která se nachází v Uherském Brodě.

4.4 Charakteristika přípravků a jejich rozdělení

Přípravek slouží jako pomocné zařízení, které má podle určení zajistit pevné uchycení obráběné součásti, vedení nástroje při obrábění, přidržení součásti při montáži v celek a kontrolu rozměrů obrobku. [37]

Přípravky jsou rozděleny podle [37]:

1. použití

- universální: pro upnutí součástí stejného druhu o různých velikostech, např. svěráky, sklíčidla apod.,
- stavebnicové: jsou sestavy z typizovaných dílů,
- skupinové: určeny pro skupinu součástí,
- speciální: vyrobeny a používány pouze pro jeden obrobek v dané operaci,

2. určení

- obráběcí: jejich funkcí je zabezpečit vzájemnou polohu SNO,
- kontrolní a měřicí: určeny pro kontrolu a měření rozměrů,
- montážní: slouží k jednoznačnému ustavení součásti při montáži,
- ostatní pomocná zařízení: polohovací a nakládací zařízení, vrtací hlavy apod.,

3. zdroje upínací síly

- přípravky s ručním upínáním,
- přípravky s mechanickým upínáním.

Existují tzv. nezbytné přípravky, kdy daná operace nemůže být provedena bez toho, aniž by byl použit přípravek. Použití a konstrukce přípravků se mění, záleží na druhu výroby a možnostech. Při kusové výrobě se speciální a komunální přípravky používají jenom v případě, kdy danou

operaci bez nich nelze provést. V sériové a hromadné výrobě je naopak možnost použít speciální přípravky ve větší míře, docílí se tak zvýšení produktivity práce a jakosti výroby. Přípravky, které slouží pro výrobu většího počtu stejných součástí mohou být o mnoho dokonalejší a splňovat tak požadavky dokonalé funkce. [37]

4.4.1 Kontrolní přípravky

Kontrolní přípravky se používají pro kontrolu tvaru, rovnoběžnosti, přesnosti rozměrů, roztečí, kolmosti ploch a os děr apod. Často se používají při mezioperační kontrole. Jejich cílem je usnadnit a urychlit kontrolu. [41]

Kontrolovaná součást je do přípravku upnuta za referenční body a pomocí jednoduchých referenčních ploch, posuvů, výsunů, kalibrů, spároměrek a úchylkoměrů je provedena kontrola. Dále se používají kontrolní přípravky, do kterých se součást upne a následně se provede kontrola v 3D souřadnicovém měřicím stroji (obr. 17). [42]



Obr. 17 Sada kontrolních přípravků pro kontrolu dílů na 3D souřadnicovém stroji [42].

4.4.2 Měřicí přípravky

Měřicí přípravky jsou určeny pro jednoznačnou kontrolu vyráběných součástí. Jejich použitím se dosáhne rychlé kontroly měřením, a to i bez toho, aniž by bylo potřeba zatěžovat metrologii. I v dílenských podmínkách lze měřicími přípravky snadno zjistit, zda vyráběná součást splňuje požadované tolerance a je tak vhodná pro další výrobní proces. K měřicím přípravkům jsou vždy dodány měrové protokoly. Měří se podle výkresové dokumentace. Měřicí přípravky jsou vybaveny jednotlivými měřidly, popřípadě měřidlem. [43]

Pro příklad jsou zde uvedeny měřicí přípravky české firmy UNIMETRA s.r.o., která poskytuje komplexní služby v oblasti měřidel a měření.

Jsou to měřicí přípravky pro vnější (obr. 18) a vnitřní měření zápichů. Přípravek pro vnější měření zápichů lze použít také pro měření průměrů nebo jako měřicí stůl. [44]



Obr. 18 Speciální měřicí přípravek pro vnější měření zápitchů [44].

Provedení měřicích přípravků může být také jednoúčelové, takové přípravky jsou konstruovány a vyrobeny pro měření jedné konkrétní úlohy. Jsou to měřicí přípravky pro měření kuželových vnitřních drážek, průměrů, šířky drážky, vnitřní házivosti, čelní házivosti, přípravek s otočnou pinolou pro kontrolu házivosti a soustružení apod. [44]

5 KVALIFIKACE OBSLUHY

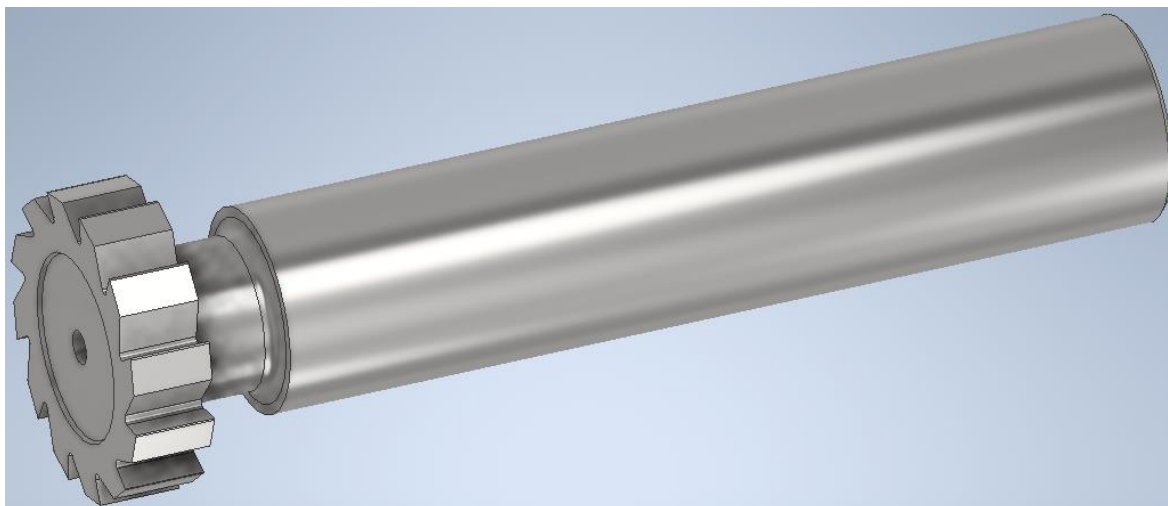
Ve strojírenské výrobě se pracovníci dílen obecně rozdělují na pracovníky kvalifikované, zaškolené a pomocné. Kvalifikovaní pracovníci složí závěrečnou zkoušku a jsou tak vyučeni ve svém oboru, zaškolení pracovníci bez vyučení jsou pro danou práci zaškolení a pomocní pracovníci vykonávají ostatní práce – výrobního i nevýrobního charakteru. [14]

Požadavky pro kvalifikaci obsluhy jsou dány kvalifikačním standardem, ten se liší v závislosti na druhu práce [16]. Požadovaná odborná způsobilost osoby v oblasti technologie broušení je následující [16]:

- dodržování bezpečnosti práce a správné používání pracovních pomůcek,
- orientace v normách a v technické dokumentaci pro provádění obráběcích operací,
- volba postupu práce a technologických podmínek broušení, potřebných nástrojů, materiálů a pomůcek,
- měření a kontrola geometrických tvarů, délkových rozměrů, vzájemné polohy prvků a jakosti povrchu,
- upínání brousicích nástrojů a obrobků, ustavování polohy obrobků na různých druzích brusek,
- vyvažování brousicích kotoučů,
- obsluha brusek,
- ostření nástrojů na nástrojových bruskách,
- ošetřování a údržba různých druhů brusek.

6 UKÁZKOVÁ ZVOLENÁ DOKONČOVACÍ OPERACE

Pro ukázkovou aplikaci metody broušení byla navržena drážkovací fréza s válcovou stopkou (obr. 19), pro něž byla sestavena výkresová dokumentace. Pozornost je věnována právě válcové stopce, která se bude obrábět broušením tak, aby bylo dosaženo předepsané drsnosti a přesnosti rozměru. Bylo zvoleno obvodové axiální broušení vnějších ploch do kulata (viz 2.1.1).



Obr. 19 Drážkovací fréza.

6.1 Materiál polotovaru

Polotovarem pro výrobu součásti je kruhová tyč válcovaná za tepla normální přesnosti o rozměrech $\varnothing$ 35–115 mm. Materiálem polotovaru je rychlořezná wolframová legovaná ocel 1.3318.

Specifickými vlastnostmi této oceli jsou především vysoká houževnatost, dobrá odolnost proti popouštění a opotřebení, dobrá tvárnost za tepla a ztížená obrobiteľnosť. Tato ocel je vhodná pro výrobu rezných nástrojů, kterými jsou např. soustružnické a hoblovací nože, záhlubníky, výstružníky, vrtáky, výhrubníky, frézy apod. Mimo jiné má také velké využití pro výrobu nástrojů pro stříhání zastudena, jako např. kruhové nože strojních nůžek. [36] Chemické složení této oceli je uvedeno v tab. 7.

Tab. 7 Chemické složení rychlořezné oceli 1.3318 [36].

Prvek	C	Cr	W	V
hm (%)	0,83	4,2	10,3	2,4

6.2 Volba broušicího stroje a broušicího kotouče

Broušení válcové stopky drážkovací frézy bude realizováno na hrotové brusce typu BUA 16 (obr. 20). U typu brusky BUA 16 bude broušicí kotouč vykonávat pohyb rotační, obrobek bude vykonávat posuvový pohyb rovnoběžný s osou obrobku a pohyb rotační. V tab. 8 jsou uvedeny základní parametry tohoto stroje. Otáčky vřetena byly zjištěny po komunikaci s prodejcem.

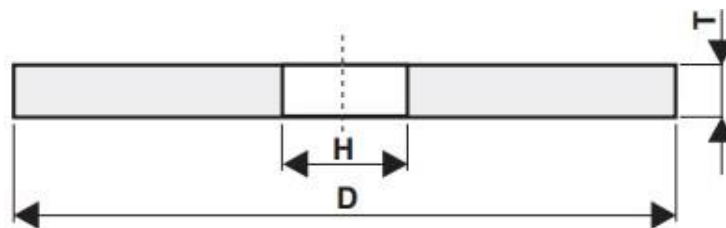
Tab. 8 Základní parametry hrotové brusky BUA 16 [45].

Oběžný průměr (mm)	160
Vzdálenost mezi hroty (mm)	250
Největší šířka brousícího kotouče (mm)	40
Největší průměr broušení (mm)	160
Rozměry stroje – výška × šířka × délka	1500 × 1100 × 1740
Kužel koníku (-)	MORSE 2
Kužel pracovního vřeteníku (-)	MORSE 3
Průměr tříčelistového sklíčidla (mm)	80 mm
Úhel natočení pracovního vřeteníku (°)	90
Úhel natočení vrchního stolu (°)	10
Úhel natočení brusného vřeteníku (°)	60
Otvor v držáku vřeten vnitřního broušení (mm)	80
Největší hmotnost obrobku broušeného v hrotech (kg)	10
Hmotnost stroje s normálním příslušenstvím (kg)	1400
Otáčky vřetená (min^{-1})	2420–3290



Obr. 20 Hrotová bruska BUA 16 [45].

Brousící kotouč byl vybrán z katalogu TYROLIT. Byl zvolen brousící kotouč **175 × 6 × 20 98A 60 K 9 V 40**, jeho tvar je zobrazen na obr. 21. Jedná se o umělý korund světle růžový s keramickým pojivem. Tento kotouč je vhodný pro broušení ocelí, jejichž tvrdost je menší než 67 HRC [15]. Upnutí kotouče na brusce bude řešeno tak, že se kotouč zasune do příruby a následně se utáhne maticí. Řeznou kapalinou při broušení bude brusný olej DiaGrind HSS, který je vhodný pro broušení nástrojových a rychlořezných ocelí [47].



Obr. 21 Tvar zvoleného broušícího kotouče [15].

6.3 Technologický postup výroby

Součást bude tepelně zpracovaná, a to žíháním ke snížení vnitřního pnutí. Tento typ tepelného zpracování se provádí u kovových dílů. Dochází při něm ke snížení zbytkového pnutí ve struktuře, čímž se minimalizuje riziko rozměrových změn při dalším zpracování nebo v průběhu doby, kdy je součást v provozu. Běžně se součásti žíhají ke snížení vnitřního pnutí po hrubování a před dokončovacím obráběním. [46]

Stručný popis, jakým způsobem bude součást vyrobena, je následující:

1. Součást se bude obrábět na klasickém soustruhu. Hlava frézy, na které budou zuby, se obrobí na požadovaný rozměr. Poté se součást otočí a osoustruží se druhá strana drážkovací frézou, jejíž součástí je válcová stopka.
2. Zuby drážkovací frézy se zhotoví na dělicí fréze.
3. Broušení válcové stopky nahrubo.
4. Žíhání ke snížení vnitřního pnutí při teplotě 750–780 °C.
5. Broušení válcové stopky načisto.

Přídavky pro obrábění:

Ø 20h6 soustružit s přídavkem pro hrubování na Ø20,27_{-0,1}, drsnost Ra = 3,2 µm.

Ø 20h6 brousit nahrubo s přídavkem pro broušení načisto na Ø20,03, drsnost Ra = 3,2 µm.

Obrobek bude při broušení upnut mezi hroty. Pro použití hrotu bude z obou stran nástroje vyvrtán středící důlek typu A.

6.4 Řezné podmínky

Řezná rychlost

Protože se bude válcová stopky drážkovací frézy brousit nejprve nahrubo a poté načisto, tak je potřeba stanovit řezné podmínky pro obě tyto varianty broušení. Prvním důležitým parametrem je obvodová rychlost broušícího kotouče, označovaná také jako řezná rychlost. V případě obrábění oceli jsou doporučené hodnoty řezných rychlostí při hrubování i broušení načisto v rozmezí 25–35 m.s⁻¹ [36]. Otáčky vřetena jsou při hrubování nastaveny na hodnotu 2850 min⁻¹, při broušení na čisto na 3200 min⁻¹. Řezná rychlost se vypočte ze vztahu [2]:

$$v_c = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{60 \cdot 1000} \quad (\text{m} \cdot \text{s}^{-1}), \quad (6.1)$$

kde: d_s - průměr broušícího kotouče (mm),

n_s - frekvence otáčení broušícího kotouče (min⁻¹).

Z označení kotouče $175 \times 6 \times 20$ 98A 60 K 9 V 40 vyplývá, že jeho průměr je 175 mm. Po dosazení do vztahu (6.1) jsou hodnoty řezných rychlostí:

$$v_{c\ hr} = \frac{\pi \cdot 175 \cdot 2850}{60 \cdot 1000} = 26,11\ m \cdot s^{-1},$$

$$v_{c\ čis} = \frac{\pi \cdot 175 \cdot 3200}{60 \cdot 1000} = 29,32\ m \cdot s^{-1}.$$

Obvodová rychlost obrobku

Doporučené hodnoty obvodových rychlostí obrobku jsou při hrubování $15\text{--}20\ m \cdot \min^{-1}$, při broušení na čisto $8\text{--}15\ m \cdot \min^{-1}$ [36]. Pro hrubování je obvodová rychlost obrobku zvolena $16\ m \cdot \min^{-1}$, pro broušení na čisto $10\ m \cdot \min^{-1}$. Při známých hodnotách obvodových rychlostí lze určit frekvence otáčení obrobku, které se pak objeví při výpočtech strojních časů. Frekvence otáčení obrobku se vypočítá ze vztahu [2]:

$$n_w = \frac{v_w \cdot 1000}{\pi \cdot d_w} \quad (\min^{-1}), \quad (6.2)$$

kde: v_w - obvodová rychlost obrobku ($m \cdot \min^{-1}$),

d_w - průměr obrobku (mm).

Na základě přídavek pro obrábění bude průměr obrobku při hrubování 20,27 mm, při broušení na čisto 20,03 mm. Po dosazení do vztahu (6.2) jsou hodnoty frekvencí otáčení obrobku:

$$n_{w\ hr} = \frac{16 \cdot 1000}{\pi \cdot 20,27} = 251,26\ \min^{-1},$$

$$n_{w\ čis} = \frac{10 \cdot 1000}{\pi \cdot 20,03} = 158,92\ \min^{-1}.$$

Axiální posuv stolu

Pro zvolenou metodu broušení je dále důležité vhodně zvolit axiální posuv stolu. Pro hrubování se hodnota axiálního posuvu stolu volí $2/3\text{--}3/4$ šířky brousícího kotouče, pro broušení na čisto je to $1/2$ šířky brousícího kotouče [36]. Šířka brousícího kotouče je dle jeho označení 6 mm. Pro hrubování je zvolena hodnota axiálního posuvu stolu 4,2 mm, při broušení na čisto 3 mm.

Radiální posuv stolu

Radiální posuv stolu je při obvodovém axiálním broušení do kulata roven hodnotě pracovního (radiálního) záběru (viz 2.1.1). Pracovní záběr se volí v rozmezí 0,001 – 0,008 mm [2]. Pro hrubování je pracovní záběr 0,006 mm, pro broušení na čisto 0,002 mm.

6.5 Výpočet parametrů brousícího procesu

Ekvivalentní tloušťka broušení

Ekvivalentní tloušťka broušení je vztažena na jednotku aktivní šířky brousícího kotouče [2]. Pro případ obvodového axiálního broušení do kulata je tato tloušťka vyjádřena vztahem [2]:

$$h_{eq} = \frac{v_w}{60 \cdot v_c} \cdot f_a \quad (mm), \quad (6.3)$$

kde: v_w - obvodová rychlost obrobku ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$),
 v_c - řezná rychlost ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$),
 f_a - axiální posuv stolu na otáčku obrobku (mm).

Po dosazení známých hodnot do rovnice (6.3) jsou hodnoty ekvivalentní tloušťky broušení:

$$h_{eq\ hr} = \frac{16}{60 \cdot 26,11} \cdot 4,2 = 0,04\ \text{mm},$$

$$h_{eq\ \check{c}is} = \frac{10}{60 \cdot 29,32} \cdot 3 = 0,02\ \text{mm}.$$

Hodnotu ekvivalentní tloušťky broušení je možné dále použít pro výpočet průřezu třísky A, která má pro obvodové axiální broušení do kulata tvar [8]:

$$A = f_a \cdot h_{eq}\ (\text{mm}^2), \quad (6.4)$$

kde: f_a - axiální posuv stolu na otáčku obrobku (mm).

Dosazením do rovnice (6.4) jsou hodnoty průřezu odebírané vrstvy:

$$A_{hr} = 4,2 \cdot 0,04 = 0,18\ \text{mm}^2,$$

$$A_{\check{c}is} = 3 \cdot 0,02 = 0,06\ \text{mm}^2.$$

Řezná síla

Velikost řezných sil je v průběhu obrábění proměnná a je poměrně obtížné určit její hodnotu. Závisí především na podmínkách, kterými jsou: zvolená metoda broušení, průřez třísky, zrnitost brusiva, struktura brousícího kotouče, druh a tvrdost pojiva. Dále závisí na otupování brousícího kotouče, při kterém může hodnota řezné síly vzrůst až několikanásobně. [2]

Hodnotu řezné síly, jejíž směr je shodný se směrem řezné rychlosti, lze určit z experimentálně získané rovnice, vypočtená hodnota je pouze orientační [2]. Pro zvolenou metodu broušení se hodnota řezné síly určí ze vztahu [2]:

$$F_c = 25 \cdot (v_w \cdot f_a)^{0,6} \cdot a_e^{0,5}\ (\text{N}), \quad (6.5)$$

kde: v_w - obvodová rychlost obrobku ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$),
 f_a - axiální posuv stolu na otáčku obrobku (mm),
 a_e - pracovní (radiální) záběr (mm).

Hodnoty řezné síly jsou pro hrubování a broušení načisto dle vztahu (6.5):

$$F_{c\ hr} = 25 \cdot (16 \cdot 4,2)^{0,6} \cdot 0,006^{0,5} = 24,18\ \text{N},$$

$$F_{c\ \check{c}is} = 25 \cdot (10 \cdot 3)^{0,6} \cdot 0,002^{0,5} = 8,60\ \text{N}.$$

Jednotkový strojní čas

Jednotkový strojní čas se odvíjí od zvolené metody broušení [8]. V případě obvodového vnějšího axiálního broušení do kulata při radiálním posuvu stolu f_r ($f_r = a_e$) na každý zdvih stolu

(v každé jeho úvrati), bez vyjiskřování, se hodnota jednotkového strojního času vyjádří vztahem [8]:

$$t_{AS} = \frac{l_a}{f_a \cdot n_w} \cdot \frac{p}{2 \cdot f_r} \quad (min), \quad (6.6)$$

kde: l_a - dráha pohybu stolu brusky v axiálním směru (mm), $l_a = l_{na} + l_w + l_{pa}$,

l_{na} - délka náběhu v axiálním směru (mm),

l_{pa} - délka přeběhu v axiálním směru (mm), $l_{pa} = l_{na} + b_s/2$,

b_s - šířka broušícího kotouče (mm),

l_w - délka obrobku (mm),

f_a - axiální posuv stolu na otáčku obrobku (mm),

n_w - frekvence otáčení obrobku (min^{-1}),

f_r - radiální posuv stolu na otáčku (mm),

p - přídavek na broušení (vztažený na průměr) (mm).

Nejprve je důležité určit dráhu pohybu stolu brusky v axiálním směru l_a . Délka náběhu v axiálním směru je 3 mm. Délka přeběhu se určí jako délka náběhu + šířka broušícího kotouče/2. Po dosazení hodnot je délka náběhu rovna 6 mm. Celková délka broušené části l_w je 90 mm. Hodnota $l_a = l_{na} + l_w + l_{pa} = 3 + 6 + 90 = 99$ mm.

Přídavek p pro hrubování je 0,27 mm, pro broušení na čisto 0,03 mm. Jednotkové strojní časy pro hrubování a broušení na čisto jsou po dosazení známých hodnot do rovnice (6.6):

$$t_{AS \text{ hr}} = \frac{99}{4,2 \cdot 251,26} \cdot \frac{0,27}{2 \cdot 0,006} = 2,15 \text{ min},$$

$$t_{AS \text{ čis}} = \frac{99}{3 \cdot 158,92} \cdot \frac{0,03}{2 \cdot 0,002} = 1,59 \text{ min}.$$

Teoretická drsnost povrchu

Velikost teoretické drsnosti povrchu bude určena pro případ, kdy je hrot nástroje zaoblený a jeho poloměr zaoblení je menší jako posuv. Právě pro tento případ se často používá vztah, který udává funkční závislost mezi posuvem, poloměrem zaoblení hrotu nástroje a parametrem drsnosti povrchu R_z , který vyjadřuje největší výšku profilu. [1]

Tento vztah má následující tvar [1]:

$$R_z = \frac{f^2}{8 \cdot r_\varepsilon} \quad (\mu\text{m}), \quad (6.7)$$

kde: R_z - velikost teoretické drsnosti povrchu pro parametr R_z (μm),

f - posuv na otáčku (mm),

r_ε - poloměr zaoblení hrotu nástroje (mm).

V katalogu TYROLIT, ze kterého byl zvolen broušící kotouč, je uveden také vztah, který udává závislost mezi minimálním profilovým rádiusem na kotouči a jeho zrnitostí. Zrnitost zvoleného kotouče je 60, pro tento případ je minimální rádius 0,6 mm [15]. Bude se počítat s hodnotami pro konečné broušení na čisto, po dosazení do vztahu (6.7) je hodnota parametru R_z :

$$R_z = \frac{3^2}{8 \cdot 0,6} = 1,88 \mu m .$$

Pro určení teoretické velikosti parametru R_a předepsaného na výkrese je zapotřebí znát závislost právě mezi tímto parametrem a parametrem R_z . Podle doporučených hodnot bývá poměr R_z/R_a roven přibližně 4. Pokud bude poměr uvažován jako 4, pak průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu R_a má hodnotu:

$$R_a = \frac{R_z}{4} = \frac{1,88}{4} = 0,47 \mu m .$$

6.6 Zhodnocení

Cílem této části práce bylo aplikovat získané poznatky z oblasti broušení a navrhnout tak brousící proces pro zvolenou plochu – válcovou stopku frézovacího nástroje. Vše je řešeno na teoretické úrovni. Pro broušení válcové plochy byl zvolen vhodný typ brousícího stroje společně s brousícím kotoučem, na základě doporučených hodnot byly zvoleny řezné podmínky zvláště pro hrubování a broušení načisto, výstupem byly výpočty parametrů broušení. Pro přehled jsou v tab. 9 uvedeny řezné podmínky a vypočtené parametry.

Byl zvolen starší typ brusky vzhledem k tomu, že se bude obrábět pouze jeden kus, na CNC brusce by náklady spojené s obráběním byly mnohem větší. Při volbě brousícího kotouče bylo důležité dbát na to, zda je vhodný pro broušení daného materiálu a zda jím lze dosáhnout předepsané drsnosti povrchu. Jeho zrnitost je 60, při takové zrnitosti se běžně dosahuje předepsané drsnosti povrchu $R_a 0,4$, ale klidně i nižší. Důležitá byla také volba jeho velikosti. Velikost kotouče (jeho průměr) byla zvolena na základě otáček stroje a požadované minimální obvodové rychlosti. V případě menšího průměru kotouče než toho, který je zvolený, by řezné rychlosti byly menší, než jsou požadované, a nebyl by tak naplno využit potenciál stroje.

Při zvolených řezných podmínkách je jednotkový strojní čas pro hrubování 2,15 min, pro broušení načisto 1,59 min. Tyto časy lze zkrátit volbou brousícího kotouče o větší šířce, čímž by se zvětšil axiální posuv stolu, dále zvětšením obvodových rychlostí obrobku a zvětšením radiálního posuvu stolu. Jejich zkrácením by se naopak zvětšila hodnota ekvivalentní tloušťky broušení, dále by se zvětšil průřez třísky, což by vedlo ke zvětšení řezných sil.

Výpočtem teoretické drsnosti povrchu byla získána hodnota, která se přibližuje drsnosti povrchu předepsané na výkrese. Tuto hodnotu lze brát pouze jako orientační, při realizování tohoto navrhnutého brousícího procesu by se pro přesné vyhodnocení drsnosti povrchu použil drsnoměr Taylor Surtronic DUO, anebo například 3D měřicí zařízení pracující na principu CLA snímače.

Zásadním předepsaným rozměrem válcové stopky byl rozměr Ø20h6. V tomto případě pomocí výpočtů nelze určit, zda bylo dosaženo tohoto rozměru tak, jako to bylo provedeno při výpočtu parametru teoretické drsnosti povrchu R_a . Dosažení tohoto rozměru závisí pro zvolený případ na radiálním posuvu kotouče o hodnotu pracovního záběru vzhledem k obrobku, na přesnosti obráběcího stroje a na kvalifikaci obsluhy. Po broušení na čisto by se pro kontrolu rozměru Ø20h6 použil mikrometr, souřadnicový měřicí stroj, posuvné měřítko nebo třmenový mikrometr.

Tab. 9 Řezné podmínky a vypočtené parametry broušícího procesu.

	Hrubování	Načisto
Řezná rychlost (m.s^{-1})	26,11	29,32
Obvodová rychlost obrobku (m.min^{-1})	16	10
Axiální posuv stolu na otáčku (mm)	4,2	3
Radiální posuv stolu na otáčku (mm)	0,006	0,002
Frekvence otáčení obrobku (min^{-1})	251,26	158,92
Ekvivalentní tloušťka broušení (mm)	0,04	0,02
Průřez třísky (mm^2)	0,18	0,06
Řezná síla (N)	24,18	8,60
Jednotkový strojní čas (min)	2,15	1,59
Největší výška profilu Rz (μm)	-	1,88
Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu Ra (μm)	-	0,47

ZÁVĚR

Dokončovací operace mají ve strojírenské výrobě nezastupitelné místo, a to zejména v případech vysokých požadavků na rozměrovou přesnost a jakost obrobených ploch. Každá z dokončovacích operací slouží pro jiný účel a dosahované parametry jsou při jednotlivých operacích odlišné. Významnou dokončovací operací je broušení, které bylo hlavním předmětem této bakalářské práce, jejíž součástí byla také měřidla a přípravky používaná pro měření a kontrolu dosažených parametrů.

V práci bylo uvedeno rozdělení brousících materiálů z hlediska jejich původu. Přírodní brusiva jsou omezena kvůli své nižší tvrdosti a houževnatosti z velké části na výrobu brousících plátů a papírů, výjimkou je diamant. Ten se spolu s dalšími umělými brusivy používá převážně pro výrobu brousících kotoučů, u kterých je nejčastěji používaným umělým brusivem karbid křemíku a umělý korund.

Při broušení je nutno zohlednit řadu faktorů, které mají vliv na dosažené parametry broušeného povrchu. Důležité je orovnění kotouče, s ohledem na způsob broušení zvolit správné řezné podmínky, na základě materiálu broušené součásti zvolit vhodný typ brousícího kotouče apod. Dosahované parametry broušených ploch závisí na způsobu broušení, v případě dokončovacího broušení se dosahuje přesností rozměrů v rozmezí IT5 – IT7 a drsnosti povrchu běžně 0,4 – 1,6 μm .

Byla uvedena a popsána jednotlivá měřidla používaná v oblasti měření a kontroly délkových rozměrů a struktury povrchu. Délková měřidla lze rozlišovat podle toho, jestli z nich lze odečíst skutečnou naměřenou hodnotu rozměru nebo se jimi pouze zjistí, zda je rozměr součásti dobrý či zmetkový. Jednotlivá délková měřidla se vyrábí v různých provedeních a podle toho se také liší jejich rozlišitelnost. Pro velmi přesná měření se používají souřadnicové měřicí stroje. Přístroje pro měření struktury povrchu mají při svém porovnání určité nedostatky, jako je tolerance vůči znečištění, rozdílná šířka pásma dat apod., přičemž některé z nedostatků lze upravit softwarem. Pro běžná měření se ve strojírenském prostředí více používají měřidla kontaktní. Je to dáno i tím, že kontaktními měřidly je měření rychlejší, navíc měření bezkontaktním přístrojem vyžaduje větší odbornost a zkušenost při manipulaci s ním. Součástí této problematiky byly také přípravky, které jsou často používanými pomocnými zařízeními v oblasti měření a kontroly.

V oboru technologie broušení, stejně tak jako v ostatních oblastech, jsou důležití kvalifikovaní pracovníci. Byly zde uvedeny obecné předpoklady, které by měla kvalifikovaná osoba v oblasti technologie broušení splňovat. Jedná se o souhrn teoretických i praktických znalostí. Pro konkrétní pozici se pak může kvalifikace mírně lišit.

Výstupem této práce byla ukázková zvolená dokončovací operace. Pro tuto část byla navržena drážkovací fréza s válcovou stopkou. Broušení bylo aplikováno na válcové stopce, konkrétně se jednalo o axiální broušení vnějších ploch do kulata. Pro danou metodu broušení byl zvolen brousící stroj – hrotová bruska BUA 16, brousící kotouč, byly navrženy řezné podmínky a vypočteny parametry brousícího procesu. Vše bylo navrženo tak, aby se dosáhlo předepsaného rozměru $\varnothing 20\text{h6}$ a drsnosti povrchu Ra 0,4. Byly doporučeny měřidla a měřicí přístroje, které by se použili pro kontrolu těchto předepsaných parametrů.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. BUDA, Ján, Karol VASILKO a Ján SOUČEK. *Teória obrábania: celoštátna vysokoškolská učebnica pre strojnícke fak. vysokých škôl*. Bratislava: Alfa, 1983. Edícia strojárскеj literatúry (Alfa).
2. KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN 80-214-3068-0.
3. MARTINÁK, Milan. *Kontrola a měření: pro 3. ročník středních průmyslových škol strojnických*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989. ISBN 80-03-00103-X.
4. HUMÁR, Anton. *Výrobní technologie II* [online]. VUT v Brně: Fakulta strojního inženýrství, 2002 [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/VyrobníTechnologie_II.pdf
5. Strojírenství: Obrábění a zpracování kovů. *ELUC* [online]. Olomouc, 2015 [cit. 2022-03-29]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1059>
6. Měření délek, pevné kalibry. In: *Střední průmyslová škola, Ostrava - Vítkovice, příspěvková organizace* [online]. Ostrava, c2020 [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: https://www.spsengrova.cz/wp-content/uploads/2020/04/KOM_3_2_SPU-meridla_delek_pevne_kalibry.pdf
7. ŘASA, Jaroslav a Vladimír GABRIEL. *Strojírenská technologie 3 - 1. díl: Metody, stroje a nástroje pro obrábění*. 2. vyd. Praha: Scientia, 2005. ISBN 80-7183-337-1.
8. HUMÁR, Anton. *TECHNOLOGIE I: TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ - 3. část* [online]. VUT v Brně: Fakulta strojního inženýrství, 2005 [cit. 2022-03-29]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf
9. ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ: 5 BROUŠENÍ A DOKONČOVACÍ OPERACE OBRÁBĚNÍ* [online]. Ostrava: Vysoká škola Báňská - Technická univerzita Ostrava, 2013 [cit. 2022-03-29]. ISBN 978-80-248-3012-4. Dostupné z: https://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_001/Technologie%20Obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD/02%20Text%20pro%20e-learning/Technologie%20obrabeni%2005%20Brou%C5%A1en%C3%AD%20a%20dokon%C4%8Dovac%C3%AD%20operace%20obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD.pdf
10. ČEP, Robert. *Technologie II - 2. díl* [online]. [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_2dil.pdf
11. NOVÁK, Zdeněk. Prostorové měření a hodnocení textury povrchu přístroji Taylor Hobson Ltd. In: *Kvalita a Geometrické specifikace produktů* [online]. VUT Brno, c2005 [cit. 2022-04-01]. ISSN 1801-5352. Dostupné z: http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2_Novak_3D_mereni_textury.pdf
12. Způsoby a postupy rovinného broušení. *Techcentrum* [online]. Česká Třebová, c2022 [cit. 2022-03-31]. Dostupné z: <https://www.prodejabrusiva.cz/zpusoby-a-postupy-rovinneho-brouseni>
13. *Taima* [online]. Praha, c2014 [cit. 2022-03-31]. Dostupné z: <http://www.taima.cz>
14. KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.

-
15. Katalog skladových výrobků Pro univerzální broušení. *TYROLIT* [online]. 2019 [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: https://www.tyrolit.cz/fileadmin/Documents/Trade/Catalogues/TYROLIT_2019_A5_CZ_1_7_OB.pdf
 16. Brusíč kovů: Kvalifikační standard. *Npi: Národní pedagogický institut České republiky* [online]. c2006-2014 [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: https://narodnikvalifikace.cz/kvalifikace-443-Brusic_kovu/kvalifikacni-standard
 17. BROUŠENÍ II. *Metodický portál RVP.CZ* [online]. Praha [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: <https://www.ssrs.cz/data/files/vy-61-inovace-139-brouseni-nastroje-xl20wj21oa.pdf>
 18. Základní rozdělení brusných kotoučů k ostření nástrojů. *Tumlikovo: Metal Cutting Technologies* [online]. c2010 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/zakladni-rozdeleni-brusnych-kotoucu-k-ostreni-nastroju/>
 19. Broušící kotouče ze supertvrdých řezných materiálů. *MM průmyslové spektrum* [online]. 2001 [cit. 2022-03-29]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/brousici-kotouce-ze-supertvrdych-reznych-materialu>
 20. Diamantové brusné kotouče. *BOUKAL E-shop: Stroje s lidskou péčí* [online]. Litvínov, c2021 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: <https://www.boukal.cz/diamantovy-brusny-kotouc-sbc-pro-dg-26/887/produkt>
 21. HLUCHÝ, Miroslav a Václav HANĚK. *Strojírenská technologie 2 - 2. díl: Koroze, základy obrábění, výrobní postupy*. 2. uprav. vyd. Praha: Scientia, 2001. ISBN 80-7183-245-6.
 22. ZUMR, Filip. *Broušící nástroje* [online]. Praha, 2018 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/79884/F2-BP-2018-Zumr-Filip-BP_Brousici_nastroje_Zumr_Filip.pdf?sequence=-1&isAllowed=y. Bakalářská práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Vítězslav Rázek.
 23. Abrasivní materiál: vlastnosti a metody aplikace. Brusné nástroje: typy a funkce. *Optolov* [online]. c2021 [cit. 2022-03-31]. Dostupné z: <https://optolov.ru/cs/otdelka-sten-v-vannojj/material-abrazivnyi-osobennosti-i-sposoby-primeneniya-abrazivnyi-instrument.html>
 24. Přírodní brusiva. *Bevedo.cz* [online]. Praha, c2016 [cit. 2022-03-31]. Dostupné z: <https://www.bevedo.cz/napoveda/clanky/prirodni-brusiva/>
 25. Druhy brusiv používaných na brusných pásích. *PISKAČ a syn* [online]. České Budějovice, c2020 [cit. 2022-03-31]. Dostupné z: <https://www.eshop.piskacasyn.cz/>
 26. Syntetická brusiva. *Bevedo.cz* [online]. Praha, c2016 [cit. 2022-03-31]. Dostupné z: <https://www.bevedo.cz/napoveda/clanky/synteticka-brusiva/>
 27. BROUSICÍ MATERIÁLY. *Studijní materiály nejen do strojírenství* [online]. [cit. 2022-03-31]. Dostupné z: <http://strojirenstvi-stredni-skola.blogspot.com/2011/04/3244-brousici-materialy.html>
 28. Karbid boru. *ABRANOVA* [online]. Rvenice, c2022 [cit. 2022-03-31]. Dostupné z: <https://abranova.cz/karbid-boru>
 29. Katalog brusných nástrojů. *ANDRE abrasive articles* [online]. [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: <http://www.brusivojimi.com/soubory/andre-katalog-brusnych-nastroju.pdf>
-

30. BROUSICÍ KOTOUČE Z DIAMANTU A CBN. *Katalog DIAMOND CONTACT* [online]. [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: <http://www.diamondcontact.cz/Katalogy/Kat-DC-B-CZ-2018-v6-Web.pdf>
31. HELMENSTINE, A. M. Chemie diamantů: Vlastnosti a typy. *EFerrit* [online]. c2022 [cit. 2022-03-31]. Dostupné z: <https://cs.eferrit.com/chemie-diamantu-vlastnosti-a-typy/>
32. Speciální syntetický diamant určený pro obrábění. *MM průmyslové spektrum* [online]. 2015 [cit. 2022-03-29]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/specialni-synteticky-diamant-urceny-pro-obrabeni>
33. Brusné kotouče z KNB. *VTN-Servis* [online]. Praha, c2004-2022 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: <https://www.vtn.cz/brusne-nastroje-kenb/>
34. MASLOV, J. N. *Teorie broušení kovů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1979.
35. SVOBODA, Pavel, Jan BRANDEJS a Jiří DVOŘÁČEK. *Základy konstruování*. Vyd. 6., dopl. 2016. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2015. ISBN 978-80-7204-921-9.
36. LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 3. dopl. vyd. Úvaly: Albra, 2006. ISBN 80-7361-033-7.
37. NOVOTNÝ, Karel a Oskar ZEMČÍK. *PŘÍPRAVKY A NÁSTROJE* [online]. VUT v Brně: Fakulta strojního inženýrství [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/opory/fpn_pripnavky_a_nastroje_novotny_zemcik.pdf
38. TYKAL, Miroslav. Normalizace struktury povrchu, současný stav a trendy vývoje. In: *Kvalita a Geometrické specifikace produktů* [online]. VUT Brno, c2005, říjen 2005 [cit. 2022-04-01]. ISSN 1801-5352. Dostupné z: http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/41_Tykal_TNK7.pdf
39. Měření drsnosti. *M&B Calibr* [online]. Ivančice [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: <https://www.mbcaltbr.cz/mereni-drsnosti.html>
40. Dotykové, nebo bezdotykové měření struktury povrchu?. *MM průmyslové spektrum* [online]. 2005 [cit. 2022-03-29]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/dotykovne-nebo-bezdotykovne-mereni-struktury-povrchu>
41. ŠERÝ, Jakub. *Konstrukce měřicího přípravku pro ohýbaný dílec* [online]. Zlín, 2016 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/37922/sery_2016_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Martin Řezníček.
42. Kontrolní přípravky. *MESING: MĚŘICÍ A AUTOMATIZAČNÍ TECHNIKA* [online]. Brno, c2017 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: <https://mesing.cz/?page=kontrolni-pripnavky&lang=cz>
43. Měřicí přípravky a stroje. *HolmTec* [online]. Trutnov, c2020 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: <https://www.holmtec.cz/merici-pripnavky>
44. SPECIÁLNÍ MĚŘICÍ A KALIBRAČNÍ PŘÍPRAVKY A JEDNOÚČELOVÁ MĚŘIDLA. *Katalog UNIMETRA* [online]. [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: http://www.unimetra.cz/soubory_materialy/90_1.pdf
45. BUA 16: brusky hrotové. *Prodej a opravy brousicích strojů: Procházka - Moravec* [online]. c2009 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <http://www.opravybrusek.cz/stroje/BUA16/>
46. Žihání ke snížení pnutí. *Bodycote: Přední světový poskytovatel služeb tepelného zpracování* [online]. [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: <https://www.bodycote.com/cs/sluzby/tepelne-zpracovani/zihani-ke-snizeni-pnuti/>
47. DiaGrind HSS: Brusný olej. *Interspark* [online]. c2020 [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: <http://www.interspark.cz/produkty/diagrind-hss/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMOBLŮ A ZKRATEK

Symboly

Označení	Legenda	Jednotka
A	průřez třísky	[mm ²]
F _c	řezná síla	[N]
R _a	průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu	[μm]
R _p	výška nejvyššího výstupku profilu	[μm]
R _v	hloubka nejnižší prohlubně profilu	[μm]
R _z	největší výška profilu	[μm]
Z(x)	hodnota pořadnice, výška posuzovaného profilu v libovolné poloze x	[-]
a _e	pracovní (radiální) záběr	[mm]
b _s	šířka brousicího kotouče	[mm]
d _s	průměr brousicího kotouče	[mm]
d _w	průměr obrobku	[mm]
f	posuv na otáčku	[mm]
f _a	axiální posuv stolu na otáčku	[mm]
f _r	radiální posuv stolu na otáčku	[mm]
h _{eq}	ekvivalentní tloušťka broušení	[mm]
l _a	dráha pohybu stolu brusky v axiálním směru	[mm]
l _{na}	délka náběhu v axiálním směru	[mm]
l _{pa}	délka přeběhu v axiálním směru	[mm]
l _r	základní délka, délka ve směru osy x použita pro rozlišení nerovností charakterizující vyhodnocovaný profil	[mm]
l _w	délka obrobku	[mm]
n _s	frekvence otáčení brousicího kotouče	[min ⁻¹]
n _w	frekvence otáčení obrobku	[min ⁻¹]
p	přídavek na broušení	[mm]
p _k	měrný tlak	[MPa]
r _ε	poloměr zaoblení hrotu nástroje	[mm]
t _{AS}	jednotkový strojní čas	[min]
v _c	řezná rychlost	[m.s ⁻¹]
v _f	posuvová rychlost	[m.min ⁻¹]
v _{fa}	axiální rychlost posuvu stolu	[m.min ⁻¹]
v _w	obvodová rychlost obrobku	[m.min ⁻¹]

Zkratky

Označení	Legenda
CLA	Chromatic Lenght Aberration
CNC	Computer Numerical Control
COM	Common Object Model
CVD	Chemical Vapour Deposition
HRC	tvrdost podle Rockwella
HPHT	High Pressure High Temperature
KNB	kubický nitrid boru
SNO	stroj nástroj obrobek
USB	Universal Serial Bus
2D	dvourozměrný
3D	třírozměrný

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA 1 Výkres drážkovací frézy