

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní – Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BROUSICÍ NÁSTOJE

GRINDING TOOLS

Autor:

Filip Zumr

Vedoucí práce:

Ing. Vítězslav Rázek CSc.

Rok:

2018



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Zumr** Jméno: **Filip** Osobní číslo: **456394**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Brousicí nástroje

Název bakalářské práce anglicky:

Grinding tools

Pokyny pro vypracování:

1. Rozbor zadané problematiky
2. Modifikace brousících nástrojů
3. Porovnání řezných podmínek a dosahovaných kvalitativních parametrů obrobků

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Vítězslav Rázek, CSc., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

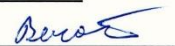
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **09.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

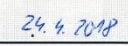

Ing. Vítězslav Rázek, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce


Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.


Datum převzetí zadání


Podpis studenta

ANOTACE

Tato bakalářská práce byla vytvořena jako rešeršní práce na téma broušící nástroje. Nejprve se zabývá obecně základními znaky broušení, a poté základními typy broušících nástrojů. Další část je věnována jednotlivým parametrům a značení broušících kotoučů, podle kterých se řídíme při výběru na konkrétní aplikaci. Dále jsou probrány moderní supertvrdé broušící materiály (diamant a KNB), inovované a některé obtížně broušitelné materiály. Poslední kapitola je krátce věnovaná hloubkovému broušení.

KLÍČOVÁ SLOVA

broušení, broušící nástroj, brusný kotouč, materiály, tvar, použití, brusiva

ANNOTATION

This bachelor thesis was created as a research work on the subject of grinding tools. First, it deals with the basic features of grinding and then with the basic types of grinding tools. The next part shows the parameters and markings of the grinding wheels, according to which we choose for a specific application. Then modern super-hard grinding materials (diamond and CBN), innovative materials and some hard-to-grind materials are discussed. The last chapter is briefly devoted to deep grinding.

KEYWORDS

grinding, grinding tool, grinding wheel, materials, shape, usage, abrasives

Česné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s použitím literárních pramenů a informací, které cituji a udávám v seznamu použité literatury a zdrojů informací.

Datum:

podpis

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval panu Ing. Vítězslavu Rázkovi CSc. za cenné připomínky a rady pro vypracování mé bakalářské práce.

Obsah

Seznam použitých veličin	3
1 Úvod	4
2 Základy broušení	5
1.1 Specifika broušení oproti klasickému obrábění	6
1.2 Teplota při broušení	6
1.3 Kvalita povrchové vrstvy	8
1.4 Řezné podmínky	9
2 Broušící nástroj	10
2.1 Základní charakteristika	10
2.2 Dělení broušících nástrojů podle tvaru	10
3 Broušící kotouče	15
3.1 Sloh	15
3.2 Tvrdost	16
3.3 Pojiva	16
3.3.1 Anorganická pojiva	17
3.3.2 Organická pojiva	17
3.4 Zrnitost	18
3.5 Tvary broušících kotoučů	20
3.6 Značení broušících nástrojů	21
3.7 Trvanlivost broušících kotoučů	21
4 Klasické broušící materiály	22
4.1 Přírodní broušící materiály	22
4.2 Umělé broušící materiály	23
5 Moderní broušící materiály	24
5.1 Supertvrde broušící materiály	24
5.1.1 Kubický nitrid boru (KNB)	25

5.1.2	Diamant.....	25
5.1.3	Diamantové a KNB brousicí nástroje.....	27
5.1.4	Doporučené řezné podmínky a použití	30
5.2	Inovované brousicí materiály	31
6	Obtížně broušitelné materiály	34
7	Hlubkové broušení	37
8	Závěr.....	40
9	Seznam použité literatury a zdrojů	41
10	Seznam obrázků.....	43
11	Seznam tabulek	45

Seznam použitých veličin

Označení	Název	Jednotka
v_s	řezná rychlost	m/s
v_f	posuv	m/min
a_e	hloubka záběru	mm
Ra	drsnost	μm
Rz	drsnost	μm
Q_f	tok kapaliny	l/min
v_k	obvodová rychlost broušícího kotouče	m/s
v_w	obvodová rychlost obrobku	m/s
p_k	tlak při přitlačování	MPa
F	přítlačná síla	N
F_t	tečná síla	N
F_n	normálová síla	N
μ	poměr broušících sil	-
α	úhel křížení	°
D, d	průměr	mm
λ	tepelná vodivost	W/m·K
G-ratio, G	životnost	-
V_w	objem odbroušeného materiálu	mm^3
V_s	objem brusné vrstvy	mm^3
Q-Prime, Q'_w	produktivnost	$\text{mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$
t	teplota	°C

1 Úvod

Technologie broušení patří k nejstarším metodám obrábění. Její využití stále více narůstá a v dnešní době se již stává nepostradatelnou součástí technologických postupů. Těmi hlavními důvody jsou schopnosti dosahovat vysoké rozměrové a tvarové přesnosti a povrchové kvality, kterou nedokážeme na jiných obráběcích strojích dosáhnout bez použití speciálních nástrojů a podmínek.

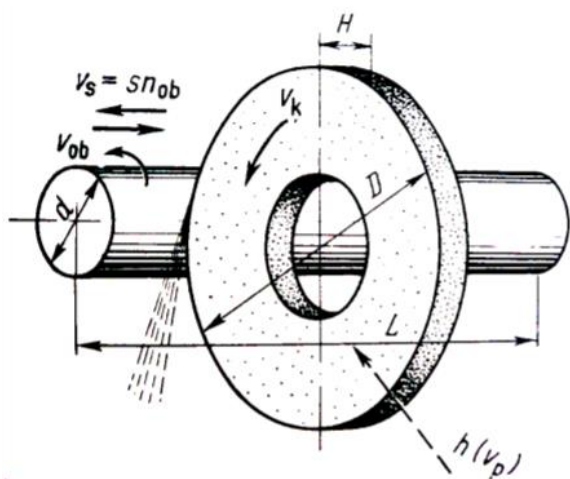
Pokud chceme brousit, tak se samozřejmě neobejdeme bez nějakého broušícího nástroje. Pro volbu vhodného broušícího nástroje je potřeba znát základní druhy a parametry broušících nástrojů. Z důvodu ekonomických úspor a z důvodu vývoje nových tvrdých a odolných materiálů se začínají stále více využívat supertvrdé broušící materiály, které umožňují využívat vyšší řezné rychlosti a zvyšují produktivitu procesu.

2 Základy broušení

Broušení je hromadné rychlostní mikrořezání (odírání), ke kterému dochází díky velmi jemným zrnům brusiva, která jsou spojena pojivem v nástroji. Proces probíhá při rychlostech nejčastěji do 50 m/s, eventuálně až přes 100 m/s. Broušení patří mezi nejpřesnější metody obrábění. Převážně se používá jako dokončovací proces, ale v dnešní době se už začíná uplatňovat i při běžném obrábění polotovarů. Na broušení má vliv mnoho faktorů. Například řezná síla, drsnost kotouče, posuvy, okamžitá teplota broušení a další. [1]

Broušení má celou řadu výhod. Má vysokou produktivitu, velkou geometrickou přesnost, vysokou kvalitu obrobených ploch, je potřeba malý čas na upnutí obrobku, obrábí se s vysokou přesností (řádově i jednotek mikrometrů). Je možné brousit tvrdé kalené a cementované součásti, slinuté karbidy i jiné tvrdé kovové a nekovové materiály. [1], [2]

Primárním způsobem broušení je broušení vnějších válcových ploch. Kotouč nebo obrobek konají pohyb podél osy obrobku (obr. 1). V tomto případě tvoří řeznou dráhou zrna šroubovitá hypocykloidní křivka a řeznou plochu tvoří soubor hypocykloidních šroubovic. [1]



Obrázek 1: Schéma broušení vnějších válcových ploch s posuvem podél osy obrobku [1]

kde:

v_k [m/s] - obvodová rychlost brousícího kotouče,

v_{ob} [m/min] - obvodová rychlost obrobku,

v_s [mm/min] - podélný posuv,

$h(v_p)$ [mm/min] - přísuv,

D, d [mm] - průměr brousícího kotouče,

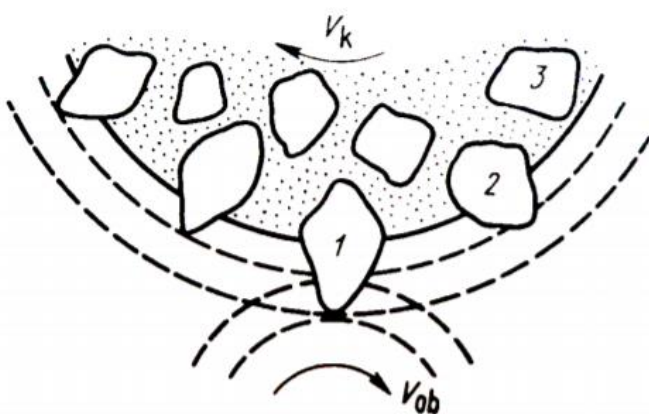
H [mm] - šířka brousícího kotouče,

L [mm] - délka broušené plochy obrobku [1]

1.1 Specifika broušení oproti klasickému obrábění

Kotouč obsahuje mnoho velmi malých zrn, která jsou nepravidelně rozmístěna na pracovní ploše kotouče. Brousicí kotouč nemá souvislý břit. Zrna brusiva nemají pravidelný tvar, mají zaoblené vrcholy (často se záporným úhlem čela), velkou tvrdost, tepelnou odolnost, jsou ostrá, křehká a štěpí se v průběhu broušení. Velké obvodové rychlosti a malá hloubka řezu každého zrna způsobují prakticky okamžité odebrání obrovského množství třísek za časovou jednotku. [1]

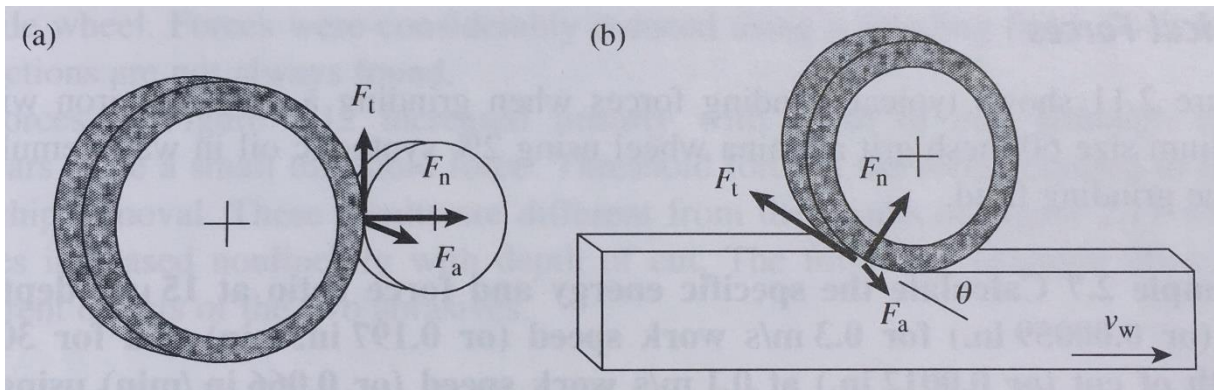
Každé zrno v kotouči je jiné, různě vysoké a různě orientované. Všechna zrna tudíž nemohou být rovnoměrně zatížena, kotouč nemůže mít dokonalý geometrický tvar. Nejvíce zatížená jsou vyčnívající zrna, ostatní snížená zrna určitou dobu nepracují (obr. 2). Ostatní zrna začínají pracovat po opotřebení, vylomení nebo orovnání vyšších zrn z kotouče. [1]



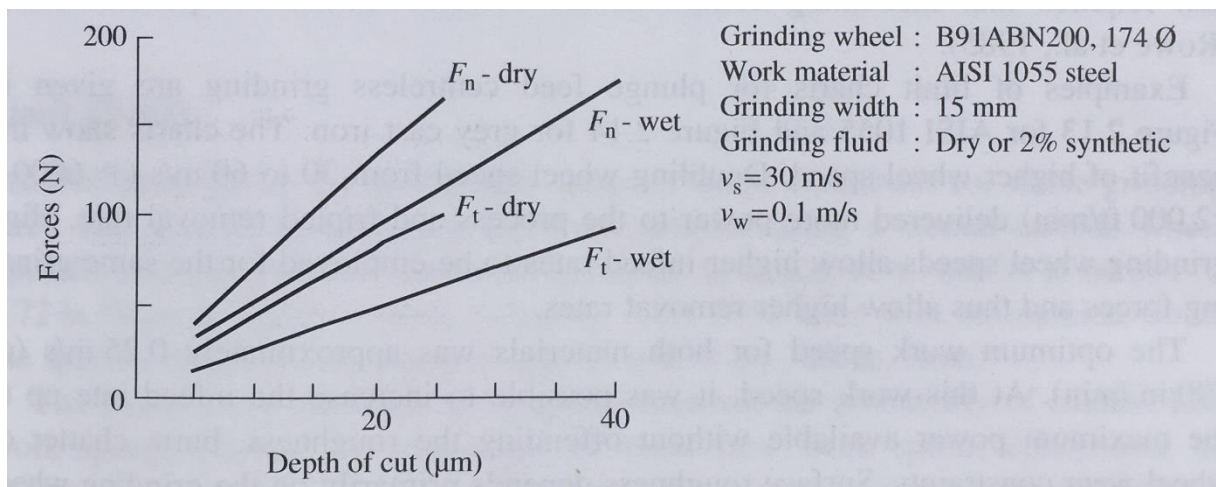
Obrázek 2: Zrna brousicího kotouče: 1 – řezná, 2 – tlačná, 3 – pasivní [1]

1.2 Teplota při broušení

Při broušení hraje velký vliv také teplota a s ní spjaté tepelné jevy. Zrna a pojivo brousicího kotouče se v místě broušení třou a namáhají broušenou plochu dynamicky. Třecí síly pak ještě více rostou při práci s otupeným brousicím kotoučem. V místě působení jednotlivých zrn mohou vzniknout vysoké okamžité teploty, které se často blíží k teplotě tavení obráběného materiálu. Tepelný proces má velkou rychlost, obrobek se velmi rychle zahřívá a poté i velmi rychle chladne. Proces chladnutí může být také urychlován chladicí kapalinou. Kapalina má vliv na velikosti řezných sil (obr. 4). Od kapaliny vyžadujeme: chladicí a mazací účinek, usnadňování odvodu třísek, antikorozi účinek, chemickou a fyzikální stálost, bezpečnost před požárem a explozí, příznivý vliv na sedimentaci odpadu broušení. Kapalinu přivádíme nejčastěji tryskou, která je minimálně stejně široká, jako je kotouč. Má sice chladicí účinek, ale neproniká do místa záběru zrn, a proto jen málo ovlivňuje okamžité teploty v místě jeho činnosti. [1]



Obrázek 3: Rozložení řezné síly na 3 složky: a) malá hloubka řezu, b) velká hloubka řezu [12]



Obrázek 4: Broušení bez řezné kapaliny (dry) a s řeznou kapalinou (wet) [12]

Významným zdrojem tepla jsou také síly, které vznikají při plastické deformaci obráběného materiálu. Důkazem vysokých teplot jsou i jiskry, které mohou vyletovat z obrobku (s velkou pevností) i při použití řezné kapaliny. U kovových dílů se prudce zvyšuje plasticita kovu v místě působení zrn. To má pozitivní vliv při ubírání třísky zaoblenými zrný kotouče. [1]

Při broušení se značná část mechanické energie spotřebuje na tření a poměr užitečné práce broušení k celkové vynaložené práci je relativně malý. Kolem 80% veškeré mechanické energie se mění na teplo a přechází do obrobku, zbytek přechází v potenciální energii deformace krystalické mřížky. Vlivem vysokých teplot při broušení mohou vzniknout defekty povrchové vrstvy obrobku a obrobek se znehodnotí. Proto je tepelný vliv jedním ze základních činitelů broušení. [1]

1.3 Kvalita povrchové vrstvy

Kvalita a drsnost povrchu (R_a) součásti mají vliv na opotřebení během provozu i na opotřebení při počátečním spuštění. Při broušení na sebe navzájem působí všechny materiály a to jak mechanicky, tak i chemicky. [1]

Broušený povrch získává svou drsnost postupným průchodem velkého počtu zrn brusiva kotouče přes broušenou plochu obrobku. Výsledná drsnost závisí na geometrii zrna, stupni plastické deformace a na celkovém chvění celé soustavy. U povrchu lze hodnotit také jeho vlnitost, což je souhrn periodických a neperiodických výstupků a prohlubenin. Vznik vln je ovlivněn pracovními pohyby obrobku, vřeteníku a kotouče. Dále mají vliv i tvarové nepřesnosti kotouče a poměry obvodových rychlostí obrobku. Dojde-li ke zvětšení obvodové rychlosti broušícího kotouče, zvětší se chvění technologické soustavy, což vede ke zhoršení celkové vlnitosti povrchu. [1]

Broušením bez kapaliny můžeme v některých případech (zejména při broušení materiálů v přírodním stavu) dosáhnout lepší kvality povrchu než při broušení s kapalinou. Redukcí kapaliny se zintenzivní vliv tepla na broušenou plochu a to vede ke zvýšení plasticity a odstranění ostrých hran, které za sebou zanechávají broušící zrna. U kalených materiálů nemusí být vliv tepla tak patrný a nedostatek kapaliny může povrch naopak zhoršit. Vliv množství broušící kapaliny u různých kotoučů můžeme vidět v tabulce 1. [25]

Pokud chceme dosáhnout lepší kvality povrchu při broušení, musíme použít jemnější nebo jiný nástroj, například diamantový. V porovnání s běžným broušením jsou tloušťky odebíraných třísek mnohem nižší, stejně jako síly a teploty. Zlepšení povrchu je znát zvláště u tvrdých materiálů, protože zrna diamantu pronikají méně hluboko do materiálu a zanechávají tak hladší povrch. [1]

Tabulka 1: Dosažené hodnoty drsnosti povrchu při eliminaci procesní kapaliny, $v_s = 27$ m/s, $v_{fr} = 0.26$ mm/min [25]

Broušící zrno	Drsnost	$Q_{f1} = 8$ l/min	$Q_{f2} = 4$ l/min	$Q_{f3} = 2$ l/min	$Q_{f4} = 0$ l/min
Bílý korund A99	R_a (μm)	0,60	0,60	0,61	0,67
	R_z (μm)	4,59	4,62	4,59	4,77
Růžový korund A98	R_a (μm)	0,41	0,39	0,61	0,62
	R_z (μm)	3,31	2,65	4,31	4,48
Monokrystalický korund	R_a (μm)	0,57	0,75	0,8	0,89
	R_z (μm)	4,14	4,87	5,42	6,61
Mikrokrystalický SG	R_a (μm)	0,32	0,35	0,35	0,38
	R_z (μm)	2,46	2,49	2,50	2,72

1.4 Řezné podmínky

Hloubka řezu je při klasickém broušení relativně malá (zejména v porovnání s nástroji s definovanou geometrií břitu). Závisí na způsobu broušení a na tvaru součásti. Pro obvodové broušení se pohybuje v rozmezí 0,001 mm (na čisto) až 0,075 mm (hrubování). Při rovinném broušení se přibližně volí 0,005 mm (na čisto) až 0,04 mm (hrubování). U zápachového broušení se volí rychlost přísuvu 0,5 až 2 mm/min. [27]

Posuv závisí na způsobu broušení a na materiálu obrobku. Pro obvodové broušení se obecně volí: Pro hrubování – obvodová rychlost obrobku 15 až 35 m/min, podélný posuv obrobku 5/6 šířky kotouče/ot. Pro broušení na čisto – obvodová rychlost obrobku 8 až 16 m/min, podélný posuv obrobku 1/10 šířky kotouče/ot. [27]

Řezná rychlost (obvodová rychlost kotouče) se pohybuje v rozsahu 20 až 120 m/s, volba probíhá na základě způsobu broušení a druhu pojiva. U obvyklých broušicích kotoučů s keramickým pojivem, se pohybuje okolo 35 m/s. U kotoučů vyztužených skelnými vlákny (řezací kotouče) se používají řezné rychlosti okolo 100 m/s. Rychlosti 120 m/s a vyšší používáme u speciálních rychlostních kotoučů s keramickou vazbou. [27]

Abychom zpřesnili rozměry obrobku, provádíme tzv. vyjiskřování. Broušicím kotoučem přejedeme několikrát obrobek bez přísuvu, aby se vyrovnaly pružné deformace soustavy stroj-nástroj-obrobek-upínač. [27]

2 Brousicí nástroj

2.1 Základní charakteristika

Brousicí nástroj je řezný nástroj, který se skládá z brusných zrn, pojiva a pórů. Pojivo plní funkci „lepidla“ a drží pohromadě zrna, čímž tvoří jeden celek. Brousicí nástroje můžeme rozdělit podle tvaru na kotouče, segmenty a kameny. Nejpoužívanější jsou brousicí kotouče, kterým se také budeme nejvíce věnovat. [3]

Základní údaje brousicího nástroje jsou obecně charakterizovány:

- brusivem - tvrdé, houževnaté, ostrohranné krystalické látky
- pojivem - prostředek k zajištění žadoucího tvaru brusného nástroje
- tvrdostí nástroje - odpor, který klade pojivo proti vylomení brusných zrn z nástroje
- zrnitostí - číslo, které odpovídá desetinně měrného rozměru zrna v mikrometrech
- strukturou - poměr objemu pórů k celkovému objemu brusného tělesa
- geometrickým tvarem a rozměry [4]

Známe buď nástroje s vázaným pevným brusivem, kde jsou zrna spojená pojivem. Typickým nástrojem je pak kotouč, brousicí tělísko, brousicí kámen nebo nástroj jiného tvaru. Zrna mohou být přilepená k brousicímu pásu, který pak plní roli brousicího nástroje. Nebo známe nástroje s volným brusivem, kde se zrna používají například ve formě prášku pro broušení kapalinou nebo ultrazvukem. [1]

2.2 Dělení brousicích nástrojů podle tvaru

Brousicí pilníky - brusný nástroj na velmi tvrdý nebo kalený materiál. Vyrábí se ze zrn karborundu nebo elektrokorundu. Zrnitost a tvrdost je obdobná jako u brusných kotoučů. Tvary brusných pilníků jsou podobné, jako u ocelových pilníků. Někdy je tento pilník opatřen rukojetí. [4]

Řezací a leštící kotouče - jsou určeny především do úhlových brusek. Používají se na stavbách i v domácnostech, nejčastěji na řezání oceli, hliníku, litiny, kamene atd. Leštící kotouče se vyskytují v mnoha typech. Například leštící kotouče filcové, hadrové, molitanové či z ovčího rouna. Vhodné je použít brusné a leštící pasty. [4]

Brousicí segmenty - část brusného segmentového kotouče. Segmenty se mohou upevňovat například na segmentový brusný kotouč. Tento kotouč umožňuje větší výkon a vytváří jemnější povrch. Existují i segmenty určené pro ruční broušení ve speciálních bruskách. [4]

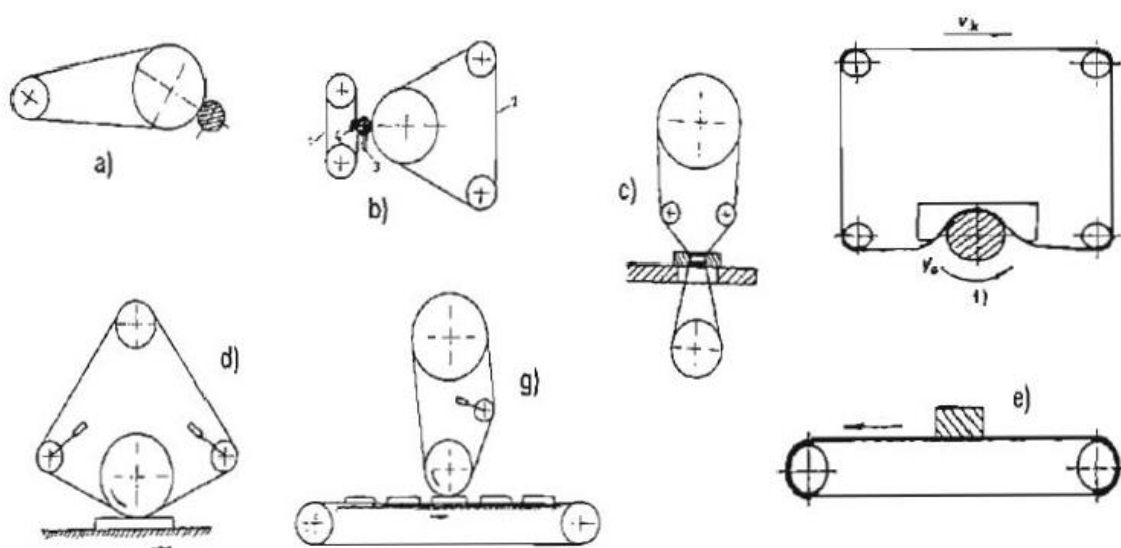
Obtahovací kameny - vhodné pro ruční broušení, ostření a odhrotování. [4]

Brousicí kotouče - rotační brousicí nástroj různých tvarů a vlastností, vzniklý spojením brusných zrn s pojivem. [4]



Obrázek 5: Brousicí kotouče [4]

Brousicí pásy - jedná se o papírové nebo textilní nekonečné pásy, na které je nanášena vrstva orientovaných brousicích zrn. Zrna jsou stejná jako u brousicích kotoučů - nejčastěji z SiC nebo z Al_2O_3 . Pásový broušení je efektivnější než klasické broušení brousicím kotoučem, kvůli lepší orientaci brusných zrn. [18]



Obrázek 6: Schéma broušení pásem: a) broušení vnějších rotačních ploch v hrotech, b) nahrazením podávacího kotouče pásem a opěrnou deskou, c) volným úzkým pásem při otáčení obrobku, d) na kontaktním kotouči, e) na volném pásu, f) pás je přitlačován k obrobku [18]

Honovací a superfinišovací kameny - mají podobnou strukturu jako brusné nástroje. K povrchu jsou přitlačovány pouze malou silou. I při této malé síle se musí zrna lámat a vylamovat, aby u nich byl zajištěn proces samoostření. Nejčastěji používanými brusivy jsou diamant a nitrid boru. [13]



Obrázek 7: Honovací a superfinišovací kameny [23]

Honování je dokončovací metoda obrábění. V honovací hlavě jsou umístěny honovací kameny, ve kterých je vázáno jemné brusivo. Je nutno používat řeznou kapalinu. Nejčastěji se používá vnitřní honování, při kterém se honují vnitřní válcové plochy. Je ovlivněné rotační rychlostí honovací hlavy v_c , posuvným pohybem ve směru osy honování v_f a velikostí tlaku p_k , kterým je honovací hlava přitlačována. [18]

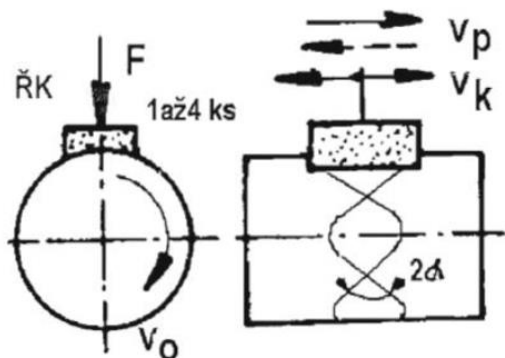
Tabulka 2: Doporučené řezné podmínky pro honování [21]

Materiál	Operace	Brusivo					
		Diamant, KNB			Umělý korund, karbid křemíku		
		v_c [m/min]	v_f [m/min]	p_k [MPa]	v_c [m/min]	v_f [m/min]	p_k [MPa]
Nekalená ocel	hrubování	25 ÷ 35	6 ÷ 12	0,4 ÷ 0,6	15 ÷ 30	8 ÷ 12	0,4 ÷ 0,8
	dokončování	25 ÷ 35	3 ÷ 8	0,2 ÷ 0,4	10 ÷ 30	5 ÷ 7	0,2 ÷ 0,4
Kalená ocel	hrubování	40 ÷ 50	5 ÷ 8	0,8 ÷ 1,4	20 ÷ 40	5 ÷ 8	1,0 ÷ 1,5
	dokončování	40 ÷ 55	4 ÷ 6	0,4 ÷ 0,8	20 ÷ 30	4 ÷ 7	0,6 ÷ 1,0
Litina	hrubování	50 ÷ 80	15 ÷ 18	0,8 ÷ 1,5	40 ÷ 80	12 ÷ 22	0,8 ÷ 1,4
	dokončování	40 ÷ 70	8 ÷ 16	0,4 ÷ 0,9	30 ÷ 50	8 ÷ 15	0,3 ÷ 0,8
Bronz	dokončování				40 ÷ 70	4 ÷ 8	0,3 ÷ 0,5
Tvrdé povlaky	dokončování	20 ÷ 25	10 ÷ 12	0,3 ÷ 0,4			

Superfinašování je velice efektivní dokončovací metoda. Je ovlivněno rychlostí kmitavého pohybu v_k , obvodovou rychlostí obrobku v_o , velikostí přitlačné síly F a viskozitou řezné kapaliny (nejčastěji petrolej). Úhel křížení α určuje řezivost kamene (tím i velikost úběru), Největší úběr je při 40 až 60° a obrobek má matný povrch, při menším úhlu je povrch více lesklý. [18]

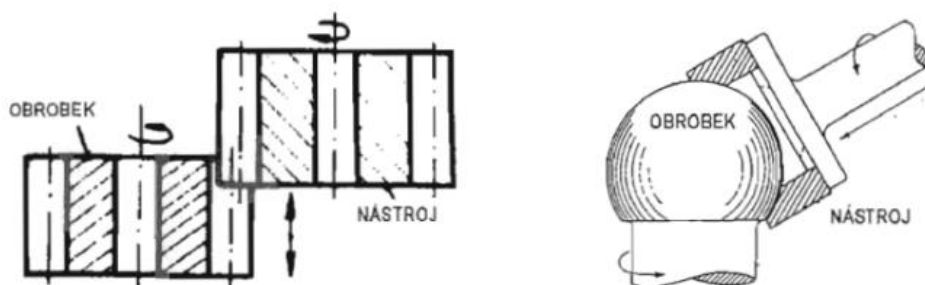
Tabulka 3: Řezné podmínky a přídavky pro superfinašování [21]

Drsnost povrchu R_a [μm]		Přídavek [μm]	Operace	Úhel křížení stop 2α [°]	Poměr v_w/v_k
požadovaná	výchozí				
0,16	1,6	10 ÷ 12	1	80 ÷ 110	0,8 ÷ 1,2
0,08	0,8	5 ÷ 8	2	40 ÷ 70	1,5 ÷ 2,5
0,04	0,4	4 ÷ 5	3	20 ÷ 40	3 ÷ 12
0,02	0,2	2 ÷ 3	4	méně než 20	12 ÷ 28



Obrázek 8: Schéma superfinašování [18]

Lapovací nástroje – používají se při lapování. Lapování je nejlepší metoda dokončovacího obrábění (přesnost 0,1 až 0,5 μm ; R_a až 0,01 až 0,15 μm). Principem je úběr materiálu pomocí volného brusiva, které se přivádí mezi vzájemně se pohybující obrobek a lapovací nástroj. [18]



Obrázek 9: Lapování tvarových ploch [18]

Tabulka 4: Brusiva pro lapování [21]

Lapovaný materiál	Brusivo
Ocel	umělý korund
Litina, keramika, sklo	karbid křemíku
Zvláště tvrdé materiály (SK, RO)	karbid bóru, kubický nitrid bóru, diamant
Měkké materiály	oxid železitý Fe_2O_3 oxid chromitý Cr_2O_3 vídeňské vápno $CaMgCO_3$ hydroxid železitý $Fe(OH)_3$

Pro porovnání je uvedena tabulka dosahovaných parametrů u broušení, lapování, superfinišování a honování. Nejlepších parametrů lze dosáhnout samozřejmě jen s kvalitními nástroji určenými pro konkrétní aplikaci.

Tabulka 5: Dosahované parametry obrobených ploch pro abrazivní metody obrábění [19]

Obráběné plochy	Metoda obrábění		Přesnost rozměrů IT		Drsnost povrchu Ra [μm]	
			střední	rozsah	střední	rozsah
vnější rotační	Broušení	hrubovací	10	9 ÷ 11	2,40	0,80 ÷ 3,20
		dokončovací	5	5 ÷ 6	0,40	0,20 ÷ 0,60
		jemné	4	3 ÷ 5	0,20	0,05 ÷ 0,40
	Lapování	dokončovací	4	3 ÷ 4	0,10	0,05 ÷ 0,20
		jemné	2	1 ÷ 2	0,03	0,01 ÷ 0,05
	Superfinišování	dokončovací	4	3 ÷ 5	0,20	0,05 ÷ 0,40
		jemné	3	2 ÷ 4	0,06	0,02 ÷ 0,10
vnitřní rotační	Broušení	hrubovací	10	9 ÷ 11	2,40	1,60 ÷ 3,20
		dokončovací	6	5 ÷ 7	0,80	0,40 ÷ 1,60
		jemné	5	3 ÷ 6	0,20	0,05 ÷ 0,40
	Honování	hrubovací	7	6 ÷ 8	0,40	0,20 ÷ 0,80
		dokončovací	6	5 ÷ 7	0,15	0,10 ÷ 0,20
		jemné	4	3 ÷ 5	0,07	0,05 ÷ 0,10
	Lapování	dokončovací	4	3 ÷ 5	0,20	0,01 ÷ 0,40
jemné		2	1 ÷ 3	0,03	0,01 ÷ 0,05	
rovinné	Broušení	hrubovací	10	9 ÷ 11	2,40	1,60 ÷ 3,20
		dokončovací	6	5 ÷ 7	0,80	0,40 ÷ 1,60
		jemné	5	3 ÷ 6	0,20	0,05 ÷ 0,40
	Lapování	dokončovací	4	3 ÷ 5	0,20	0,10 ÷ 0,40
		jemné	2	1 ÷ 3	0,03	0,01 ÷ 0,05

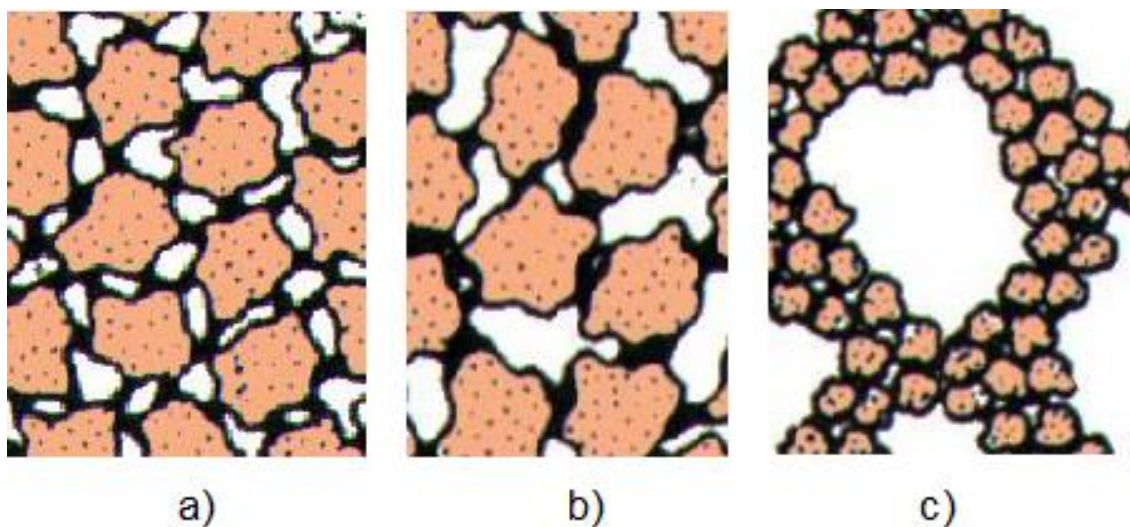
3 Broušící kotouče

3.1 Sloh

Struktura (neboli sloh) vyjadřuje vzdálenost mezi brusnými zrny kotouče. U značení platí: čím větší číslo struktury, tím větší jsou póry v kotouči (1-15). Hutný kotouč má malou vzdálenost mezi zrny, malou zubovou mezeru. Pórovitý kotouč má naopak zrna dál od sebe, velkou zubovou mezeru. Struktura určuje poměr brusných zrn, pojiva a pórů v 1 cm³. Čím vyšší je číslo, tím je vzdálenost mezi zrny větší. Při obrábění musí být mezi jednotlivými zrny dostatek místa (pórů), aby se třísky nepřechovaly a zrna mohla volně vypadávat. [4], [17]

Tabulka 6: Značení slohu (pórovitosti) broušících nástrojů [17]

Označení slohu	Název	Pórovitost
1, 2	velmi hutný	5 – 10 %
3, 4	hutný	10 – 20 %
5, 6	polohutný	20 – 30 %
7, 8	pórovitý	30 – 40 %
9, 10	velmi pórovitý	40 – 50 %
11, 12, 13, 14, 15	zvlášť pórovitý	nad 50 %



Obrázek 10: Struktura kotoučů: a) hutná, b) pórovitá, c) vysoce pórovitá [20]

Obecně platí:

- čím tvrdší a křehčí je materiál, tím hutnější kotouč
- čím větší je dotyková plocha, tím pórovitější kotouč
- čím je větší množství odebraného materiálu, tím pórovitější nástroj, aby se nezanášel [4]

3.2 Tvrdost

Tvrdost je vlastnost, která charakterizuje odpor brusných zrn proti vylomení z nástroje, tudíž závisí zejména na pevnosti pojiva. Charakterizuje houževnatost a pružnost můstků mezi jednotlivými zrny brusiva, tedy uvolňování otupených zrn z nástroje. U měkkých kotoučů dochází k uvolňování zrn snadněji než u tvrdých. Zrno se má vylomit, až pokud je otupeno. Pokud se vylomí dříve, je kotouč pořád ostrý, ale dochází k velkému opotřebení. Pokud se vylomí později, je pojivo příliš tvrdé a zrna se musí odstranit pomocí orovnače. Tvrdost tedy označuje schopnost udržet zrna ve vazbě, nesouvisí s tvrdostí zrn. [8]

Tvrdost kotouče můžeme částečně ovlivnit změnou obvodové rychlosti. Čím větší je obvodová rychlost, tím se kotouč jeví jako tvrdší. Díky větší rychlosti bere každé zrno menší třísku, čímž se zmenšuje tlak na jednotlivá zrna, takže se tupé zrno nemusí vylomit, kotouč se zanáší a pálí. Naopak je to při nízké obvodové rychlosti. Tloušťky třísek jsou větší, tlaky na zrna také a kotouč se rychleji opotřebí. Tento jev nastává při zmenšení průměru kotouče během broušení, čímž dochází ke snižování kvality broušeného povrchu. Kotouč má ale studenější výbrus. Zmenšíme-li obvodovou rychlost o 5 m/s, dosáhneme přibližně stejného účinku, jako bychom zmenšili tvrdost kotouče o jeden stupeň. Kotouč může působit jako tvrdší i pokud je nevyvážený a chvěje se. [17]

Tabulka 7: Značení tvrdosti broušících nástrojů [17]

Označení	Název
G, H	velmi měkký
I, J, K	měkký
L, M, N, O	střední
P, Q, R, S	tvrdý
T, U	velmi tvrdý
V, W, Z	zvlášť tvrdý

3.3 Pojiva

Pojivem rozumíme látku, která drží brusná zrna pohromadě. Stmeluje je do požadovaného tvaru, rozměru. Zaručuje také vhodnou mechanickou pevnost. Má výrazný vliv na již zmíněné samoostření nástroje, tím že může zajistit uvolnění opotřebených a tupých zrn. Pojivo musí dále například odolávat teplotním vlivům během broušení, nebo vlivům (zejména chemickým) od chladicí kapaliny. Nemá broušící účinky. [6]

Kotouče mohou být zpevněny textilní nebo sklotextilní výztuží, která zvyšuje pevnost kotouče a tím i jeho maximální použitelnou řeznou rychlost. To, že je použita výztuž, poznáme podle toho, že u značení pojiva je připojeno písmeno F (například RF značí pryžové pojivo s textilní

výztuží). Dále v textu jsou uvedeny některé nejčastější obvodové rychlosti kotoučů, ale vždy je potřeba dodržet maximální dovolené hodnoty, které určuje výrobce. Tyto hodnoty se nesmí nikdy překročit. [17]

3.3.1 Anorganická pojiva

Keramické pojivo (značení V) je nejčastěji používané pojivo u většiny brousicích nástrojů. Skládá se z keramických surovin, jako jsou například živec či kaolin. Jeho výhodou je univerzálnost. Navíc umožňuje odstupňování tvrdosti, má velkou pórovitost a je netečný vůči vodě, olejům a jiným chemickým látkám. Nevýhodou je jeho křehkost, což vede k citlivosti nástrojů na nárazy. Kotouče se vyrábí lisováním a pēchováním směsi brusiva, pojiva a přísad ve formách. Poté se směsi vypalují při teplotách dosahujících až 1400 °C. Zvládne obvodové rychlosti 35 až 50 m/s. [6]

Silikátové pojivo (značení S) je směs vodního skla, živce, kaolinu a plavené křídly. Je méně pevné než keramické pojivo, zato je pružnější. Brousicí kotouč se nechává vysušit po dobu až 30 hodin a následně se vytvrzuje při teplotách okolo 300°C. Brusná zrna se snadno vylamují a mají studený řez. To se využívá při broušení, při kterém máme velkou stykovou plochu, a tudíž velký potenciální zdroj tepla. Nástroje se používají například v nožířství nebo na ostření dřevoobráběcích nástrojů. [6]

Magnezitové pojivo (značení Mg) se z anorganických pojiv používá nejméně. Jedná se o směs uhličitanu hořečnatého, chloridu hořečnatého a vody. Kotouče jsou vhodné pouze pro broušení za sucha. Nesnáší vlhkost ani velké teploty. Kotouče se vyrábí do průměru 2 m. Toto pojivo je vhodné pro jemný výbrus. Kotouče mají nižší pevnost, a proto lze použít pro obvodové rychlosti do 20 m/s. [6], [17].

Kovové pojivo se používá převážně pro diamantové nástroje. [6]

3.3.2 Organická pojiva

Pryž (značení R) se vyrábí z kaučuku (jak z přírodního, tak i ze syntetického), síry a urychlovačů vytvrzování. Používá se pro kotouče, které musí odolat velkým silám a obvodovým rychlostem. Je vhodná pro velmi tenké kotouče na řezání, broušení a leštění. [6]

Šelak (značení E) je přírodní pryskyřice. Je vhodný pro tenké kotouče. Při vysokých teplotách se může stát lepkavým, což má za následek zahlcování kotouče vlivem ucpávání pórů. [6]

Umělá pryskyřice (značení B) neboli bakelit se vyrábí z fenolu a formaldehydu. Vyztužuje se textilními vlákny (bavlnou, plátnem), čímž kotouče získají velkou výkonnost a

univerzálnost. Používají se do řezacích kotoučů, na kotouče pro hrubé obrušování i čištění, i pro lapovací kotouče. [6]

Tabulka 8: Druhy pojiva brousících nástrojů [17]

Označení	Druh pojiva
V	keramické
S	silikátové
Mg	magnezitové
E	šelak
B	umělá pryskyřice
R	pryž
G	klih

3.4 Zrnitost

Zrnitost značí velikosti použitých zrn v materiálu brousícího nástroje. Zrnitost brusných prášků se stanovuje prosíváním přes síta s různou velikostí otvorů. U jemnějších zrn se zrnitost stanovuje plavením. Zrnitost brousícího kotouče se volí podle předepsané drsnosti a kvality povrchu. Čím větší může drsnost povrchu být, tím větší volíme zrnitost kotouče. Větší zrnitost volíme, i pokud bereme větší úběry a pokud brousíme měkké a houževnaté materiály jako jsou měď, mosaz či hliník. [7], [17]

Dnes jsou všechny starší normy nahrazeny mezinárodní normou FEPA „F“ 42-D-1986, ve které platí, že čím je údaj o zrnitosti menší, tím je zrno (a také kontrolní síto) hrubější. Dříve se však používala starší norma ČSN 22 4012, ve které byl význam přesně obrácený (zrnitost byla vyjadřována v rozměrech brousících zrn). [17]

Tabulka 9: Zrnitost brousících materiálů [17]

Zrnitost (dle FEPA)	Název
7, 8, 10, 12	velmi hrubá
14, 16, 20, 22, 24, 30	hrubá
36, 40, 46, 54, 60	střední
70, 80, 90, 100, 120	jemná
150, 180, 220, 240	velmi jemná
280, 320, 400, 500, 600	zvlášť jemná
800, 1000, 1200	extra jemná

Tabulka 10: Závislost dosažitelné drsnosti na použité zrnitosti brusiva [17]

Zrnitost brusiva kotouče	Drsnost povrchu Ra (μm)
500 – 220	0,05 – 0,2
150 – 80	0,10 – 0,8
60 – 30	0,40 – 1,6
22 – 10	nad 1,6

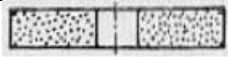
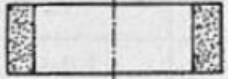
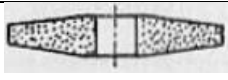
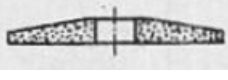
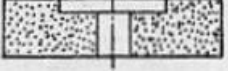
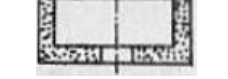

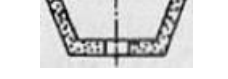
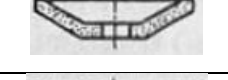


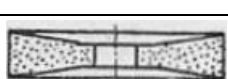

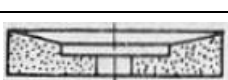
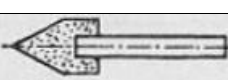

Tabulka 11: Převodní tabulka FEPA "F" a starší ČSN 22 4012 [17]

Označení dle FEPA „F“ 42-D-1986 a současné ČSN 22 4012	Dřívější značení podle starší ČSN 22 4012	Měrný rozměr zrna v mikrometrech
7		3350 – 2800
8	250	2800 – 2360
10	200	2360 – 2000
12	160	2000 – 1700
14	125	1700 – 1400
16	119	1400 – 1180
20	100	1180 – 1000
22	80	1000 – 850
24	71	850 – 710
30	63	710 – 600
36	50	600 – 500
40	40	500 – 425
46	35	425 – 355
54	32	355 – 300
60	25	300 – 250
70	20	250 – 212
80	16	212 – 180
90	13	180 – 150
100	12	150 – 125
120	10	125 – 106
150	8	106 – 90
180	7	90 – 75
220	6	75 – 63
240	5	63 – 53
280	4	53 – 45
320	3	45 – 32
400	M 32	17,5 – 15,5
500	M 22	13,3 – 11,3
600	M 15	10,0 – 8,0
800	M 10	7,3 – 5,3
1000	M 7	5,3 – 3,7
1200	M 5	3,6 – 2,6

3.5 Tvary brousicích kotoučů

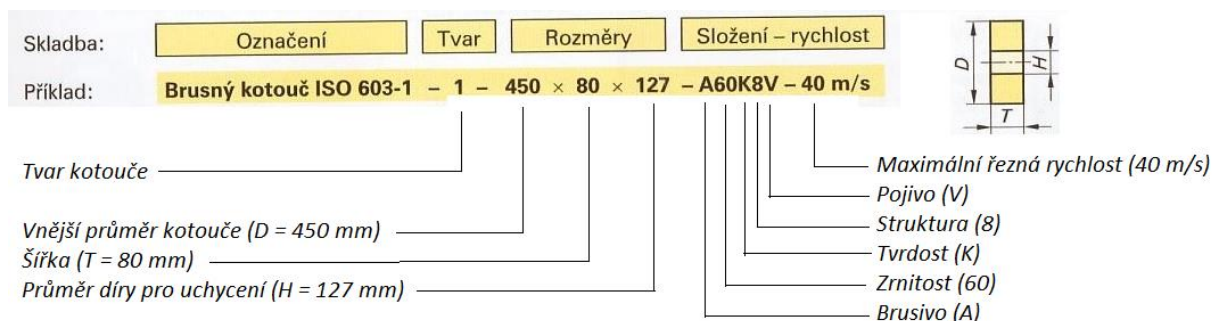
Geometrické tvary a rozměry kotoučů jsou normalizovány dle příslušné normy. Mezi nejběžnější typy patří: rovný (plochý), jednostranně kuželový, s jednostranným vybráním, prstencový, hrncový, talířový atd. [9] Tyto a některé další tvary jsou uvedeny v tabulce:

Tabulka 12: Přehled tvarů brousicích kotoučů [16]

Tvar č.	Náčrt	Název	Odpovídá ČSN
1		rovný	22 4515, 22 4513
2		prstencový	22 4530
3		oboustranně zkosený	
4		jednostranně zkosený	22 4560
5		jednostranně vybráný	22 4520, 22 4521, 22 4524
6		hrncový	22 4550 22 4551
7		oboustranně vybráný	22 4524
8		miskový	22 4552
9		talířový	22 4580
10		talířový plochý	
11		rovný s vydutým středem	
12		rovný s jednostranným šikmým vybráním	
13		rovný s oboustranným šikmým vybráním	
14		na třmenové kalibry	22 4570
15		rovný s vybráním a úkošem na jedné nebo obou stranách	22 4522
16		brusná tělíska	22 4610 až 22 4619

3.6 Značení brousicích nástrojů

Každý brousicí nástroj je charakterizován svými parametry, které jsou uvedeny výrobcem. Na štítku jsou uvedeny údaje o tvaru, rozměrech, brusivu, tvrdosti, zrnitosti, pojivu, pórovitosti a maximální řezné rychlosti.



Obrázek 11: Příklad označení brousicího kotouče [10]

3.7 Trvanlivost brousicích kotoučů

Při broušení dochází k opotřebení pracovní plochy kotouče. Průběh opotřebení závisí na podmínkách broušení a vlastnostech brousicího kotouče (tvrdost, tvar, druh pojiva, atd.). Podle podmínek může dojít buď k otupení nebo samoostření kotouče. Brousicí kotouč se během obrábění otupuje, zrna se štěpí a postupně zaoblují, čímž dochází ke ztrátě řezivosti. K samoostření dochází vylomením otupeného zrna vlivem velkých řezných sil, přičemž po vylomení začne pracovat nové ostré zrno. [1]

4 Klasické broušící materiály

Nejdůležitější vlastností broušících materiálů neboli abraziv, je tvrdost. Je důležité, aby tvrdost zůstávala zachována i za vysokých teplot, a aby abrazivo chemicky nereagovalo a nedifundovalo do obrobku. Tvrdost většiny abraziv klesá s teplotou. Výjimkou je SiO_2 , které zpevňuje svou strukturu vlivem vyšších teplot (obr. 26). Měkká brusiva jsou obvykle nevhodná pro výrobu broušících kotoučů, ale nacházejí využití jako leštící materiály. [12]

4.1 Přírodní broušící materiály

Mezi přírodní broušící materiály lze zařadit pemzu, břidlici, pískovec, křemen, chalcedon, smirek, přírodní korund a diamant. Přírodní brusiva se používají například na výrobu brusných plátén. Saháme k nim, i pokud jsou levnější než umělé broušící materiály nebo pokud s nimi nelze dosáhnout stejných výsledků jako s umělými. Houževnatost a především tvrdost je u přírodních brusiv podstatně nižší než u umělých brusiv, výjimkou je diamant, jehož vlastnosti se příliš neliší. [5], [14]

Pískovec může být měkká i tvrdá hornina složená převážně z křemenných zrn (SiO_2). Zrna jsou spojena přírodními cementy (jílovitým, křemičitým, vápenitým). Je to nejstarší broušící materiál. Mezi jeho hlavní výhody patří studený výbrus a výborná samoostřicí schopnost. Jedná se zpravidla o tzv. vodní broušící kámen, což znamená, že při broušení se jako chlazení používá voda. [17]

Břidlice je usazená hornina, která může mít různé složení a různou velikost. Pro brusičské účely se využívá pouze homogenní břidlice s velkým obsahem SiO_2 . Používá se na výrobu jemných dokončovacích obtahovacích kamenů. Jako chlazení je vhodný řidší olej nebo olej s petrolejem. Existují ale i tzv. vodní břidlice. [17]

Chalcedon je hornina obsahující až 99,5% SiO_2 . Homogenní kusy této horniny lze nalézt v USA ve státě Arkansas. Používá se na výrobu broušků. Nejlepší je druh ARKANSAS, který je velmi tvrdý a jemný, barvu má nejčastěji bílou. Další druhem chalcedonu je druh MISSISSIPPI, který je ale méně kvalitní (je měkčí, hrubší – má vyšší zrnitost). Můžeme se setkat i s modifikací – chalcedon s jemnozrnným křemenem, známý pod názvem pazourek. Pazourek byl již od pravěku používán jako zbraň či křesadlo, ale především pro brusičské účely. I dnes se využívá na výrobu brusného plátna a na výrobu brusných papírů pro broušení dřevěných výrobků. [17]

Smirek je minerál na bázi krystalického oxidu hlinitého, obsahující ne více než 60% Al_2O_3 . Kvůli obsahu příměsí klesají v porovnání s korundem jeho brusné vlastnosti. I dnes někteří výrobci brusiva používají drcený smirek na výrobu broušících papírů. [1], [17]

Korund je minerál skládající se hlavně z krystalického oxidu hlinitého Al_2O_3 , který krystaluje v klencové soustavě. Je to velmi tvrdý (tvrdost korundu na Mohsově stupnici dosahuje číslo 9) a nepříliš křehký materiál. V přírodě se nachází mnoho druhů korundu. Je vhodný pro broušení oceli, oceli na odlitky, temperované litiny a tvrdého bronzu. [5], [15]

Křemen je minerál, který obsahuje hlavně oxid křemičitý (SiO_2) a další příměsi. [1]

4.2 Umělé brousicí materiály

Mezi umělé brousicí materiály patří umělý korund, monokorund, karbid křemíku, karbid boru, kubický nitrid boru a umělý diamant. Používají se převážně na výrobu brousících a obráběcích nástrojů. Dosahované obvodové rychlosti brousícího kotouče se pohybují v rozmezí 20 až 50 m/s. [1], [25]

Umělý korund se získává přetavováním Al_2O_3 v obloukových elektrických pecích. Poté se nechávají vychladnout, rozbijí se na částičky, které se v drtičkách drtí na zrno a prášek. Používá se stejně jako přírodní korund na broušení ocelí, ocelí na odlitky, temperované litiny a tvrdého bronzu. Je to nejběžnější brousicí materiál. Existuje několik druhů: A99 (bílý), A98 (růžový), A97 (speciální), A96 (hnědý) a A85 (černý), kde číslice za A udává kolik procent Al_2O_3 daná varianta obsahuje. [1], [5], [11],

Slinutý korund je vyráběn z jemnozrnného korundu. Má vysokou tvrdost a vhodnou krystalickou strukturu. Jeho zrna nejsou spojena pojivem, jako tomu bývá u většiny brousících materiálů, ale jsou do sebe navzájem vtlačena lisováním. Pokud lisujeme menší silou, vytvoří se na nástroji póry, které lze napustit olejem. Používá se na výrobu obtahovacích a lapovacích pilníků, které jsou využívány pro jemnou mechaniku v nejrůznějších oborech. Lze je také využít jako přiměřenou náhradu za přírodní kameny ARKANSAS a MISSISSIPPI. [17]

Karbid křemíku (SiC) je sloučenina křemíku s uhlíkem. Je znám i pod obchodním označením KARBORUNDUM. Vyrábí se v elektrických pecích. Je tvrdší než korund. Surovinou k výrobě je křemenný písek a látky obsahující uhlík (koks a antracit). Používá se na broušení litin, velmi tvrdých a křehkých materiálů (slnuté karbidy), mědi, hliníku a dalších. Značí se: C49 (zelený), C48 (šedý), C47 (černý), kde číslice za C udává procentuální zastoupení uhlíku. [1], [5], [11]

Karbid boru (B_4C) je sloučenina boru a uhlíku. Obsahuje krystalický karbid boru a malé množství příměsí. Výroba probíhá v elektrických pecích z technické kyseliny borité a uhličitého materiálu. Tím vznikají malé a velmi tvrdé krystaly. Bývá používán jako náhražka diamantového prášku. [1], [5]

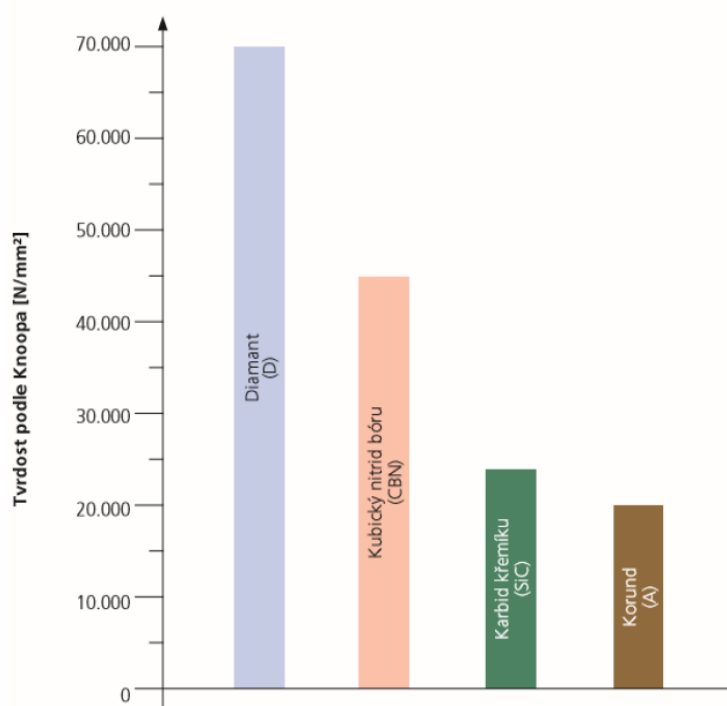
5 Moderní broušící materiály

5.1 Supertvrdé broušící materiály

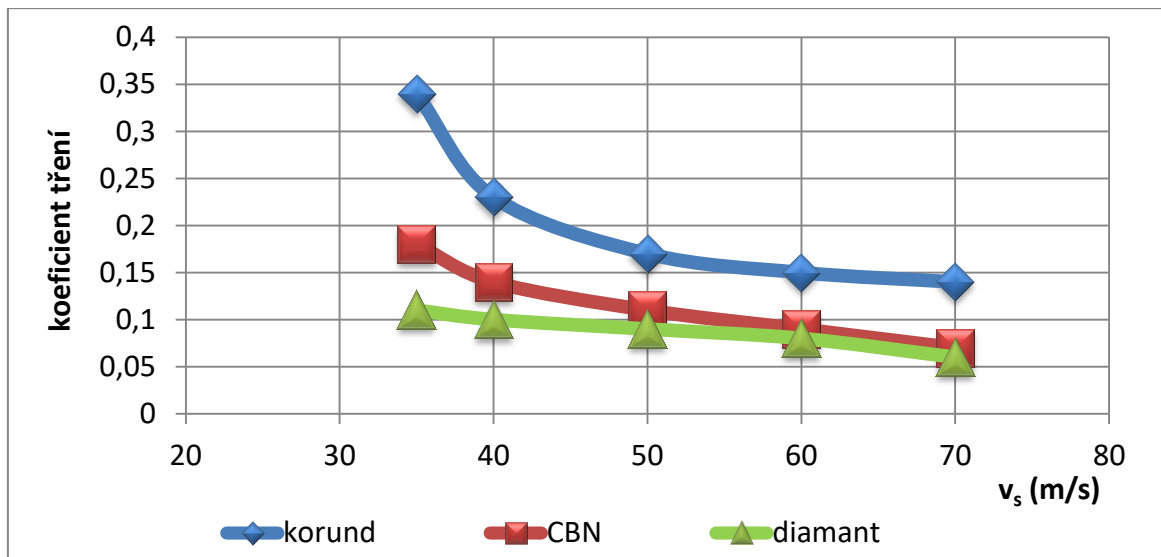
Diamant a kubický nitrid boru jsou mnohem tvrdší (obr. 12), mají mnohem ostřejší zrna (vznikají menší třecí síly, viz obr. 13) a mají mnohem pravidelnější zrna než konvenční broušící materiály, proto je nazýváme superabrazivy. Jsou mnohem dražší než klasická abraziva. Přesto jsou v praxi využívána zejména ze dvou hlavních důvodů. Tím prvním je, že v některých případech je broušení možné pouze těmito supertvrdými materiály. Druhým důvodem je, že superabraziva vydrží déle a zkrátí broušící čas, což ve výsledku sníží výrobní náklady. Používají se v celé škále broušících rychlostí, ale kvůli dosahování vysoké produktivity se používají zejména při vyšších rychlostech. [12], [25]

Tepelná vodivost (λ) superabrazivních materiálů je velmi vysoká, ale silně závisí na čistotě materiálu. Čím je materiál čistší, tím je tepelně odolnější. Pokud se v těchto supertvrdých materiálech vyskytne jiná částice, prudce se sníží jejich tepelná vodivost, ale i přesto je pořád výrazně vyšší v porovnání s konvenčními abrazivy. [12]

Spotřebovaná energie je menší než u klasických broušících materiálů, když používáme velmi ostré kotouče z KNB nebo z diamantu. Ostrá zrna snadněji pronikají do materiálu. Důkazem ostroty zrn je vysoký poměr broušících sil $\mu = F_t/F_n$. Tangenciální síla F_t je síla, která přímo odebrává obráběný materiál, zatímco normálová síla F_n zaručuje proniknutí zrn do obrobku. Otupené kolo tedy způsobí větší nárůst normálové síly, než síly tangenciální (obr. 3). [12]



Obrázek 12: Porovnání tvrdosti brusiva podle Knoopu [21]



Obrázek 13: Závislost koeficientu tření na druhu zrna a rychlosti kotouče [25]

5.1.1 Kubický nitrid boru (KNB)

Kubický nitrid boru (N_2B_3 , anglická zkratka CBN) je sloučenina boru a dusíku. Hned po diamantu je nejtvrdší ze všech brusiv. Krystalická mřížka má stejnou stavbu jako diamant, ale obsahuje atomy boru a dusíku a je trochu větší. V porovnání s diamantem má mnohem větší chemickou stálost, zejména pokud jde o obrábění železa, což značně zvyšuje jeho použití. Používá se na broušení nástrojových ocelí, rychlořezných ocelí a nástrojů. [1], [5]

Postupně začíná vytlačovat klasická brusiva kvůli vyšší přesnosti při obrábění tvrdých ocelí. Nedochozí k tak rychlému opotřebení jako u klasických abraziv, tím pádem si dokáže lépe udržet svůj tvar a dokáže dělat velmi přesné rozměry. Galvanicky pokovený KNB hrál velkou roli při vývoji vysoko-efektivního hloubkového broušení známého pod anglickou zkratkou HEDG (High Efficiency Deep Grinding). Má tepelnou odolnost přibližně do $1300^\circ C$, protože se na jeho povrchu vytváří tenká vrstva B_2O_3 , která brání další oxidaci. Tato vrstva se ale rozpouští ve vodě. To má za následek to, že pokud použijeme chladicí kapalinu na bázi vody, bude se KNB kotouč opotřebovávat více, než při použití čistě olejových kapalin. Při broušení slitin titanu, které se používají v leteckém průmyslu, ubývá KNB kotouč 5x rychleji než diamantový, vlivem chemicko-tepelné degradace. Při vyšších teplotách dochází k přeměně krystalické mřížky na hexagonální, která má podstatně menší tvrdost. [12]

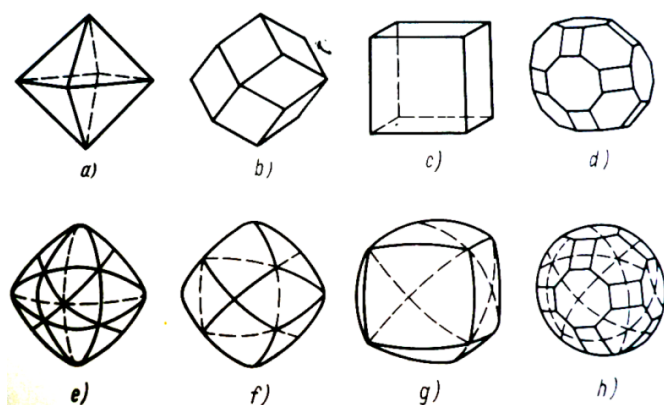
5.1.2 Diamant

Diamant je nejtvrdší známý materiál (v Mohsově stupnici má tvrdost 10) a může být použit na broušení velmi tvrdých materiálů, včetně té nejtvrdší keramiky. Je extrémně odolný vůči mechanickému tření. Mezi jeho hlavní výhody patří i jeho tepelná stabilita, která je kolem $760^\circ C$ ve vzduchu a až $1400^\circ C$ ve vakuu. Nad hranicí $600^\circ C$ začíná měnit svou krystalickou mřížku z krychlové na hexagonální. Diamant je forma uhlíku. Rozpustnost uhlíku v nízkouhlíkatých ocelích způsobuje vysoké opotřebení diamantového brusiva. Tento jev je

navíc urychlován se zvyšující se teplotou. Tyto chemicko-tepelné jevy způsobují rychlý úbytek diamantu, což z něj dělá nevhodné abrazivo pro broušení uhlíkových ocelí a některých slitin niklu. Tepelná vodivost diamantu se pohybuje okolo 140 W/mK, ale při teplotě nad 700°C se výrazně zmenšuje až na 70 W/mK. Je to však stále mnohem více, než u většiny ostatních abraziv (bílý korund 1 až 6 W/mK, karborundum 10 až 15 W/mk , KNB 35 až 120 W/mk) [12], [25]

To ovšem není poslední věc, na kterou bychom si měli dávat pozor. Tvrdost diamantu závisí na směru orientace jednotlivých krystalů, takže je obtížné určit přesnou tvrdost. Diamant má štěpné roviny, kolem kterých je velmi křehký, takže se musíme vyvarovat mechanickým rázům. Ale ani tepelné rázy nesnáší dobře, proto není dobré používat řeznou kapalinu, která okamžitě zchladí rozpálený diamantový kotouč. [12]

Přírodní diamant je uhlík, u něhož došlo působením velkých sil k vytvoření krychlové mřížky. Obvykle neobsahuje velké množství příměsí. Diamantová naleziště jsou velmi vzácná. Nalezené diamanty mají různou velikost, barvu, kvalitu i tvar (obr. 14). [1]



Obrázek 14: Tvar krystalů přírodního diamantu: a) rovnoběžnostěnný osmistěn, b) kosočtvercový dvanáctistěn, c) krychlový, d) kombinovaný s rovinnými stěnami, e) křivostěnný osmistěn, f) křivostěnný dvanáctistěn, g) křivostěnný šestistěn, h) kombinovaný [1]

Používá se ve formě volného brusiva v lapovacích pastách, nebo připevněný pojivem v kotoučích nebo pilnicích. Dále se používá na tvarování a broušení ostatních (zejména tvrdých) brousicích nástrojů a kotoučů, a v neposlední řadě také jako orovnač. Brousí dobře také křehké materiály (šedou litinu, sklo a keramiku). [5], [17]

Umělý diamant se nejčastěji získává katalytickou přeměnou grafitu. Jako katalyzátor se používá kov (chrom, nikl, železo). Katalyzátor se za vysokého tlaku a teploty taví a přeměňuje hexagonální mřížku grafitu na krychlovou. Umělý a přírodní diamant mají velmi podobné vlastnosti i použití. Umělá zrna mají o trochu lepší tvar pro brousicí nástroje, jsou hranatější a ostřejší. [1], [17]

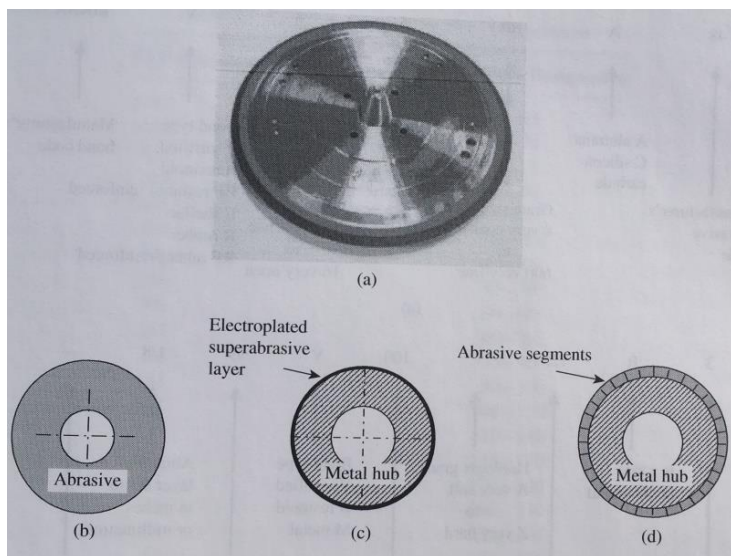
5.1.3 Diamantové a KNB broušící nástroje

Diamantový broušící nástroj má buď monokrystalickou strukturu, pokud se jedná například o nože či orovnače, nebo polykrystalickou, jestliže je ve tvaru kotouče, disku nebo tělíska. [1]

Diamantové broušící kotouče mají tvar rotačního tělesa určitého tvaru. Většinou se skládají z nosné části (oceli, hliníkových slitin nebo plastů), na které je připevněna vrstva diamantu. Malé diamantové kotouče jsou tvořeny pouze vrstvou diamantu. Pracovní vrstva se skládá ze zrn diamantového prášku, pojiva a případně i plniva. Plnivo se přivádá pokud chceme zvýšit pevnost a zlepšit řezné vlastnosti. Pracovní vrstva bývá od nosné části zpravidla oddělena vrstvou, která již neobsahuje diamant, aby se při spotřebování diamantu nepoškodil obráběný povrch. Koncentrace diamantu v pracovní vrstvě určuje produktivitu broušení a trvanlivost diamantového nástroje. [1]

Diamantové broušící kotouče s keramickým (nebo pryžovým) pojivem se používají na broušení obrobků z tvrdých slitin, kobaltových a vanadových rychlořezných ocelí a na ostření nožů s břity ze slinutého karbidu. Výsledné obrobky mají vysokou kvalitu povrchu. Kotouče se nezanášejí a mají výborné řezné vlastnosti. [1]

Diamantové nástroje není vhodné používat za vyšších teplot než je 700°C. Zrna diamantu začínají při této teplotě oxidovat. S rostoucí teplotou se snižuje i měrný elektrický odpor diamantu. Využívanou vlastností diamantu je jeho skvělá leštitelnost, díky které lze získat velmi ostré břity u různých diamantových jedno-krystalových řezných nástrojů (s poloměry břitu řádově ve zlomcích mikrometru). [1]



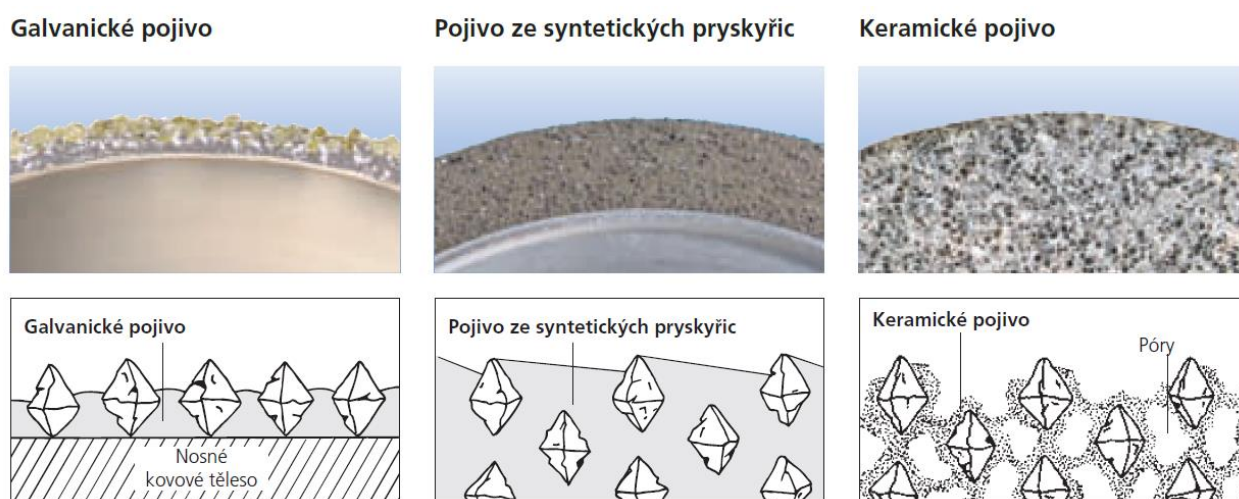
Obrázek 15: a) fotografie vysokorychlostního slinutého KNB kotouče, b) schéma kotouče z konvenčních abraziv, c) schéma jednovrstvého superabrazivního kola, d) schéma segmentového kotouče vhodného pro vysokorychlostní řezání za použití konvenčních abraziv [12]

Jako pojivo diamantových (i KBN) nástrojů se používá buď pojivo galvanické, pojivo ze syntetických pryskyřic, nebo keramické pojivo. [22]

Nástroje s galvanickým pojivem jsou vyznačovány jednovrstvým obložením brusných zrn na kovovém tělese. Mezi jednotlivými zrny je dostatek místa pro zachytávání třísek. Mezi výhody patří například to, že obložení může být nanášeno na takřka libovolný tvar nosného tělesa, a také to, že jednovrstvé obložení je poměrně levné. Volbou zrna lze ovlivnit i vlastnosti a tedy i oblast použití. Na měkké materiály (například umělé hmoty zpevněné skelným vláknem) volíme hrubá zrna, na tvrdé materiály naopak zrna jemná. Nástroje s galvanickým pojivem lze brousit za sucha i za mokra. [22]

Nástroje s pojivem ze syntetických pryskyřic se skládají z brusných zrn, pojiva a plniva. Mezi zrny nejsou póry, protože plnivo je stlačeno. Výhodou jsou velmi vysoké brusné výkony díky malé tvrdosti pojiva nebo chladný výbrus. Často se používají při broušení nástrojů. Brousit se může za sucha i za mokra, ale nástroje pro broušení za mokra se nesmí používat pro broušení za sucha. [22]

Nástroje s keramickým pojivem se skládají z brusných zrn, pojiva a pórů. Pórovitá struktura poskytuje výhodu chladného broušení, lepšího odvodu třísek a lepšího přívodu chladicí kapaliny. Navíc struktura může být přizpůsobena konkrétnímu případu broušení. KBN tělíska s keramickým pojivem se používají například na broušení vnitřních ocelových ploch (velké kontaktní plochy). Tyto nástroje jsou určeny výhradně pro broušení za mokra. Použitím oleje lze zvýšit životnost. [22]



Obrázek 16: Typy pojiv pro diamantové a KBN nástroje [22]

U brusných kotoučů je potřeba ještě znát 2 charakteristické parametry – životnost a produktivnost. Životnost (značeno G-ratio, nebo jen G) je charakterizována poměrem objemu odbroušeného materiálu ku úbytku objemu brusné vrstvy. [28]

$$G = \frac{V_W[\text{mm}^3]}{V_S[\text{mm}^3]} = [-]$$

Samotná životnost nám ale nestačí, protože také může nastat situace, že kotouč sice ubývá pomalu, ale materiál také. Chybí tedy časová závislost. Proto vznikl parametr produktivnosti (značen Q-Prime, nebo Q'_w). Ten určuje maximální možný podélný posuv (závislý na čase) při daném přísluvu (hloubce třísky). [28]

$$Q'_w = \frac{a_e[\text{mm}] * v_t[\text{mm}/\text{min}]}{60} = [\text{mm}^3/\text{mm} * \text{s}]$$

Protože posuv a přísluv si jsou navzájem nepřímo úměrné, můžeme zvýšením posuvu snížit přísluv a naopak. Tento parametr nám ale neříká nic o životnosti kotouče. Proto je potřeba mít oba kvantifikátory Q-ratio a Q-Prime a brát je jako společné veličiny hodnotící kvalitu brousícího kotouče. [28]

Pro rychlejší přehled hlavních oblastí použití KNB a diamantového kotouče je uveden následující obrázek (obr. 17). [28]

Broušený materiál	CBN	Diamant
Rychlořezné oceli (HSS)	■	-
Kalené oceli (nad 56 HRC)	■	-
Cementované oceli	■	-
Vysoce legované oceli	■	-
Litiny (bílé, tvrzená, apod.)	■	-
Návarové materiály typu Stellite	■	-
Žárovzdorné a žárupevné materiály	-	■
Slinutý karbid (SK)	-	■
Keramika, sklo a porcelán	-	■
Kámen	-	■
Drahokamy a polodrahokamy	-	■
Grafit	-	■
Křemík (Si)	-	■
Kompozity (skelná matrice, apod.)	-	■
Polykrystalický diamant, polykrystalický CBN	-	■

Obrázek 17: Použití brusných materiálů z KNB a diamantu [28]

5.1.4 Doporučené řezné podmínky a použití

Jak můžeme vidět (obr. 18, 19, 20) některé doporučené hodnoty se mohou pohybovat ve velkém rozsahu. Proto je vhodné se na konkrétní aplikaci poradit s výrobcem. [28]

	Pryskyřičné				Polymerické		Hybridní	
	za sucha		za mokra		za mokra		za mokra	
	DIA	CBN	DIA	CBN	DIA	CBN	DIA	CBN
Broušení rovinné	14 - 20	20 - 28					16 - 20	18 - 28
Broušení na kulato								
Broušení otvorů	12 - 20		20 - 35	24 - 40	16 - 25	20 - 30		-
Zápichové broušení	14 - 24	25 - 35					16 - 25	20 - 35
Dělení materiálu	12 - 20							-

Způsob broušení	Keramické				Kovové		Galvanické	
	za sucha		za mokra		za mokra		za mokra	
	DIA	CBN	DIA	CBN	DIA	CBN	DIA	CBN
Broušení rovinné								
Broušení na kulato	20 - 30	20 - 35	30 - 50	30 - 125	20 - 30	22 - 50		20 - 30
Broušení otvorů	18 - 30	18 - 30	25 - 50	25 - 60	18 - 28	20 - 35		15 - 30
Zápichové broušení	20 - 30	20 - 35	30 - 50	30 - 80	15 - 28	25 - 40		18 - 30
Dělení materiálu		-		-	20 - 30	25 - 50		30 - 50

Obrázek 18: Doporučené obvodové rychlosti broušících kotoučů z diamantu a KNB podle druhu pojiiva v m/s [28]

Způsob broušení	DIAMANT				CBN			
	D181	D126	D64	D46	B181	B126	B64	B46
Broušení rovinné	0,02 - 0,04	0,01 - 0,02	0,005 - 0,01	0,001-0,005	0,03 - 0,05	0,02 - 0,04	0,01 - 0,015	0,001-0,005
Broušení na kulato	0,01 - 0,03	0,01- 0,02	0,002 - 0,01	0,001-0,005	0,02 - 0,04	0,015-0,025	0,005- 0,1	0,001-0,005
Broušení otvorů	0,005 - 0,02	0,005 - 0,01	0,003-0,005	0,001-0,005	0,01 - 0,025	0,01 - 0,015	0,005 - 0,01	0,001-0,005
Broušení zápichem	0,02 - 0,4	0,01 - 0,03	0,005 - 0,02	0,001-0,005	0,03 - 0,2	0,02 - 0,1	0,01 - 0,03	0,001-0,005
Dělení materiálu	1,5 - 5	1 - 4	0,5 - 3	-	1 - 6	1 - 5	0,5 - 3	-

Obrázek 19: Doporučený přísuv, tj. tříska (a_e) pro kotouče v pryskyřičném pojiivu v mm [28]

Způsob broušení	Rychlost posuvu [m/min]		Obvodová rychlost obrobku [m/min]
	DIA	CBN	
Broušení rovinné	5 - 15	8 - 25	-
Broušení na kulato	0,5 - 2	0,5 - 3	25 - 40
Broušení otvorů	0,2 - 2	0,5 - 3	25 - 40
Broušení rovinné zápichem	0,05 - 0,5	0,1 - 0,6	-
Broušení čelní oscilací	1 - 12	1 - 15	10 - 20
Broušení čelní zápichem	0,1 - 0,6	0,1 - 0,8	15 - 40
Broušení bezhroté	0,5 - 2	1 - 2,5	1 - 8

Obrázek 20: Podélné posuvy (v_t) a obvodové rychlosti obrobku (v_w) při broušení kotouči s pryskyřičným pojiivem [28]

Zejména při výrobě frézovacích nástrojů ze slinutého karbidu nebo HSS se používají speciální kotouče s hybridním, nebo polymerickým pojivem. Hodnoty podélného posuvu a přísluvu volíme v závislosti na rychlosti odbrušování (Q_w).

Přísluv, tj. tříska (a_e) [mm]	Podélný posuv (v_x) [m/min]												
	30	40	50	60	70	80	100	120	140	160	180	200	220
2,6				2,6	3,0	3,5	4,3	5,2	6,1	6,9	7,8	8,7	9,5
2,8				2,8	3,3	3,7	4,7	5,6	6,5	7,5	8,4	9,3	10,3
3,0				3,0	3,5	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0
3,2			2,7	3,2	3,2	4,3	5,3	6,4	7,5	8,5	9,6	10,7	11,7
3,4			2,8	3,4	4,0	4,5	5,7	6,8	7,9	9,1	10,2	11,3	12,5
3,6			3,0	3,6	4,2	4,8	6,0	7,2	8,4	9,6	10,8	12,0	
3,8		2,5	3,1	3,8	4,4	5,1	6,3	7,6	8,9	10,1	11,4	12,7	
4,0		2,7	3,3	4,0	4,5	5,3	6,7	8,0	9,3	10,7	12,0	13,3	
4,2		2,8	3,5	4,2	4,9	5,6	7,0	8,4	9,8	11,2	12,6		
4,4		2,9	3,7	4,4	5,1	5,9	7,3	8,8	10,3	11,7	13,2		
4,6	2,3	3,1			5,4	6,1	7,7	9,2	10,7	12,3			
4,8	2,4	3,2			5,6	6,4	8,0	9,6	11,2	12,8			
5,0	2,5	3,3			5,8	6,7	8,3	10,0	11,7	13,3			
5,5	2,8			5,5	6,4	7,3	9,2	11,0	12,8	14,6			
6,0	3,0			6,0	7,0	8,0	10,0	12,0	14,0	16,0			
6,5	3,3		5,4	6,5	7,6	8,7	10,8	13,0	15,2				
7,0			5,8	7,0	8,2	9,3	11,7	14,0	16,3				

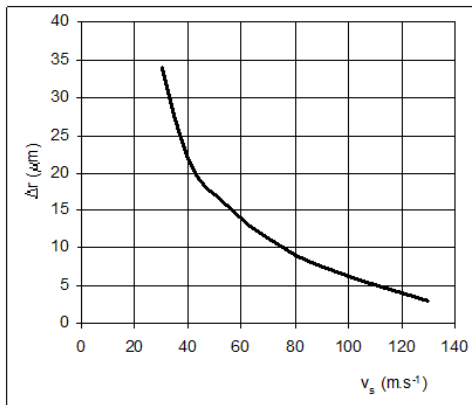
Polymerické (P2P, P3P):	Základní hybrid (HxSx):	Výkonnostní hybrid pro DIA (HxXx, HxPx, HxCx):	Prémiový hybrid pro CBN (HxXx, HxPx):
počáteční stav	počáteční stav	počáteční stav	počáteční stav
optimální stav	optimální stav	optimální stav	optimální stav

Poznámka: malé "x" ve specifikaci pojiva reprezentuje libovolný znak udávající konkrétní skupinu pojiv dle označení v tabulce pojiv

Obrázek 21: Doporučené parametry posuvu a přísluvu v závislosti na rychlosti odbrušování (Q-Prime) [28]

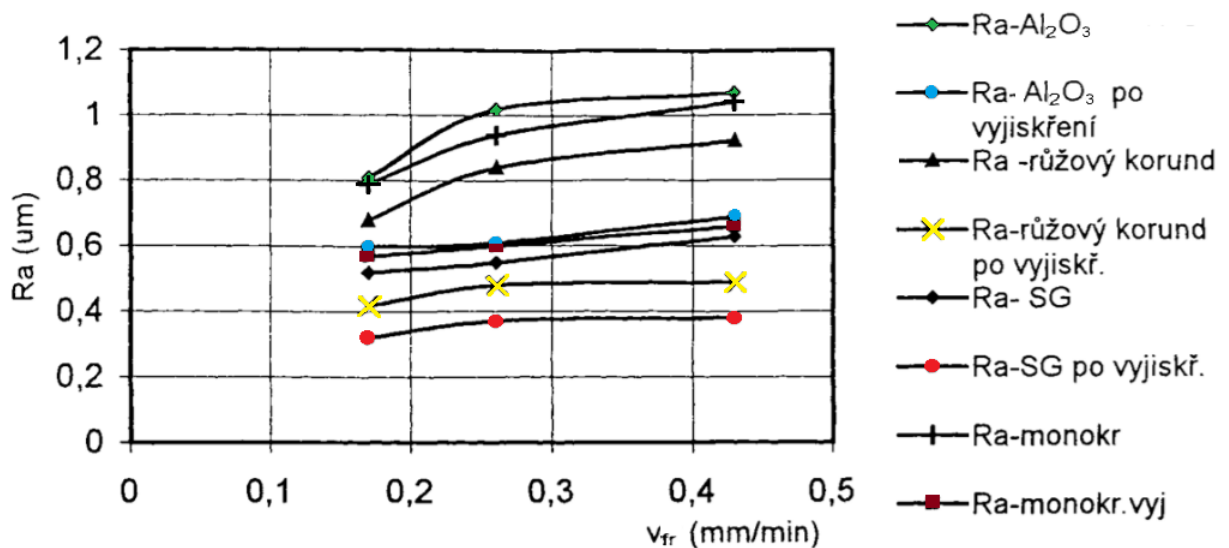
5.2 Inovované brousící materiály

Inovované brousící materiály jsou založeny na bázi Al_2O_3 . Hlavní rozdíl je ve výrobě a fyzikálních vlastnostech. Vyrábí se tzv. Sol-Gel technologií, která je založena na řízené krystalizaci zrn v roztoku. Tato abraziva mají pravidelnější tvar, delší trvanlivost řezných hran, vytváří lepší povrch, snižují spotřebu energie a zvyšují poměrný objemový obrus. V dnešní době mezi ně řadíme SG, TG a DG. TG materiál je tvořen protáhlými hranolovými zrny. Jeho použití je doporučeno na ložiskové oceli. DG materiál vyniká svou schopností samoostření a zvyšováním řezivosti, díky lasturovitému lomu, který nastává při větším zatížení zrn. [25]



Obrázek 22: Závislost opotřeбенí broušícího kotouče na řezné rychlosti [25]

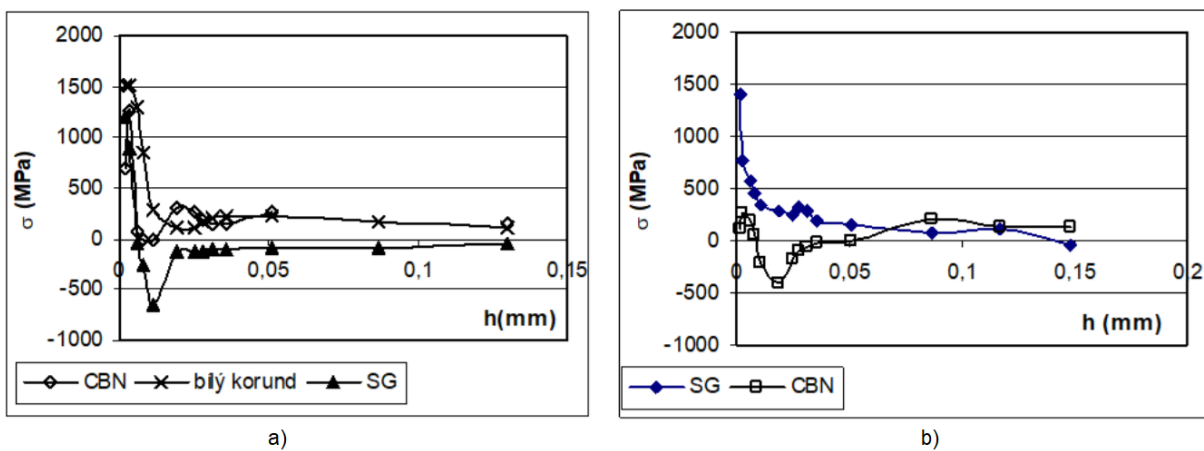
Následující obrázek (obr. 23) porovnává dosažitelnou drsnost povrchu za použití bílého korundu, růžového korundu, monokrystalického krundu a SG abraziva. Broušeným materiálem byla ocel 14 220.4, řezná rychlosti 27m/s. Za těchto parametrů bylo dosaženo nejlepšího povrchu abrazivem SG (přibližně Ra 0,35 μm). Můžeme zde i vidět, jak velký vliv má vyjiskřování na výslednou kvalitu povrchu. [25]



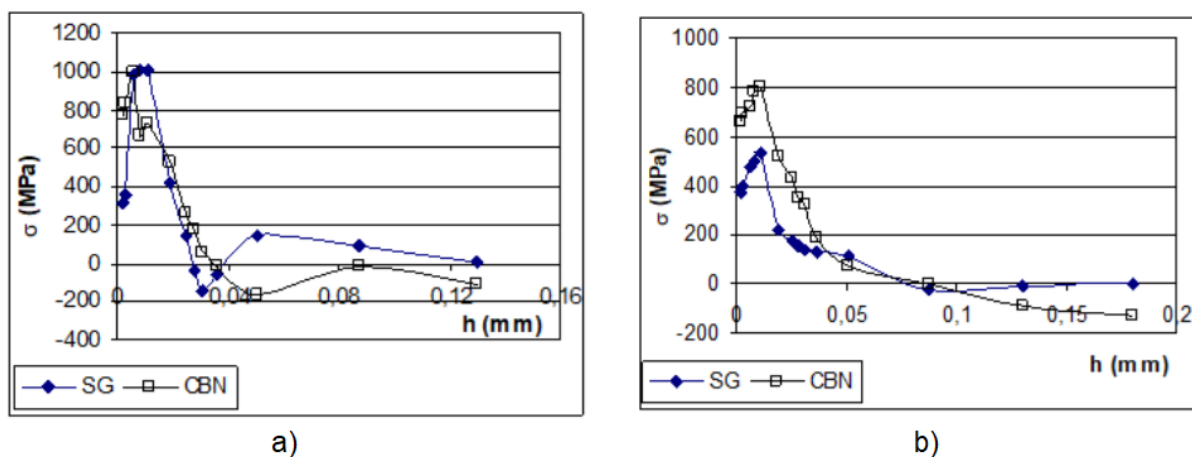
Obrázek 23: Dosažená drsnost povrchu zrný bílého korundu, růžového korundu, monokrystalického krundu a SG [25]

Volbou nástroje ovlivňujeme také velikost zbytkových napětí v obrobku (obr. 24, obr. 25). Tato napětí mohou ovlivňovat vliv technologických vrubů, životnost součástí, korozivzdornost i rozměrovou stálost obrobku. Velikost zbytkových napětí je totiž ovlivněna zejména teplotou a mechanickým zatížením povrchu. Tloušťka ovlivněné vrstvy se pohybuje okolo 0,3 až 0,5 mm. [26]

Na obrázcích 24 a 25 byly zvoleny parametry: $v_s = 35 \text{ m/s}$, $v_{fr} = 0,26 \text{ mm/min}$. Je vidět, že SG může při těchto podmínkách konkurovat KNB, dokonce by se dalo říci, že může být i výhodnější. [26]



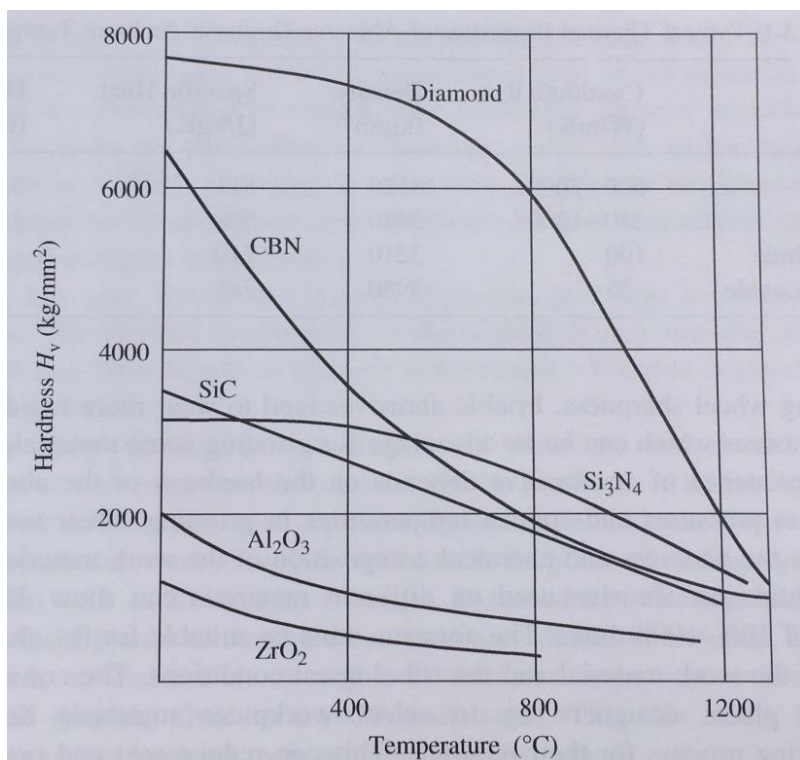
Obrázek 24: Průběh zbytkových napětí po broušení oceli a) 14 109.6, b) 16 420.6 [26]



Obrázek 25: Průběh zbytkových napětí po broušení nástrojové oceli a) 19 802.6, b) 19 824.6 [26]

6 Obtížně brouitelné materiály

Pokud při broušení dochází k velkému nárůstu tepla, roste i vliv tribologicko-chemických interakcí. Materiál považujeme za těžko brouitelný, pokud zůstává stále tvrdý i při vysokých teplotách a navíc má silné interakce s abrazivem (abrazivo rychle ubývá). Mezi tyto materiály můžeme zařadit především slitiny titanu (zejména slitinu Ti-6Al-4V), nebo materiál typu Inconel, nerezové oceli, nebo vysokorychlostní nástrojovou ocel s vysokým obsahem vanadu AISI T-15 (19 858 podle ČSN). [12]



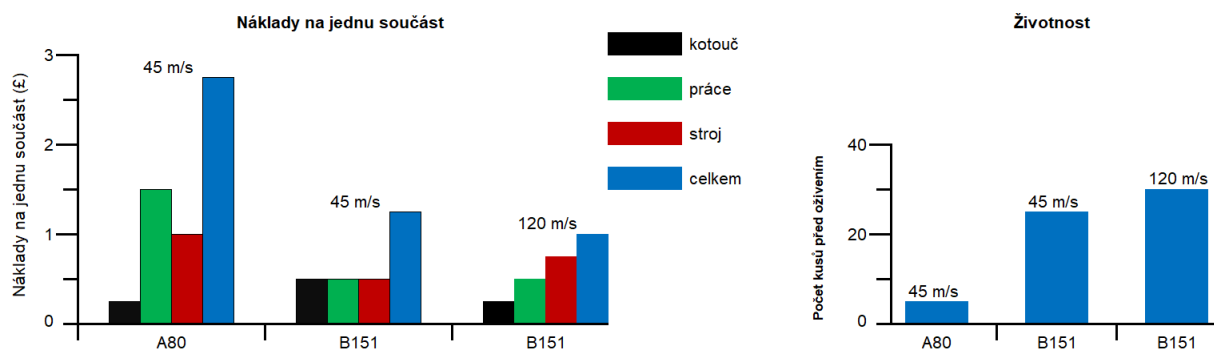
Obrázek 26: Tvrdost typických brousicích materiálů v závislosti na teplotě [12]

Titan je jeden z nově se rozvíjejících a perspektivních materiálů. Jeho broušení se tedy začíná stávat důležitou součástí technologické výroby. Titan je velmi tvrdý materiál, má malou tepelnou vodivost, nízký modul pružnosti a afinitu vůči vzdušnému kyslíku. To znamená, že v místě broušení vznikají vysoké teploty a brousicí nástroj je značně namáhán a opotřebováván, rostou tedy složky řezných sil. Velmi důležitou roli hraje vhodná volba procesní kapaliny, která je nejčastěji přiváděna tlakovým přívodem. [18]

Pro broušení titanu se stále jako hlavní brusivo používá karbid křemíku (SiC). Setkáme se ale i s případy, kdy klasické brousicí kotouče nejsou dostačující, a proto se uchylujeme k supertvrdým brousicím materiálům (KBN a diamant), která svou tvrdostí předčí konvenční brusiva. Volbou supertvrdého brousicího kotouče zlepšíme i kvalitu povrchu obrobku. [18]

Dusík, kyslík, uhlík a železo jsou rozpustné v roztaveném titanu, čímž z něj dělají tvrdší a méně tvárný materiál. Při vysokých teplotách vytváří titan silnou vazbu s Al_2O_3 , nebo s SiC. Při experimentu bylo zjištěno, že při nízkých rychlostech, okolo 17 m/s, vykazovalo abrazivo na bázi Al_2O_3 menší opotřebenění, než abrazivo na bázi SiC. Při zvýšení rychlosti na 32 m/s byla situace přesně obrácená. Bylo zjištěno, že při broušení titanu těmito dvěma abrazivy v nich dochází k mikroštěpení. Materiál v důsledku toho přilne na špičky zrn, dojde k lokálním mikrosvarům, což má za následek zvýšení opotřebenění kotouče. Jako nejvhodnější se na broušení slitiny Ti-6Al-4V ukázal diamant. Jeho opotřebenění bylo mnoho menší i než u KNB, které může reagovat s titanem za vzniku TiB při 1000 °C. Přesto porovnání opotřebenění KNB kotoučů vůči ostatním abrazivům vychází pro KNB velice dobře. [12]

Inconel 718 je slitina, která byla vyvinuta pro kosmické účely, aby si udržela svoje vlastnosti i během výkyvů teplot, což z ní dělá relativně těžko brousitelný materiál. Navíc má tendenci zahlcovat brousící kotouče. Obsahuje velké množství niklu. KNB nereaguje s niklem, což z něj dělá potenciálně velmi dobré abrazivo pro broušení této slitiny. Jako nejvhodnější kombinace se během výzkumu ukázal vysoce porézní kotouč z KNB, použitý za vysoké rychlosti $v_s=120\text{m/s}$. Zvýšením rychlosti kotouče totiž docházelo k lepšímu odvádění třísek, což pomohlo udržovat kontaktní plochu kotouče čistší. Porovnání nákladů a životnosti kotouče je možno vidět na následujícím obrázku. [12]



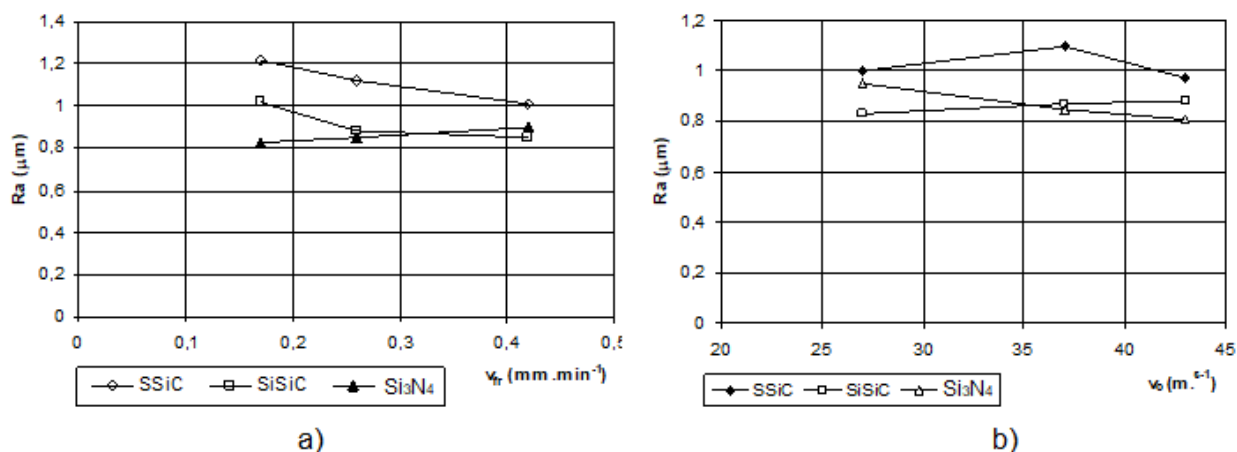
Obrázek 27: Porovnání nákladů životnosti kotouče během broušení materiálu Inconel 718 broušeným různými abrazivy a stroji [12]

Problém broušení **nerezových ocelí** abrazivem s Al_2O_3 spočívá v nahromadění kovu na zrnech, které potom nemohou dobře odebírat materiál. Nerezové oceli obsahují chrom, který na povrchu difunduje a oxiduje na Cr_2O_3 , který se navazuje na hliník. Dospělo se k závěru, že není vhodné používat korund ani karbid křemíku na vysokorychlostní broušení na většinu těchto těžkoobrobitelných materiálů. Na rozdíl od Al_2O_3 je hlavní nevýhodou SiC jeho velké opotřebování v důsledku chemických rozkladů na Si a C. [12]

Obtížnost v broušení **AISI T-15** spočívá v neobvyklé tvrdosti, odolnosti vůči otěru a tepelné stálosti. Ocel obsahuje prvky jako vanad, chrom, wolfram či kobalt. Přidáním sulfidu manganatého (MnS) do této oceli lze výrazně zlepšit její obrobitelnost. T-15 vyrobené práškovou metalurgií se stává mnohem lépe obrobitelným pro bílý korund. [12]

Broušení **wolframové oceli** vyžaduje překonání její vysokoteplotní pevnosti. Odebírání materiálu v tomto případě probíhá primárně drcením. Tento materiál totiž neobsahuje žádná vlákna typická pro tvárné materiály. [12]

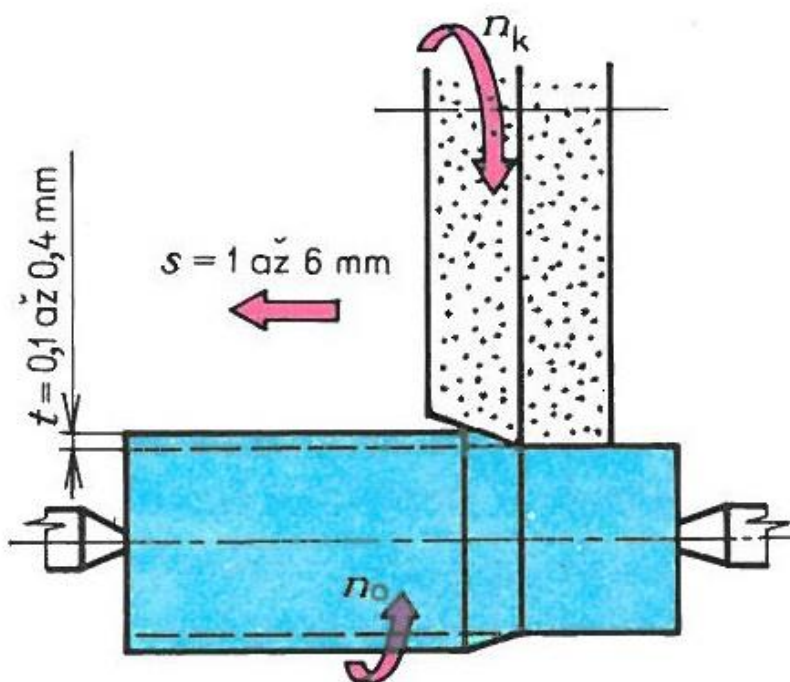
Na broušení **tvrdé keramiky** nejčastěji volíme diamantový nástroj. Musí se dbát na to, aby nedošlo k ulomení a popraskání povrchu, zejména pak krajů obrobku. Dokončovací broušení vyžaduje velmi jemné diamantové abrazivo a extrémně malou hloubku řezu. Jak je ale vidět, u všech materiálů nemusíme zvýšením řezné rychlosti dosáhnout zlepšení povrchu. [12]



Obrázek 28: Ovlivnění drsnosti broušeného povrchu keramických materiálů a) změnou rychlosti přísuvu v_{fr} , b) změnou rychlosti brousícího kotouče v_c [25]

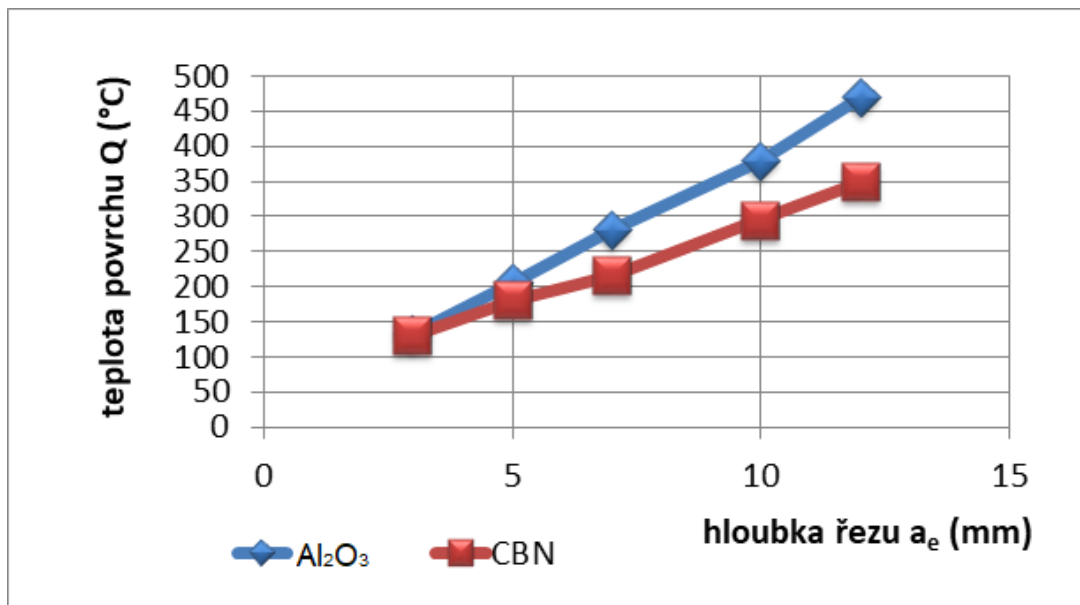
7 Hloubkové broušení

Hloubkové broušení je v současné době poměrně nová metoda obrábění. U klasického broušení se hloubka řezu pohybuje v setinách milimetru, zatímco u hloubkového broušení může brousicí kotouč odebírat od několika desetin milimetru až po několik milimetrů z obrobku, za pomalého posuvu kotouče. Používá se na kratší a tuhé obrobky. Brousicí kotouč se orovná na jedné straně do kužele, druhá strana bývá rovná, aby mohla obráběný povrch ihned vyjiskřit. Povrch bývá stejný nebo i lepší než u klasického broušení. Tím, že jsou používány řezné rychlosti i přes 100 m/s, se snižuje zatížení jednoho zrna, čímž roste trvanlivost nástroje. Hlavním důvodem pro uchycování se k hloubkovému broušení bývá výrazné zvýšení efektivity výrobního procesu. Hlavním limitujícím faktorem jsou samotné brusky. Pro hloubkové broušení je zapotřebí vysoký příkon elektromotoru a dostatečná tuhost celého systému, aby bylo možné dosáhnout potřebných parametrů, které vyžadujeme. [12], [24], [25]



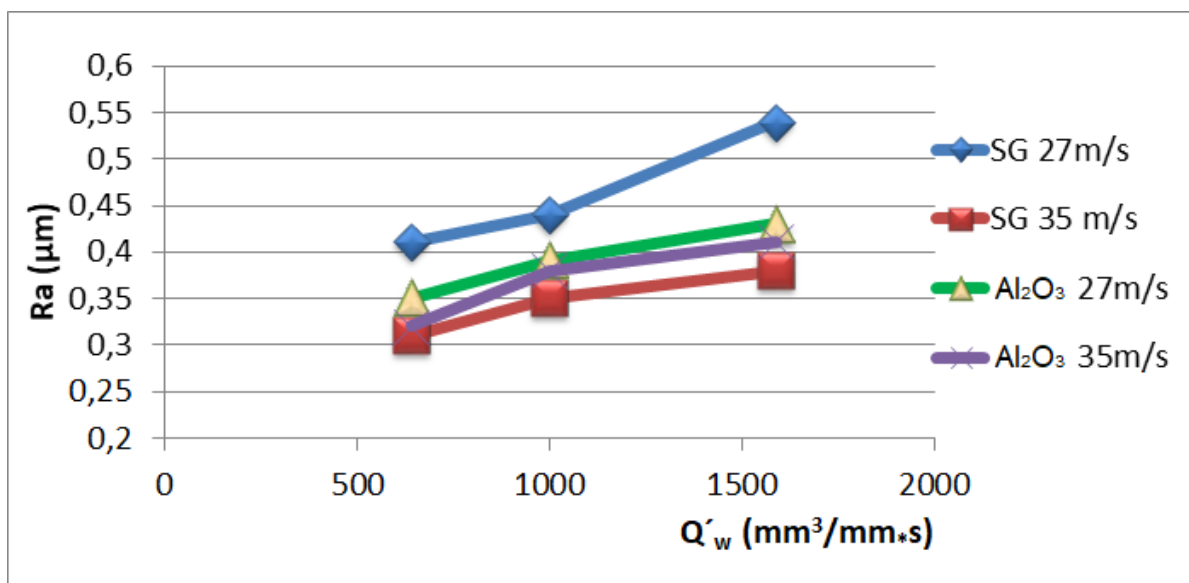
Obrázek 29: Schéma hloubkového broušení [24]

Na obr. 30 můžeme vidět rozdíl teplot na povrchu obrobku při hloubkovém broušení, použijeme-li abraziva na bázi Al_2O_3 a KNB. Větší ostrost a lepší tepelná vodivost zrn KNB způsobuje při větších hloubkách řezu rozdíl teplot činící i přes 100 °C. To může mít vliv i na průběh zbytkových napětí v obrobku. [25]



Obrázek 30: Vliv hloubky řezu na teplotu povrchu [25]

Na následujícím obrázku (obr. 31) můžeme vidět porovnání dosahované drsnosti povrchu při použití klasického abraziva na bázi Al_2O_3 a abraziva SG. Při řezné rychlosti 27 m/s bylo dosaženo lepších výsledků klasickým abrazivem. Při rychlosti 35 m/s se výrazně zlepšil povrch u SG brusiva, u klasického abraziva zůstal přibližně stejný. [26]



Obrázek 31: Vliv řezné rychlosti a velikosti úběru na drsnost povrchu po broušení [26]

Univerzita v Birminghamu, provedla výzkum, kde porovnávala parametry při hloubkovém broušení klasickými kotouči z SiC (o průměru 220 mm a šířce 20 mm) s kotouči ze superabrazivních materiálů (o průměru 175 mm a šířce 20 mm). Jako zkušební titanová slitina byla vybrána slitina Ti-45Al-8Nb-0.2C. Pokus byl prováděn na broušicím centru Bridgeport FGC 1000, které má maximální otáčky 6000 ot/min a maximální výkon 28 kW. Zkušební obrobky měly rozměry 80 x 80 x 20 mm. [18]

Operace měly tyto parametry:

- rychlost 15 až 60 m/s
- hloubka řezu 0,01 až 10 mm
- posuv 10 až 1000 mm/min [18]

Při experimentu bylo u kotouče z SiC dosaženo nejlepšího broušicího poměru 30 (poměr mezi úbytkem materiálu a úbytkem kotouče) při rychlosti kotouče 15 m/s, hloubce řezu 1,25 mm a rychlosti posuvu 150 mm/min. Hodnota Ra činila při této konfiguraci 1,1 μm . Zvýšením rychlosti se hodnota Ra zlepšila, ale docházelo k popálení povrchu obrobku. [18]

Při použití superabrazivního brusiva byl poměr broušení asi 10x vyšší při stejných podmínkách. U diamantového kotouče byla drsnost lepší o 25% a u kotouče z KNB dokonce o 70%. Tento výsledek se připisuje zejména podstatně lepší tepelné vodivosti u diamantu a KNB než u SiC. To navíc umožňuje zvýšit rychlost otáčení kotouče, aniž by docházelo k popálení nebo popraskání obrobku. [18]

8 Závěr

V této rešeršní bakalářské práci jsem měl za úkol zmapovat problematiku brousicích nástrojů, jejich modifikace a porovnání podmínek a dosahovaných parametrů. Pro účely vyhledávání jsem nejvíce používal odborné knihy, internetové stránky se strojírenským zaměřením, katalogy firem a stránky výrobců a prodejců brusiv.

Nejprve jsem se věnoval rozboru broušení a také teplotě. Snížení teploty dosáhneme pomocí řezné kapaliny, která navíc plní funkci odvodu třísek a mazání. S teplotou souvisí také zbytková napětí. Volbou vhodného nástroje můžeme ovlivnit teplotu, a tím i velikost zbytkových napětí, která mohou ovlivnit vliv vrubů, rozměrovou stálost či korozivzdornost.

Část práce je věnovaná parametrům brousicích nástrojů (kotoučů) jako je sloh, pojiva, tvrdost, tvar, zrnitost nebo brusivo. Všemi těmito základními znaky lze od sebe kotouče odlišit. Každý parametr může nabývat mnoha hodnot, takže i teoretické množství brousicích kotoučů je značné. Vždy je potřeba, aby technolog zvolil ideální kombinaci podle konkrétně broušeného materiálu, tvaru a podle konkrétních požadavků na výrobek. U obvyklých brousicích kotoučů volíme řeznou rychlost okolo 35 m/s (vždy ale záleží na informaci uvedené na štítku od výrobce).

V současné době dochází k vývoji a čím dál většímu využívání tvrdých materiálů (titan, korozivzdorné oceli, keramika atd.), které také potřebujeme umět brousit. S tím souvisí i vývoj a využívání supertvrdých abraziv. Mezi supertvrdá abraziva řadíme diamant a kubický nitrid boru. Ty vynikají oproti klasickým abrazivům (korundu a karbidu křemíku) svou tvrdostí, tepelnou stálostí a tepelnou vodivostí. Obvyklé řezné rychlosti jsou vyšší než u klasických abraziv, ale vždy záleží na konkrétním použití a na druhu pojiva. Tato abraziva začínají postupně vytlačovat ta konvenční i v broušení běžných materiálů z důvodu zvýšení efektivity výrobního procesu. Diamant má afinitu vůči uhlíku, proto ho využíváme například na broušení žáruvzdorných materiálů, skla, kompozitu, slinutých karbidů či keramiky. KNB pak používáme na rychlořezné, kalené, cementované a legované oceli, na litiny aj.

Další nově se rozvíjející technologií je hloubkové broušení, které přináší zcela nový pohled na možnosti využití brousicích kotoučů. Supertvrdá abraziva umožňují zvyšování rychlosti brousicích kotoučů, což vede k tomu, že každé zrno odebírá méně materiálu, a tudíž se snižuje jeho opotřebení. Místo klasického úběru v řádu 10^{-2} mm se odebírá až několik milimetrů za použití menšího posuvu. U tohoto typu broušení je hlavním limitujícím faktorem výkon samotných brusek.

9 Seznam použité literatury a zdrojů

- [1] BESEDA, Vojtěch. *Technologie broušení* [online]. Brno, 2012 [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=53720. Bakalářská práce. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. Milan Kalivoda
- [2] *Podstata broušení*. In: Učebnice strojírenství: obrábění a zpracování kovů [online]. [cit. 9. 4. 2018]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1241>
- [3] *Brousicí nástroje*. In: Učebnice strojírenství: obrábění a zpracování kovů [online]. [cit. 9. 4. 2018]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1250>
- [4] *Charakteristika brousicích nástrojů*. In: Učebnice strojírenství: obrábění a zpracování kovů [online]. [cit. 9. 4. 2018]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1251>
- [5] *Druhy brusiva*. In: Učebnice strojírenství: obrábění a zpracování kovů [online]. [cit. 9. 4. 2018]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1252>
- [6] *Pojivo*. In: Učebnice strojírenství: obrábění a zpracování kovů [online]. [cit. 9. 4. 2018]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1253>
- [7] *Zrnitost*. In: Učebnice strojírenství: obrábění a zpracování kovů [online]. [cit. 9. 4. 2018]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1254>
- [8] *Tvrdost brusných kotoučů*. In: Učebnice strojírenství: obrábění a zpracování kovů [online]. [cit. 9. 4. 2018]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1255>
- [9] *Tvar brusných kotoučů*. In: Učebnice strojírenství: obrábění a zpracování kovů [online]. [cit. 9. 4. 2018]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1256>
- [10] *Údaje na brusných kotoučích*. In: Učebnice strojírenství: obrábění a zpracování kovů [online]. [cit. 9. 4. 2018]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1257>
- [11] BARTOŇOVÁ, Renata. *Technologie broušení* [online]. 2012 [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: http://moodle2.voskop.eu/download/teu/U01_Technologie_brouseni.pdf. Elektronická učebnice. VOŠ, SOŠ A SOU KOPŘIVNICE.
- [12] ROWE, W. B. *Principles of modern grinding technology*. Second edition. Amsterdam: William Andrew, 2014. ISBN 03-232-4271-5.
- [13] *Honování, postupy a vhodná brusiva*. In: obchod: Techcentrum [online]. [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: <https://www.prodejbrusiva.cz/honovani-postupy-a-vhodna-brusiva>
- [14] *Brousicí materiály*. Studijní materiály nejen do strojírenství [online]. [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: <http://strojirenstvi-stredni-skola.blogspot.cz/2011/04/3244-brousici-materialy.html>
- [15] *Korund a jeho drahokamové odrůdy*. In: obchod: Malachit [online]. [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: <https://www.malachit-obchod.cz/cz-clanky-78.html>

- [16] *Základní rozdělení brusných kotoučů k ostření nástrojů* [online]. 2010 [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/zakladni-rozdeleni-brusnych-kotoucu-k-ostreni-nastroju/>
- [17] ŠTAJNOCHR, Lubomír. *Broušení nástrojů*. Praha: Grada, 2000. Profi & hobby. ISBN 80-7169-809-1.
- [18] SMOLA, Vojtěch. *Technologie broušení titanových superslitin* [online]. Praha, 2017 [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/73076/F2-BP-2017-Smola-Vojtech-Bakalarska%20prace%20-%20Smola%20Vojtech.pdf?sequence=1>. Bakalářská práce. ČVUT Praha, Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Zdeněk Pitrmuc.
- [19] HUMÁR, Anton. *Technologie I - Technologie obrábění - 1. část* [online]. Brno, 2003 [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf. VUT Brno.
- [20] KAVKOVÁ, D. *Broušení* [online]. Praha, 2016 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: https://www.moodle-trebesin.cz/pluginfile.php/9975/mod_resource/content/0/BROUŠENÍ.pdf. Materiály pro opakování STT. SPŠ Na Třebešíně, Praha 10.
- [21] KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [22] Diamantové a CBN nástroje. In: *Katalog Pferd* [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwizzqfXuPbaAhURLIAKHSWDDiEQFgggMAE&url=http%3A%2F%2Fshop.boukal.cz%2Fdownload%2F33-katalog-pferd%2F491-Katalog-Pferd-205&usg=AOvVaw1H7yEvR9VWZA-pKeOPqIZx>
- [23] TYROLIT, Honing / finishing. *Tyrolit* [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <https://www.tyrolit.at/en/divisions/metal-precision/applications/honing-finishing.html>
- [24] Způsoby broušení. *ZOZEI* [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <http://zozei.sssebrno.cz/brouseni---zpusoby/>
- [25] HOLEŠOVSKÝ, František. *Progres technologie II (Přednáška III)* [online]. Praha, 2014 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://utopm.fsid.cvut.cz/podklady/STO/Progres%20Technologie%20II.ppt>. ČVUT Praha.
- [26] HOLEŠOVSKÝ, František. *Progresivní technologie I (Přednáška I + II)* [online]. Praha, 2014 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://utopm.fsid.cvut.cz/podklady/STO/Progres%20technologie%20I.pptx>. ČVUT Praha.
- [27] *Řezné podmínky při obrábění* [online]. Liberec, 2001 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: http://www.kom.tul.cz/soubory/tob_rp.pdf. Podklad pro výuku. TU Liberec.
- [28] DIAMOND CONTACT, s.r.o. *Brousicí kotouče z diamantu a CBN* [online]. Petříkov, 2016 [cit. 2018-05-21]. Online katalog 2018. Dostupné z: <http://www.diamondcontact.cz/Katalogy/Kat-DC-A-CZ-2018-v6-Web.pdf>

10 Seznam obrázků

Obrázek 1: Schéma broušení vnějších válcových ploch s posuvem podél osy obrobku [1].....	5
Obrázek 2: Zrna brousícího kotouče: 1 – řezná, 2 – tlačná, 3 – pasivní [1]	6
Obrázek 3: Rozložení řezné síly na 3 složky: a) malá hloubka řezu, b) velká hloubka řezu [12].....	7
Obrázek 4: Broušení bez řezné kapaliny (dry) a s řeznou kapalinou (wet) [12]	7
Obrázek 5: Brousící kotouče [4]	11
Obrázek 6: Schéma broušení pásem: a) broušení vnějších rotačních ploch v hrotech, b) nahrazením podávacího kotouče pásem a opěrnou deskou, c) volným úzkým pásem při otáčení obrobku, d) na kontaktním kotouči, e) na volném pásu, f) pás je přitlačován k obrobku [18].....	11
Obrázek 7: Honovací a superfinišovací kameny [23].....	12
Obrázek 8: Schéma superfinišování [18].....	13
Obrázek 9: Lapování tvarových ploch [18]	13
Obrázek 10: Struktura kotoučů: a) hutná, b) pórovitá, c) vysoce pórovitá [20].....	15
Obrázek 11: Příklad označení brousícího kotouče [10]	21
Obrázek 12: Porovnání tvrdosti brusiva podle Knoop [21].....	24
Obrázek 13: Závislost koeficientu tření na druhu zrna a rychlosti kotouče [25].....	25
Obrázek 14: Tvar krystalů přírodního diamantu: a) rovnoběžnostěnný osmistěn, b) kosočtvercový dvanáctistěn, c) krychlový, d) kombinovaný s rovinnými stěnami, e) křivostěnný osmistěn, f) křivostěnný dvanáctistěn, g) křivostěnný šestistěn, h) kombinovaný [1]	26
Obrázek 15: a) fotografie vysokorychlostního slinutého KNB kotouče, b) schéma kotouče z konvenčních abraziv, c) schéma jednovrstvého superabrazovního kola, d) schéma segmentového kotouče vhodného pro vysokorychlostní řezání za použití konvenčních abraziv [12].....	27
Obrázek 16: Typy pojiv pro diamantové a KNB nástroje [22]	28
Obrázek 17: Použití brusných materiálů z KNB a diamantu [28]	29
Obrázek 18: Doporučené obvodové rychlosti brousících kotoučů z diamantu a KNB podle druhu pojiva v m/s [28].....	30
Obrázek 19: Doporučený přísuv, tj. tříska (a_e) pro kotouče v pryskyřičném pojivu v mm [28].....	30
Obrázek 20: Podélné posuvy (v_t) a obvodové rychlosti obrobku (v_w) při broušení kotouči s pryskyřičným pojivem [28].....	30
Obrázek 21: Doporučené parametry posuvu a přísuvu v závislosti na rychlosti odbrušování (Q-Prime) [28].....	31
Obrázek 22: Závislost opotřebení brousícího kotouče na řezné rychlosti [25]	32

Obrázek 23: Dosažená drsnost povrchu zrny bílého korundu, růžového korundu, monokrystalického korundu a SG [25]	32
Obrázek 24: Průběh zbytkových napětí po broušení oceli a) 14 109.6, b) 16 420.6 [26]	33
Obrázek 25: Průběh zbytkových napětí po broušení nástrojové oceli a) 19 802.6, b) 19 824.6 [26]	33
Obrázek 26: Tvrdost typických broušicích materiálů v závislosti na teplotě [12]	34
Obrázek 27: Porovnání nákladů životnosti kotouče během broušení materiálu Inconel 718 broušeným různými abrazivy a stroji [12]	35
Obrázek 28: Ovlivnění drsnosti broušeného povrchu keramických materiálů a) změnou rychlosti přísuvu v_{fr} , b) změnou rychlosti broušícího kotouče v_c [25]	36
Obrázek 29: Schéma hloubkového broušení [24]	37
Obrázek 30: Vliv hloubky řezu na teplotu povrchu [25]	38
Obrázek 31: Vliv řezné rychlosti a velikosti úběru na drsnost povrchu po broušení [26]	38

11 Seznam tabulek

Tabulka 1: Dosažené hodnoty drsnosti povrchu při eliminaci procesní kapaliny, $v_s = 27$ m/s, $v_{fr} = 0.26$ mm/min [25].....	8
Tabulka 2: Doporučené řezné podmínky pro honování [21]	12
Tabulka 3: Řezné podmínky a přídavky pro superfinišování [21]	13
Tabulka 4: Brusiva pro lapování [21].....	14
Tabulka 5: Dosahované parametry obrobených ploch pro abrazivní metody obrábění [19]..	14
Tabulka 6: Značení slohu (pórovitosti) brousicích nástrojů [17].....	15
Tabulka 7: Značení tvrdosti brousicích nástrojů [17]	16
Tabulka 8: Druhy pojiva brousicích nástrojů [17].....	18
Tabulka 9: Zrnitost brousicích materiálů [17].....	18
Tabulka 10: Závislost dosažitelné drsnosti na použité zrnitosti brusiva [17]	19
Tabulka 11: Převodní tabulka FEPA "F" a starší ČSN 22 4012 [17].....	19
Tabulka 12: Přehled tvarů brousicích kotoučů [16].....	20