

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A
METROLOGIE



Jan Truhlář

Nové abrazivní materiály pro broušení

Bakalářská práce

Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. František Holešovský

2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Truhlář** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **493590**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Nové abrazivní materiály pro broušení

Název bakalářské práce anglicky:

New abrasive materials for grinding

Pokyny pro vypracování:

1. Studium české a zejména zahraniční literatury a zdrojů.
2. Vytvoření přehledu nových abrazivních materiálů pro broušení a jejich vlastností.
3. Možnosti aplikací v segmentech výroby.
4. Porovnání s klasickými abrazivními materiály.

Seznam doporučené literatury:

web
časopisy CIRP Annals, Manufacturing Technology, Int.Journal of Abrasive Technology atd.
Marinescu I., Hitchiner, M. Handbook of Machining with Grinding Wheels. CRC Press 2007

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

prof. Dr. Ing. František Holešovský ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **15.03.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **29.07.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

prof. Dr. Ing. František Holešovský
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

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci na téma Nové abrazivní materiály pro broušení vypracoval samostatně a využil jsem pouze uvedené prameny.

V Praze dne:

Podpis:

Poděkování

Tímto děkuji vedoucímu mé bakalářské práce, prof. Dr. Ing. Františku Holešovskému, za vedení, pomoc a odborné rady při jejím vypracování. Ing. Vítězslavu Rázkovi, CSc., za poskytnutí prostor ve školních halových laboratořích pro realizaci experimentální části práce a za pomoc s její logistikou a Ing. Liboru Beránkovi, Ph.D., za poskytnutí technického zázemí pro měření a mikroskopii. Dále pak Ing. Aleši Weselému a firmě Piskač a syn za vzorky abraziv a možnost navštívit výrobu.

Děkuji také Ing. Janu Blažkovi za pomoc a věcné připomínky k stylistické a gramatické stránce textu a také všem svým blízkým, zejména rodičům, za podporu v průběhu psaní bakalářské práce a celého studia.

Anotace

Tato bakalářská práce uvádí do problematiky abraziv a následně širě pojednává o nových a inovovaných abrazivních materiálech, zejména na bázi korundu. Věnuje se jejich fyzikálním a technologickým vlastnostem, složení a uplatnění. V praktické části se zabývá vyhodnocováním povrchů broušených brusnými pásy s konvenčními i moderními brusnými zrny, na základě profilů drsnosti a mikroskopie. K výsledkům je následně provedena diskuze. Hlavním cílem představit čtenáři problematiku pomocí teoretických informací a následně předložit experimentem nabyté poznatky.

Klíčová slova

Abrazivum, brusný materiál, korund, karbid křemíku, Cubitron, Cubitron II, SG, TG, Abral, Trizact, NQ, brusný pás, drsnost, broušení, sol-gel

Annotation

This thesis introduces the reader into problematics of abrasives and then discusses in more detail new and innovated abrasive materials especially the corundum based ones. The practical part evaluates surfaces ground using abrasive belts with conventional and modern abrasive grains, based on roughness profiles and microscopy. The results are then examined and analysed. The main objective is to introduce the reader to the issues using theoretical informations and then submit the results and findings obtained in the experiment.

Key words

Abrasive, abrasive material, corundum, silicon carbide, Cubitron, Cubitron II, SG, TG, Abral, Trizact, NQ, abrasive belt, roughness, grinding, sol-gel

Obsah

1	Úvod.....	4
2	Abrazivní technologie	4
2.1	Broušení.....	4
2.2	Strojní broušení	4
2.2.1	Rovinné broušení- broušení na plocho.....	5
2.2.2	Broušení válcových ploch vnějších.....	5
2.2.3	Broušení válcových ploch vnitřních	6
2.2.4	Broušení bezhroté.....	6
2.2.5	Dílenské broušení.....	7
2.3	Lapování, leštění, honování a superfinišování	7
2.3.1	Leštění a lapování.....	8
2.3.2	Honování	9
2.3.3	Superfinišování.....	10
2.3.4	Dosahované přesnosti a drsnosti.....	11
3	Brusné materiály.....	12
3.1	Přírodní	12
3.1.1	Smírek	13
3.1.2	Pemza.....	13
3.1.3	Břidlice	14
3.1.4	Křemen.....	14
3.1.5	Pískovec.....	15
3.1.6	Chalcedon.....	16
3.1.7	Přírodní korund	16

3.1.8	Přírodní diamant	16
3.2	Syntetické	17
3.2.1	Oxid hlinitý	17
3.2.2	Korund s příměsí Ti_2O_3	19
3.2.3	Zirkonkorund (A97E)	19
3.2.4	Slinutý korund	19
3.2.5	Karbid křemíku SiC	19
3.2.6	Karbid boru B_4C	20
3.3	Supertvrdé brusné materiály	20
3.3.1	Syntetický diamant.....	20
3.3.2	CBN (B_2N_3 - kubický).....	21
4	Nové brusné materiály	22
4.1	Mikrokrystalická brusiva na bázi Al_2O_3	22
4.1.1	Sol-gel.....	23
4.2	3M: Cubitron™.....	24
4.3	Saint-Gobain/Norton: SG, TG, DG	29
4.3.1	SG™- seeded gel- Cerpass XTL	29
4.3.2	TG™- „Targa“ Cerpass TGE	31
4.3.3	DG™- „Delta“ Cerpass DGE	32
4.4	Trizact™	33
4.5	Cubitron™ II	37
4.6	Abral®	39
4.7	NQ™	40
4.8	Nanokrystalický korund.....	41
5	Plán experimentu.....	43
5.1	Výčet a popis zkoumaných abrazivních produktů.....	43

5.1.1	Brusný pás 984F.....	43
5.1.2	Brusný pás 784F.....	44
5.1.3	Brusný pás 777F.....	44
5.1.4	Brusný pás R822	44
5.1.5	Brusný pás R996	44
5.1.6	Brusný pás 237AA.....	45
5.1.7	Brusný pás 337DC.....	45
5.2	Příprava zkušebních těles	45
5.3	Použité stroje a přístroje	46
5.4	Vyhodnocení a porovnání výsledků	46
5.5	Pásky běžných zrnitostí	47
5.5.1	Srovnání ve skupině 784F	48
5.5.2	Srovnání ve skupině P120	50
5.5.3	Srovnání ve skupině P80	51
5.5.4	Srovnání ve skupině P60	53
5.5.5	Srovnání ve skupině P36	55
5.6	Pásky jemné a velmi jemné.....	57
5.6.1	Trizact: hromadné porovnání	58
5.7	Shrnutí výsledků experimentální části	60
6	Závěr	61
7	Zdroje.....	63

1 Úvod

V této práci se budu věnovat abrazivním materiálům pro broušení. Nejprve čtenáře uvedu do problematiky abrazivního obrábění, kde popíši základní principy různých metod s názornými obrázky. Následně sestavím přehled konvenčních a moderních brusných materiálů a popíši jejich vlastnosti a účel.

Na závěr provedu zkoušku brusných pásů s konvenčním brusným zrnem a moderních pásů se zrnem s definovanou geometrií. Provedu pozorování broušených vzorků na digitálním mikroskopu a pořídím fotografie. Na broušených površích provedu měření veličin drsnosti. Výsledky měření zaznamenám do přehledných tabulek a grafů, ze kterých bude patrné, jaké výsledky můžeme při použití daného pásu očekávat, ve srovnání s ostatními představiteli.

2 Abrazivní technologie

2.1 Broušení

Broušení je abrazivní metoda obrábění, která se zpravidla používá jako dokončovací operace. S příchodem moderních, vysoce výkonných brusných materiálů a nástrojů, to ale není pravidlem. S broušením se lze nečistě setkat, jako s přípravnou operací, například výkovků, či odlitků k následnému obrábění. K broušení používáme mnohobřité abrazivní brusné nástroje, které rotují, nebo se jinak posouvají vysokou rychlostí vůči broušenému povrchu. Pomocí ostrých brusných zrn oddělují velké množství velmi drobných třísek nepravidelného tvaru. Broušením lze obrábět i velmi tvrdé povrchy materiálů, mezi které patří kalené a cementované oceli, slinuté karbidy, sklo, keramika a další kovové i nekovové materiály. [1] [2] [3]

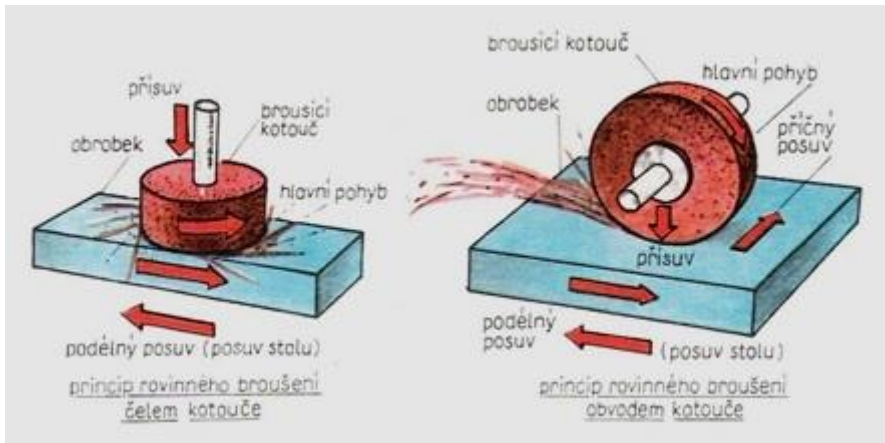
2.2 Strojní broušení

Jako strojní broušení označujeme souhrn obráběcích operací, které úběru materiálu dosahují pomocí brusných nástrojů, zpravidla brusných kotoučů. Broušení rozdělujeme do několika kategorií, podle typu broušené plochy a plochy kotouče, která je k broušení používána. [2] [3]

2.2.1 Rovinné broušení- broušení na plocho

Rovinné broušení slouží k obrábění rovinných ploch, které lze brousit obvodem kotouče (vodorovné broušení), nebo jeho čelem (svislé broušení). Stroje označujeme jako obvodová, nebo čelní bruska.

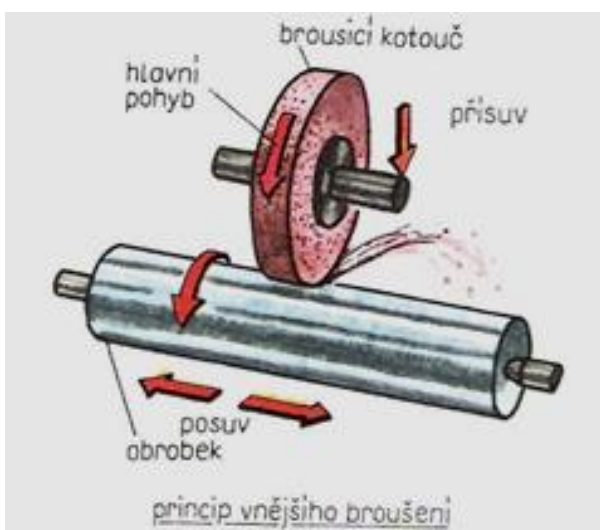
K upínání obrobku se nejčastěji používá magnetická deska, svěrák, nebo je jej možné upnout přímo na stůl pomocí upínek.



Obr. 1- Broušení na plocho [2]

2.2.2 Broušení válcových ploch vnějších

Vnější válcové plochy se brousí obvodem kotouče. Rotační pohyb koná obrobek i brusný kotouč. Obrobek je upnut mezi hroty a k přenosu krouticího momentu slouží unášecí srdce. V případě broušení zvláště dlouhých, nebo tenkých dílů, je nutné jejich pojištění proti prohnutí pomocí pevných, nebo pohyblivých lunet, které působí, proti brusnému kotouči.

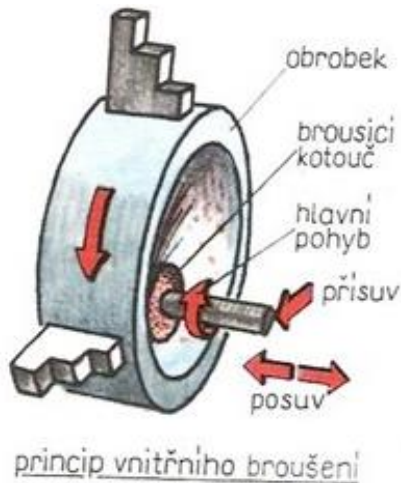


Obr. 2- Broušení na kulato [2]

2.2.3 Broušení válcových ploch vnitřních

Lze je rozdělit na broušení s otáčejícím se obrobkem, při kterém je rotující kotouč na stejném místě a obrobek rotuje. Slouží k broušení souosých děr menších průměrů.

A na broušení planetové, při kterém je obrobek statický a rotující nástroj obíhá po dráze souosé s osou obrobku.



Obr. 3- Broušení vnitřních válcových ploch [2]

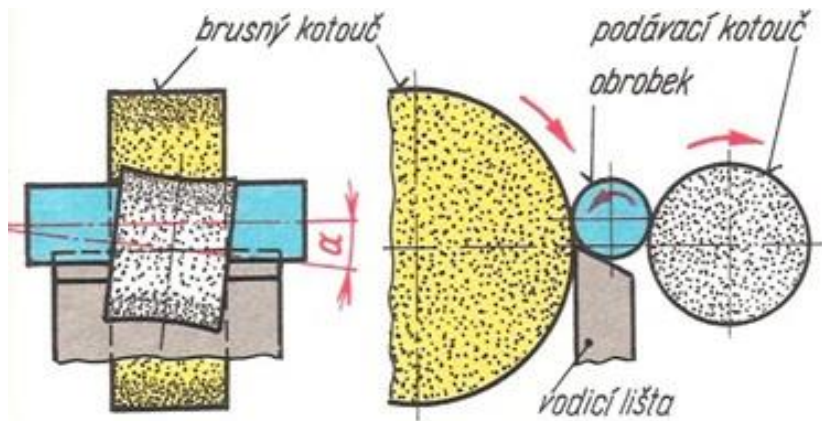
Na válcových, nebo jiných rotačních plochách, vnitřních i vnějších, lze provádět broušení zápichů přísuvem kotouče. Princip je stejný, pouze s vypuštěním posuvu kotouče v ose obrobku.

2.2.4 Broušení bezhroté

Při této metodě není obrobek upnut, ale pouze vložen mezi brusný a podávací kotouč, nebo kotouče. Podávací kotouče jsou oproti ose obrobku vychýleny o 2° až 15° , čímž je zajištěn posuv obrobku. Bezhroté broušení se používá zejména ve velkosériové výrobě, protože vyniká vysokou produktivitou.

Vnitřní bezhroté broušení probíhá na stejném principu, pouze je doplněno o další opěrný kotouč.

Bezhroté broušení dále dělíme na zapichovací a podélné. Hlavním rozdílem zapichovacího bezhrotého broušení oproti podélnému je vypuštění posuvové složky pohybu. Obrobek tedy pouze rotuje, a po dosažení nastaveného průměru zápichu je vyjmut.



Obr. 4- Bezhraté broušení [2]

2.2.5 Dílenské broušení

Jako dílenské broušení označujeme souhrn operací, které jsou prováděny ručně na dílenských bruskách, které jsou typicky dvoukotoučové.

Dílenské broušení je prováděno za účelem ostření jednoduchých nástrojů, odjehlování, nebo začišťování odlitků. Při použití drátěných kotoučů lze například zbavovat díly koroze, nebo strusky po kování. Pomocí filcových, či textilních kotoučů lze na těchto bruskách leštit.

Velké oblibě se začínají v oblasti dílenského broušení těšit pásové brusky, které nabízejí daleko větší flexibilitu při broušení, a tím i nové možnosti. Pomocí přípravků na nich lze brousit tvarové i rovinné plochy. Výměna brusného pásu je daleko jednodušší, i rychlejší, než výměna a nastavení brusného kotouče, není proto nutné mít více strojů osazených různými nástroji a je možné provádět nejrůznější brousící operace za sebou, v rychlém sledu, na stejném stroji.

Brusnými pásy se budu zabývat v praktické části této práce.

2.3 Lapování, leštění, honování a superfinišování

Abrazivními metodami obrábění lze dosáhnout velmi přesných a vysoce jakostních povrchů. Mezi dokončovací abrazivní metody spadá, kromě broušení, také lapování, honování a superfinišování. Těmito metodami lze dosáhnout nejlepších možných parametrů, ze všech způsobů úpravy povrchu, a jsou tedy vyhrazeny, jako závěrečné operace. [4] [5] [6]

2.3.1 Leštění a lapování

Jako leštění označujeme operaci, při které je povrch opracováván pomocí leštící (lapovací) pasty, či kapaliny. Toto lapovací médium je nanášeno na nosič, kterým může být filcový, nebo textilní kotouč. Nosiče jsou porézní a při lapování rotují vysokou obvodovou rychlostí. Leštění se používá zejména z estetických důvodů. Měkké leštící kotouče nemají pozitivní vliv na odchylky tvaru leštěné součásti.

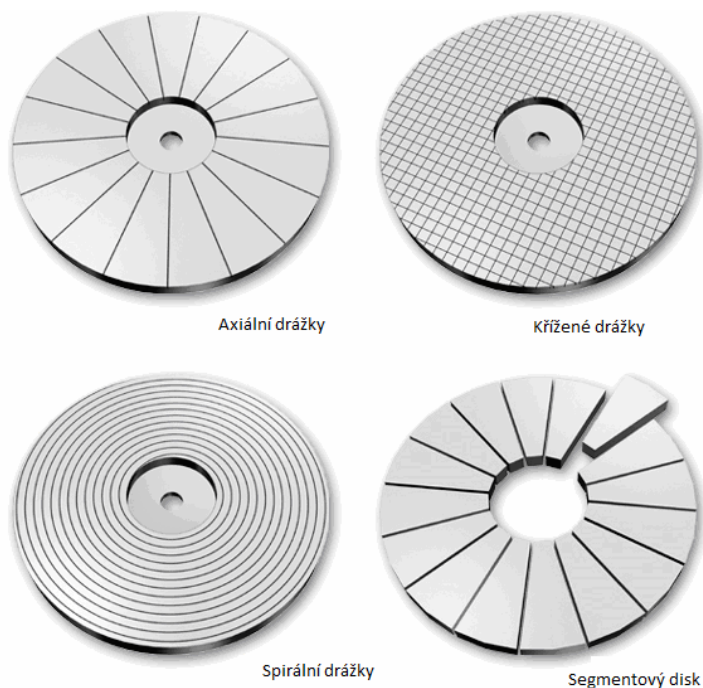


Obr. 5- Filcový leštící kotouč [7]

Lapování je proces, kterým je možné dosahovat vysoké kvality povrchu a oproti běžnému leštění má vliv na geometrické odchylky tvaru obráběných součástí. Typickým příkladem je lapování optických skel, u kterých je povolena téměř nulová odchylka rovinnosti. Při lapování je zásadní dostatečný, ale přiměřený přísun lapovací kapaliny.

Lapovat je možné rovinné plochy i vnitřní válcové plochy. (viz. obrázky níže)

Lapovací nástroje neboli nosiče zpravidla nejsou porézní a rotují výrazně nižší obvodovou rychlostí, než je tomu při leštění. Nejčastěji se používají nosiče z vysoce kvalitní jemnozrnné litiny, měkké oceli, mědi, nebo plastických hmot, např. pryskyřice. Měkké materiály těchto nosičů umožňují impregnovat brusných zrn do jejich povrchu. Na nosičích se vyskytují uspořádané drážky, které slouží k odvodu a skladování přebytečné kapaliny a předchází tím tzv. aquaplaningu- stejný princip jako u pneumatik. Inovací v tomto oboru se stávají nosiče nanovláknové, které lze zařadit mezi porézní. [7] Pro dokončovací lapování se používají nástroje bez drážek, tedy hladké. [4] [8]



Obr. 6- Lapovací nástroje [8]



Obr. 7- Lapovací trn [10]

2.3.2 Honování

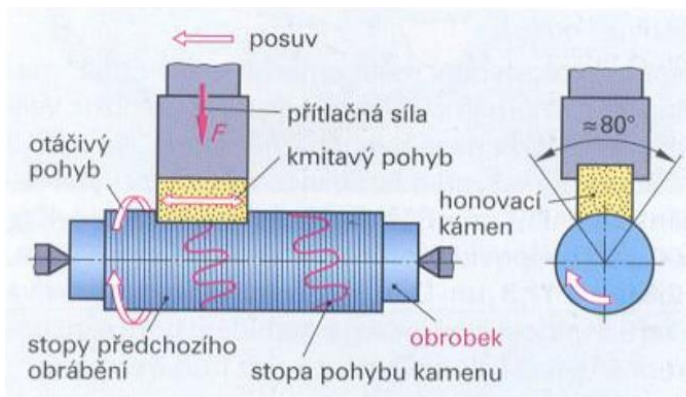
Honování je postup dokončování ploch, při kterém je materiál odebrán působením honovacích kamenů, lišt, či kartáčů. Nejčastěji se s honováním setkáme při dokončování vnitřních válcových ploch, například hydraulických a pneumatických válců, válců spalovacích motorů, ojnic, ložisek a pouzder. Honovat lze díry průměrů 1 až 750mm s délkou až 25m. Přítomnost drážek uvnitř honované díry nevádí. Lze ale honovat i vnější válcové plochy. Při honování dochází k úběru materiálu velmi jemným brusivem, při malých otáčkách, s intenzivním přísunem řezné kapaliny. [4]

Honování vnitřních válcových ploch nazýváme honováním s dlouhým zdvihem. Nejčastěji používanými nástroji jsou honovací kameny, upevněné do honovacích přípravků. Minimální počet honovacích kamenů jsou 3. Honovací hlava, nebo přípravek

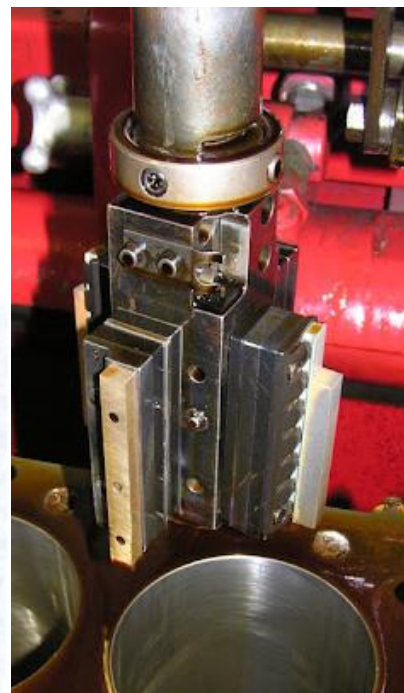
koná v díře jednak vratný pohyb v ose díry, a zároveň rotuje. Výsledkem je velké množství překrývajících se šroubovitých drah [6] [4]

2.3.3 Superfinišování

Honování vnějších válcových ploch nazýváme honováním s krátkým zdvihem, nebo přehlazování, či superfinišování. Honovací kameny jsou upevněny v kmitajících honovacích hlavách, které konají vratný pohyb ve směru osy obrobku. Rozkmit kamenů je 1 až 6mm. K rotujícímu obrobku jsou přitlačovány tlakem 10 až 40 N/cm². Kmitavý pohyb o frekvenci 2300 až 3000 kmitů za minutu značně omezuje hmotnost (velikost) použitých kamenů. Nutné použití malých honovacích kamenů způsobuje, že operací superfinišování nelze napravit větší odchylky válcovitosti obrobku. Operace má vliv jen na tvarové odchylky, které honovací kameny svými rozměry překryjí. Schéma superfinišování můžeme vidět na obrázku 9. [5] [6]



Obr. 9- Pohyby při superfinišování [6]



Obr. 8 Honovací hlava [11]

2.3.4 Dosahované přesnosti a drsnosti

V následující tabulce je možné vidět třídy přesnosti a drsnosti povrchů, dosahované jednotlivými operacemi abrazivního obrábění.

Tab. 1- přesnosti a drsnosti povrchů, dosahované operacemi abrazivního obrábění [1] [3]

Metoda abrazivního obrábění			Přesnost rozměrů		Drsnost povrchu	
			IT		Ra [μm]	
			Střední	Rozsah	Střední	Rozsah
vnější rotační	Broušení	Hrubovací	10	9÷11	2,4	0,8÷3,20
		Dokončovací	5	5÷6	0,4	0,2÷0,6
		Jemné	4	3÷5	0,2	0,05÷0,4
	Lapování	Dokončovací	4	3÷4	0,1	0,05÷0,2
		Jemné	2	1÷2	0,03	0,012÷0,05
	Superfinašování	Dokončovací	4	3÷5	0,2	0,05÷0,4
		Jemné	3	2÷4	0,06	0,025÷0,1
Vnitřní rotační	Broušení	Hrubovací	10	9÷11	2,4	1,6÷3,20
		Dokončovací	6	5÷7	0,8	0,4÷1,6
		Jemné	5	3÷6	0,2	0,05÷0,4
	Honování	Hrubovací	7	6÷8	0,4	0,2÷0,8
		Dokončovací	6	5÷7	0,15	0,1÷0,2
		Jemné	4	3÷5	0,07	0,05÷0,1
	Lapování	Dokončovací	4	3÷5	0,2	0,01÷0,4
		Jemné	2	1÷3	0,03	0,012÷0,05
rovinné	Broušení	Hrubovací	10	9÷11	2,4	1,6÷3,2
		Dokončovací	6	5÷7	0,8	0,4÷1,6
		Jemné	5	3÷6	0,2	0,05÷0,4
	Lapování	Dokončovací	4	3÷5	0,2	0,1÷0,4
		Jemné	2	1÷3	0,03	0,012÷0,05

3 Brusné materiály

Brusným materiálem zpravidla nazýváme krystaly, nebo jejich drobná uskupení, v podobě zrn, přírodních, nebo syntetických materiálů, které vynikají vysokou tvrdostí, houževnatostí a odolností hran.

Aby mohl materiál dobře sloužit, jako brusivo, musí splnit několik základních podmínek. Pokud má dojít k odebrání vrstvy obráběného materiálu pomocí broušení, poměr tvrdosti broušeného povrchu H_m a tvrdosti brusiva H_s , musí překročit určitou spodní mez. Ve většině případů se poměr H_s/H_m pohybuje v intervalu $<1,5 \div 2>$. Parametr tvrdosti je tedy jedním z hlavních, ne-li nejdůležitějším ukazatelem použitelnosti materiálu jako abraziva. Dalším významným ukazatelem je teplota tání abrazivního i broušeného materiálu. Během broušení je v oblastech úběru materiálu dosahováno vysokých teplot, které mohou způsobit až tavení broušeného kovu. Z toho důvodu je nutné přihlídnout k volbě vhodného abraziva a následně i řezných podmínek. Ve většině případů platí, že brusné materiály by neměly podléhat tání při teplotách do 1600°C , existují ale výjimky. [9]

Korund, křemen, smirek, kazivec, vápenec a diamant jsou přírodního původu. Mezi syntetické materiály řadíme umělý korund, karbid boru, karbid křemíku, kubický nitrid boru a syntetický diamant. Nejčastěji používanými brusivy jsou oxid hlinitý, umělý korund.

Pro potřeby této práce rozdělím materiály na běžné, neboli konvenční- takové, které jsou známé již dlouhou dobu, jejich vlastnosti jsou obecně známé a lze je použít ke standartním broušicím operacím, a moderní, neboli nové, které se začaly používat ve velmi blízké minulosti, nebo nejsou ještě zcela standartní, čímž myslím, že nejsou k nalezení zdaleka v každém provozu, či dílně. Moderní abraziva stále prochází intenzivním vývojem, jejich vlastnosti jsou stále vylepšovány a upravovány pro konkrétní aplikace.

3.1 Přírodní

Přírodní brusné materiály jsou zpravidla tvrdé horniny a minerály, které se drolí na abrazivní prach, nebo vynikají ostrým lomem. Do této kategorie spadají nejstarší

používané brusné materiály, jejich výběr v dávných dobách podléhal zejména jejich dostupnosti na daném území. Patří mezi ně břidlice, pemza, pískovec, křemen, chalcedon, kazivec a smirek, které se hodí zejména pro broušení měkkých materiálů, například dřeva, či barevných kovů. Při broušení tvrdších materiálů, například oceli, můžeme narazit na jejich vyšší spotřebu a použití moderního, výkonnějšího materiálu se stává ekonomičtějším řešením.

Do kategorie přírodních abraziv dále patří také přírodní korund a diamant.

3.1.1 Smirek

Smirek je velmi tvrdá přírodní metamorfovaná hornina, hnědo-šedé, až černé barvy. Obsahuje více, než 60% oxidu hlinitého, tzv. korundu. V porovnání s čistým korundem nedosahuje zdaleka tak dobrých brusných vlastností, ale pro svou dostupnost a nízkou cenu byl, a stále je, hojně využíván pro výrobu brusných pláten a papírů- tzv. smirkový papír. Na Mohsově stupnici má tvrdost 7,5 až 8, díky čemuž s ním lze brousit i kovy. [10] [11] [12]



Obr. 10- Smirek [12]

3.1.2 Pemza

Pemza je velmi porézní sopečná sklovitá hornina, šedobílé, až tmavě šedé barvy. Póry uvnitř horniny vznikají prudkým ochlazením horniny po vyvržení do vody nebo vzduchu uvězněním plynů uvnitř horniny. Z toho důvodu má pemza, v přírodním stavu, velmi nízkou hustotu. Na Mohsově stupnici má tvrdost 3 až 6. Pemza po broušení nezanechává rýhy, je proto vhodná pro broušení (hlazení) dřeva, či lakových filmů. [11] [10] [12]



Obr. 11- Světlá pórovitá pemza [12]

3.1.3 Břidlice

Břidlice je černošedá až černá usazená hornina, která se vyznačuje rovinnou štěpností. Břidlic se v přírodě vyskytuje mnoho druhů, ale pro použití k broušení se využívá pouze homogenní břidlice s vysokým obsahem oxidu křemičitého (SiO_2). Z břidlice se vyrábí jemné dokončovací (obtahovací) kameny. Jako mazací médium se nejčastěji při broušení břidlicí používá olej, nebo olej s petrolejem. Touto metodou se na břidlicových brouscích tradičně brousily holičské břitvy. [13]



Obr. 12- Břidlicový brousek [16]

3.1.4 Křemen

Neboli oxid křemičitý (SiO_2) je tvrdý a hojně se vyskytující minerál, který s různými příměsemi tvoří řadu tzv. odrůd. Vyskytuje se v celé řadě hornin, například v břidlicí, nebo žule. Křemen je velmi levné brusivo, používá se například ve sklářském průmyslu.

Při obrušování tvoří velmi jemný prach, který je při vdechnutí silně škodlivý a při dlouhodobém vystavování může způsobit řadu respiračních onemocnění, mezi které

patří rakovina plic, nebo silikóza. Silikóza je velmi běžným onemocněním například mezi brusiči skla, horníky, nebo kameníky. Při práci je ke snížení prašnosti doporučeno opracovávané povrchy zalévat vodou a používat adekvátní ochranné pomůcky. [13] [14]



Obr. 13- Krystal obecného křemene [12]

3.1.5 Pískovec

Pískovec je usazená hornina tvořená písky nejrůznějšího původu. Křemenné pískovce, které jsou jedny z nejrozšířenějších, jsou tvořeny zrnky křemene uložené v matici tmelícího materiálu, který může být vápnitý, kaolinický, jílovitý nebo železitý. Technologické vlastnosti pískovce pro použití jako brusiva jsou závislé zejména na tmelícím materiálu, tedy jeho schopnosti držet zrna. V minulosti se pro svou dobrou opracovatelnost hojně používal k výrobě brusných kamenů a kotoučů pro broušení nástrojů, výrobu mlýnských kol, či jako stavební materiál. [13] [15]



Obr. 14- Hořický pískovec [15]

3.1.6 Chalcedon

Chalcedon je hornina, která může obsahovat až 95,5% oxidu křemičitého. Velké naleziště odrůdy této horniny se vyskytuje v USA, zejména ve státě Arkansas, podle kterého je pojmenovaná. Hornina tohoto původu je oblíbená pro výrobu brusných kamenů. Odrůda ARKANSAS je velmi jemná (dosahuje zrnitostí až 8000 zrn na čtvereční palec) a je považována za nejkvalitnější. V Americkém státě Mississippi se vyskytuje opět stejnojmenná odrůda MISSISSIPPI, která je měkčí a hrubší.

Brousíky z těchto materiálů se používají nejčastěji pro ruční broušení a jako procesní kapalina je doporučován olej, jsou proto označovány jako olejové kameny. Lze je však použít i s vodou. [13]



Obr. 15- Chalcedon: brusné kameny z odrůdy Arkansas [19]

3.1.7 Přírodní korund

Korund- oxid hlinitý (Al_2O_3) je minerál, který se v přírodě vyskytuje v podobě krystalů s trigonální strukturou. Jeho tvrdost na Mohsově stupnici je 9, a proto ho lze použít k broušení všech minerálů, kromě diamantu. V přírodě se vyskytuje v mnoha variantách s různým zabarvením podle příměsí, například jako rubín, či smaragd. Jeho získávání a zpracování je poměrně náročné i nákladné, proto není pro použití ve strojírenství příliš vhodný, a využívá se minimálně. Pro využití k broušení je daleko vhodnější korund umělý. [13] [16]

3.1.8 Přírodní diamant

Diamant je nejtvrďší známý přírodní minerál. Na Mohsově stupnici má proto hodnotu 10. Čistý diamant se chemicky skládá pouze z uhlíku, u kterého vlivem působení vysoké teploty a tlaku došlo k vytvoření krychlové krystalové mřížky. [17]

Dříve bylo možné využívat jemný diamantový prach jako brusivo, které bylo vhodné k broušení zejména jiných diamantů ve šperkařství. Ve strojním průmyslu nalézá využití hlavně umělý, polykrystalický diamant. Malé krystaly přírodního diamantu lze využít v orovnávačích brusných kotoučích.

3.2 Syntetické

3.2.1 Oxid hlinitý

Syntetický korund, někdy nazývaný jako elektrokorund, je nejběžnějším brusivem. Patří do skupiny oxidových keramik. Má stejné chemické složení, jako korund přírodní a jeho základní složkou je krystalický korund v nejběžnější modifikaci $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ s trigonální strukturou. Dále může obsahovat další sloučeniny, zejména oxidy křemíku, titanu, železa, vápníku a hořčíku. Získává se z bauxitových rud pomocí dehydratace v obloukových pecích tzv. Bayerovým procesem. (Způsobů výroby korundu je více, ale pro výrobu korundových abraziv se používá zpravidla Bayerův proces.) [18]

Umělý korund je velmi odolný proti působení téměř všech kyselin i zásad. Pouze při teplotách nad 900°C reaguje se soli alkalických kovů za vzniku aluminosilikátů. Při teplotách nad 1400°C reaguje s vodíkem, který korund redukuje na nižší oxidy hliníku. Při teplotách nad 2000°C může velké množství uhlíku rovněž zapříčinit jeho redukcí. [9] Tvrdost korundu se zvyšuje s jeho čistotou, pro broušení se používá korund s čistotou 85% až 99%. Korund vzniklý Bayerovým procesem běžně obsahuje $0,1\div 0,4$ hm.% NaO_2 (superoxid sodný), který zhoršuje řadu vlastností, potřebných pro náročné aplikace. pro dosažení požadovaných vlastností je nutné korund od NaO_2 čistit a případně i následně zušlechťovat, nebo modifikovat jinými sloučeninami. V průběhu slinování korundu může vzniknout i jeho hexagonální krystalická modifikace $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$. [18]

- **A99 Bílý korund**

Bílý korund obsahuje výrazně méně nečistot, příměsí a modifikátorů, než ostatní korundová abraziva. Protože obsahuje více, než 98,5% Al_2O_3 , můžeme ho považovat za ušlechtilý. Tento materiál je velmi křehký a zároveň nevyniká vysokou pevností. Z brusných nástrojů se proto nevytlamují celá zrna, nýbrž jejich části. Dochází tím k samoostření. Tento efekt je zvláště žádoucí při přesné práci, kdy se broušení provádí s malým přtlakem. Je vhodný pro broušení ocelí kalených, legovaných, feritických, austenitických, oceli na odlitky, litiny, tvrdého

bronzu a nízkouhlíkových ocelí. Dosahuje tvrdostí $9,2 \div 9,25$ Mohs, což přibližně odpovídá 1850 dle Knoopu (20,3GPa). A jeho hustota je se pohybuje okolo 3.97g/cm^3 . Velikost krystalů je cca $10\mu\text{m}$. [19] [9] [18] [20]

- **A98 Růžový korund**

Růžový korund vzniká příměsí legury- oxidu chromitého (Cr_2O_3), která způsobuje zvýšení počtu jednotlivých krystalů, než je tomu u bílého korundu, čímž se zlepšují brusné vlastnosti. Mikrotvrdost produktu se oproti bílému korundu nemění, ale pevnost lehce klesá. Je vhodný pro oceli různých tvrdostí, legované oceli se zvýšenou pevností, šedou litinu a oceli na odlitky. [19]

- **A97**

Chemicky odpovídá mikrokrytalickému korundu A97M. Přidáním příměsí do korundu A97 vznikají materiály: A97P- polokřehký, A97E- zirkonový.

- **A96 Hnědý korund**

Hnědý korund je velmi běžným brusným materiálem, který se využívá pro méně náročné aplikace, například zpracování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí, nebo šedé litiny. Jeho vyšší houževnatost mu umožňuje pracovat pod větším přítlakem. [1] [21]

- **Monokorund**

Je druh syntetického korundu s vyšší izometrií zrn a hladšími hranami zrn. Zrna jsou tvořena jednotlivými krystaly. V porovnání s hnědým korundem vykazuje vyšší tvrdost i houževnatost. Monokrytalický korund je vhodný pro broušení tvrdých nástrojových ocelí (62 HRC), rychlořezných, ložiskových a podobných tvrdých a houževnatých materiálů. Při řezu zrny monokorundu vzniká rovněž méně tepla, což je zapříčiněno větší ostroty zrn. Je proto vhodný pro aplikace citlivé na teplo.

(Jeho využití bylo plánováno pro široký záběr aplikací, ale ve větší míře se v průmyslu neuchytil. Neposkytuje totiž v žádné z oblastí využití výrazně lepší výsledky, než moderní mikrokrytalická abraziva, kterými ho lze částečně nahradit.) [21]

3.2.2 Korund s příměsí Ti_2O_3

Příměs oxidu titanitého zvyšuje oproti bílému korundu mikrotvrdost a tím zlepšuje brusné vlastnosti. [9]

3.2.3 Zirkonkorund (A97E)

Příměsí 10÷40% oxidu zirkoničitého (ZrO_2) do korundu vzniká materiál zvaný zirkonový korund, v praxi označovaný jako zirkonkorund. Tento materiál patří do skupiny Al_2O_3 - ZrO_2 kompozitů. Jedná se o dvoufázovou směs α - Al_2O_3 a tetragonálních polykrystalů oxidu zirkoničitého. Vyrábí se za teplot okolo 1950°C.

Mezi typické dodávané materiály patří ZA25 s příměsí cca 25% oxidu zirkoničitého, nebo ZA40 s 40% oxidu zirkoničitého.

Vlastnosti materiálu lze nastavit poměrem směsi a příměsí dalších oxidů (Fe_2O_3 , TiO_2 , SiO_2 , MgO). Optimální nastavení kompozitu má za následek výrazné zvýšení lomové houževnatosti, kde maxima dosahujeme při poměru 1:1 Al_2O_3 - ZrO_2 . Nejvyšší dosahovaná pevnost je 2500Mpa. Vyznačuje se vysokou houževnatostí, životností v brusném procesu a vysokou tepelnou odolností.

Typické využití zirkonkorundu je při vysokých řezných rychlostech a vysokotlakém broušení, kde umožňuje vysoký úběr materiálu. Je vhodný i pro broušení nerezových ocelí. Jeho tvrdost dosahuje cca 9,3 Mohs. [19] [9] [18]

3.2.4 Slinutý korund

Slinutý korund se v zásadě chemicky od běžného korundu neliší. Hlavním rozdílem je způsob výroby brousících nástrojů, kdy nástroje ze slinutého korundu nevyužívají pro spojení zrn, na rozdíl od běžného korundu, pojiva. Zrna jsou za vysoké teploty a tlaku vtlačena do sebe, čímž vzniká kompaktní celek. Regulací tlaku lze vytvářet různou úroveň porozity nástrojů, podle požadavků.

3.2.5 Karbid křemíku SiC

Karbid křemíku, označovaný jako karborundum, je chemická sloučenina uhlíku a křemíku, se vzorcem SiC , která patří do skupiny neoxidových keramik. Obsah prvků ve sloučenině je 70,045% křemíku a 29,955% uhlíku. Karbid křemíku byl prvním abrazivním materiálem získaným pomocí slinování. Sloučenina byla poprvé

syntetizována v roce 1885 tavením směsi jílu a uhlíku při teplotě vyšší, než 1600°C v elektrickém oblouku. Jeho průmyslová výroba byla zahájena v roce 1891 v USA. [9]

Karbid křemíku krystalizuje ve dvou uspořádáních. Jako α -SiC s hexagonální mřížkou a jako β -SiC s mřížkou krychlovou. Malý rozdíl elektronegativity mezi atomy uhlíku a křemíku zapříčiňuje v molekulách převahu kovalentní vazby (cca 88%), která je silná a orientovaná. [18] Proto karbid křemíku odolává vysokým teplotám, do 1600°C a je velmi tvrdý.

Nejlepší mechanické vlastnosti má karbid křemíku s jemnozrnnou mikrostrukturou. Jeho typické vlastnosti jsou: hustota 3,2 g/cm³, tvrdost 21-25 GPa (tvrdší, než korund), lomová houževnatost 3-6 MPa·m^{1/2}, Youngův modul 420 GPa, pevnost v ohybu 450-650 MPa, koeficient teplotní roztažnosti 4-5·10⁻⁶ K⁻¹, koeficient tepelné vodivosti řádově 50W/mK (poměrně vysoká tepelná vodivost- pro železo 80,2W/m.K), teplota tání 2730°C. [18]

Pro broušení se karbid křemíku dodává ve variantách: C49- zelený, pro broušení bronzu, hliníku, slinutých karbidů, vytvrzené litiny, austenitické i feritické oceli a nástrojové oceli a C48- černý, pro broušení šedé a bílé litiny, mosazi a mědi. Číslice za C udává zastoupení uhlíku v procentech. [13] [19]

3.2.6 Karbid boru B₄C

Karbid boru je velmi tvrdý umělý materiál. Dosahuje tvrdosti až 9,36 Mohs a jeho hustota je 2,52g/cm³. Taje při teplotě 2450°C a při styku s kyselinami a zásadami je neutrální. Používá se pro broušení a leštění velmi tvrdých materiálů, například slinutých karbidů, skla, keramiky, nebo nerostů a drahých kamenů.

Dále se používá jako materiál kontrolních tyčí pro jaderné reaktory, nebo ve vojenském průmyslu pro výrobu plátů do balistických vest a pancířů. [21]

3.3 Supertvrdé brusné materiály

3.3.1 Syntetický diamant

Diamant je zatím nejtvrdějším známým materiálem a úspěšně se používá pro výrobu brousicích nástrojů pro obrábění tvrdých materiálů. Na Mohsově stupnici jeho tvrdost dosahuje hodnoty 10, z pravidla je ale, vlivem nečistot, lehce nižší. Dále vyniká vysokou

pevností a odolností proti otěru. Při teplotách se jeho tepelná vodivost pohybuje mezi 600 W/m.K a 200 W/m.K. Při překročení 700°C jeho tepelná vodivost prudce klesá k 70 W/m.K. Jeho hustota je 3,5 g/cm³. [17] Diamant je rovněž velmi tvarově stálý, se změnou teploty se téměř nedeformuje. Nedochozí tak ke vzniku napětí uvnitř brusného nástroje a ani ke změnám jeho tvaru. Další zvláštní vlastností diamantu je anisotropie jeho tvrdosti a tím i jeho obrobitelnosti. Má krychlovou krystalickou strukturu tvořenou 18 atomy uhlíku, spojenými kovalentními vazbami. [9]

Protože je diamant tvořen výhradně uhlíkem, zachovává si i některé z jeho chemických a fyzikálních vlastností. Prvek uhlík má vysokou afinitu k železu a velmi snadno se v něm rozpouští. Tato vlastnost se začíná projevovat přibližně od 600°C. Při obrábění železa a jeho slitin diamantovými nástroji bychom se proto měli vyvarovat překročení této teploty, nebo diamantový nástroj raději nepoužívat. Při teplotách 850°C až 1000°C diamant na vzduchu hoří. [17] [9]

Syntetický diamant se od přírodního liší i velikostí krystalů, které jsou zpravidla menší. Jejich velikost se nejčastěji pohybuje na intervalu 0,2 ÷ 0,4 mm. Zrna syntetického diamantu se liší i tvarem a strukturou. Jejich povrch je výrazně členitější, drsnější a zrna mají ostřejší hrany s menším poloměrem zaoblení.

Diamant nalézá využití zejména při obrábění keramiky a slinutých karbidů. Používá se i k broušení optického skla a jako materiál pro hroty k měření drsnosti povrchů a tvrdosti. [9]

3.3.2 CBN (B₂N₃ - kubický)

Kubický nitrid bóru je β krystalovou modifikací nitridu bóru s krychlovou strukturou. Jeho existence byla předpovídána pro podobnost jeho hexagonální α modifikace grafitu. To nasvědčovalo, že by mohla existovat i jeho krychlová modifikace, podobně jak je tomu u modifikací uhlíku v případě diamantu a grafitu. Tato předpověď byla následně v roce 1957 potvrzena syntetizací prvního vzorku. [9]

Kubický nitrid bóru má strukturu velmi podobnou diamantu, je rovněž tvořená 18 atomy. Na rozdíl od diamantu, který má všechny vazby kovalentní, jsou vazby kubického nitridu bóru z 75% kovalentní a z 25% iontové. Mřížka CBN je rovněž lehce větší. Tyto rozdíly mají vliv zejména na tvrdost a pevnost CBN, které jsou nižší, než u diamantu. [17] [9] CBN je na vzduchu velmi teplotně stálý, až do 2000°C a dobře

odolává teplotním rázům. Při teplotě nad 2500°C se jeho struktura mění zpět na výchozí hexagonální. Je citlivý na působení vody, která při vysoké teplotě způsobuje jeho rozklad. Proto se používá s procesními kapalinami na bázi oleje. [9]

CBN dosahuje tvrdosti přibližně 4500 dle Knoop a jeho hustota je 3,47 g/cm³. [22] Hodí se pro broušení tvrdých a křehkých materiálů, jakými jsou například sklo, keramika, granit. Dále poskytuje vynikající výsledky při broušení nástrojových, vysoce legovaných a nelegovaných ocelí, povrchů tvrdších než 50 HRC, superslitin tvrdších než 35 HRC a šedé a bílé litiny. [19] [9]

4 Nové brusné materiály

4.1 Mikrokrystalická brusiva na bázi Al₂O₃

Oxid hlinitý řadíme do skupiny materiálů zvaných oxidová keramika. Tyto materiály mohou disponovat řadou mimořádných vlastností, mezi které může patřit vysoká tvrdost, vysoká odolnost proti opotřebení (otěru), chemická stabilita, vysoká teplotní odolnost, dobré kluzné vlastnosti a mohou být i bioinertní. Díky těmto vlastnostem je lze použít pro nejrůznější aplikace. Ať už jako konstrukční materiály pro speciální určení, izolanty, pro výrobu kluzných ploch náhrad kloubů v medicíně, až po abraziva.

Oxid hlinitý je tedy z chemického i fyzikálního hlediska velmi stabilní látka, která nabízí široké možnosti výroby materiálů a výrobků s různými vlastnostmi. Všechny ale spojuje zejména vysoká tvrdost a relativně vysoký modul pružnosti (cca 400 GPa). [9]

Oxid hlinitý nabízí řadu možností pro modifikace a zlepšování jeho vlastností, například pomocí legování nebo modifikace jeho mikrokrystalické struktury při precipitaci působením katalyzátorů. Zlepšené vlastnosti brusných zrn s mikrokrystalickou strukturou lze dále měnit změnami jejich geometrického tvaru. Tato zrna poté vykazují různé lomové charakteristiky a různé chování v řezu.

Tyto varianty oxidu hlinitého s modifikovanými vlastnostmi lze, při výrobě brusných nástrojů, kombinovat, pro dosažení požadovaných výsledků. Vlastnosti brusných nástrojů z materiálů na bázi oxidu hlinitého lze dále měnit uspořádáním brusných zrn, nebo útvarů, na nástroji, do větších brusných útvarů, uskupení či struktur. Nástroje z těchto materiálů jsou proto často určeny pro provoz v konkrétním směru.

Vlastnosti mikrokrystalického korundu dosahují lepších hodnot, než u standardního bílého korundu A99. Pro srovnání Tvrdost dle Knoopu stoupá z 1850 na hodnoty okolo 2150, Faktor intenzity napětí stoupá z 2,7 na $3,5 \div 4,3 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$. Mikrokrystalický korund je tedy i přes zvýšenou tvrdost (cca 5%) odolnější proti lomu, což umožňuje jeho využití v náročnějších aplikacích, při broušení zvláště tvrdých materiálů a při vyšších rychlostech. Zároveň je tím zvýšena životnost zrn v řezu.

Tato odolnost zrn proti lomu ale vede ke snížení efektu samoostření při broušení měkkých materiálů nebo nízkými rychlostmi nebo s malým přtlakem, což vede k zanášení brusných nástrojů. [20]

4.1.1 Sol-gel

Sol-gel je speciální metoda výroby keramických materiálů, která je založena na principu výroby koloidního roztoku (solu) ze základní suroviny, v případě výroby abraziv böhmitu (hydratovaná forma oxidu hlinitého) a vody. A následné výroby gelu z tohoto roztoku přidáním příslušného rozpouštědla. Mikrokrystalická zrna korundu vznikají následným slinováním produktu tohoto procesu (gelu).

Zjednodušený postup výroby mikrokrystalického korundu je následující: Drcený böhmit je smíchán s vodou, čímž vzniká jeho koloidní roztok, takzvaný sol. Pro usnadnění rozptylu je do vody přidáno malé množství kyseliny dusičné. V dalším kroku je do solu přidáno, za zvýšené teploty, větší množství kyseliny dusičné, nebo roztoku dusičnanu, například hořečnatého. To vede ke vzniku gelu dehydratací a polymerizací výchozího solu. Kyselina dusičná se používá v obou těchto krocích, je proto důležité dodržovat velmi přesné poměry přidávaných činidel, vody a böhmitu.

Böhmit je v gelu rovnoměrně rozptýlen. Gel je následně sušen při teplotě 80 až 100°C. Výsledný křehký a sypký materiál je drcen, aby mohl být později prosíván, za účelem separace různých velikostí zrn.

Zrna v této fázi procesu stále obsahují hydroxid hlinitý, který je ve výsledném produktu nežádoucí. Zahřátím na teplotu 450 až 550°C z něj dočasně vzniká fáze $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. Tato fáze reaguje s böhmitem, čímž se uvolňuje jako dusík v podobě kyseliny dusičné s vodou. Tato reakce se nazývá kalcinace. [20]

Poslední fází výroby mikrokrystalických zrn je slinování, během kterého je zvyšována teplota na $1200 \div 1500^\circ\text{C}$. Získaný materiál je poté přesíván a tříděn podle norem. (ISO, FEPA) [22] [23] [20]

4.2 3M: Cubitron™

V 80. letech 20. století zaznamenáváme na poli výroby abrasiv velký vývoj. Americká firma 3M (Minnesota Mining and Manufacturing) přichází v roce 1981 s abrazivem z mikrokrystalického slinovaného korundu s obchodním názvem Cubitron™.

Jedná se o slinovaný materiál s vícefázovou kompozitní strukturou. Zrna mají nepravidelný tvar, ostré hrany a skládají se ze slinutých krystalů $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. Krystaly mají velikost od $0,1 \div 1 \mu\text{m}$ a obsahují přibližně 98% korundu. Hustota zrn se pohybuje okolo $3,87 \text{ g/cm}^3$ a mají tvrdost 21,5 GPa. [24]

Při správném nastavení podmínek broušení vykazují zrna Cubitronu dobré samoostřicí schopnosti. Samoostření probíhá na principu vylamování jednotlivých krystalitů z povrchu zrn, čímž vznikají nové ostré hrany. Tím se výrazně prodlužuje životnost kotouče a zvyšuje se produktivita broušení. Nástroj totiž není nutné tak často orovnávat. Dále samoostření přispívá, ve srovnání s bílým korundem, k citelnému snížení teploty v oblasti broušení.

Díky nepravidelnému tvaru zrn a i přes snížení poloměrů zaoblení jejich hran oproti standartnímu bílému korundu, jsou poloměry zaoblení zrn Cubitron stále větší, než u CBN, nebo zrn Cubitron™ II. Při stejné zrnitosti by proto měla zrna Cubitron dosahovat nižší drsnosti broušeného povrchu. [24]

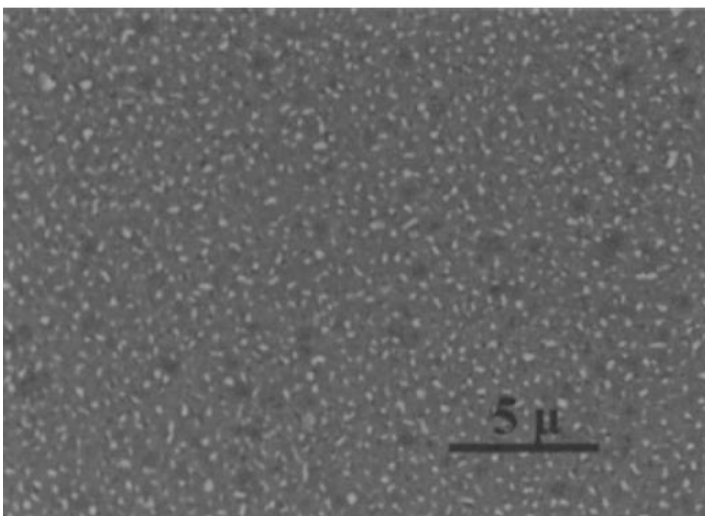
Právě nepravidelný tvar zrn ale zároveň omezuje schopnost povést čistý mikrořez jediným brusným zrnem a zvyšuje pravděpodobnost vylomení celého zrna. Nutnost odstranit tyto nežádoucí vlastnosti vedla k dalšímu vývoji směrem k zrnům s řízenou geometrií. [24]



Obr. 16- Zrna Cubitron [24]

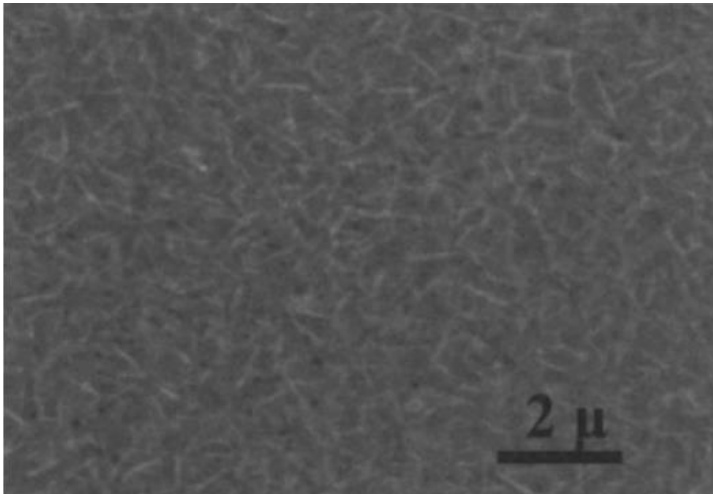
Cubitron svými vlastnostmi výrazně překonal konvenční korundová abrasiva, včetně zirkonového korundu, zejména při broušení uhlíkových ocelí. Při broušení ocelí korozivzdorných zlepšení pozorováno nebylo.

Za účelem zlepšení vlastností zrna při broušení korozivzdorných ocelí, bylo vyvinuto zrno z polykrystalickou korundovou strukturou modifikovanou oxidem yttritým (Y_2O_3). Ten reaguje s korundem za vzniku precipitátů yttria o velikosti cca 60 nm v matici krystalitů korundu o velikosti cca 3 μm . Tento abrazivní materiál již dosahoval, při specifických podmínkách, dobrých výsledků při broušení nerezové oceli, byl ale velmi nákladný, zejména kvůli obsahu oxidu yttritého 10%. Dále bylo zjištěno, že aplikace chemických látek podporujících broušení (aktivátor mletí) v podobě povlaku nástroje, tzv. „Grinding aid“, obsahujících halogeny, schopnost brousit korozivzdornou ocel výrazně zvyšuje.



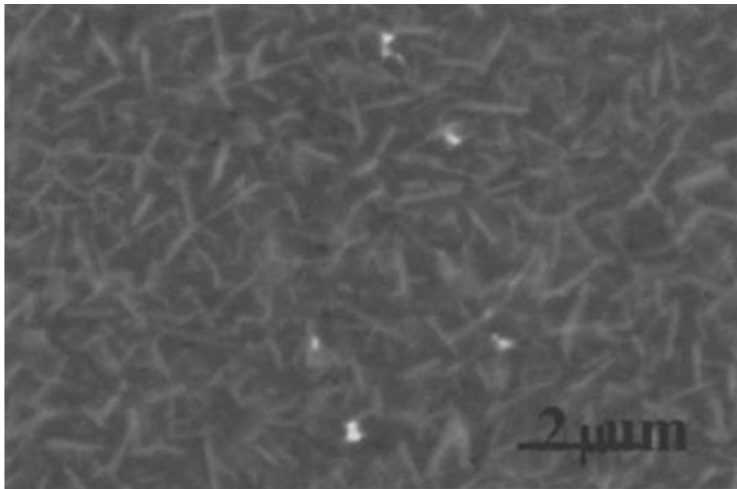
Obr. 17- Mikrokristalický oxid hlinitý legovaný yttriem [25]

Navazující studie ukázaly, že přidáním některých kovů vzácných zemin a hořčíku lze výrazně změnit chování materiálu při slinování a jeho výslednou mikrostrukturu. Výsledkem zkoumání byl abrazivní minerál se souvislou maticí krystalitů oxidu hlinitého o velikosti $3 \div 5 \mu\text{m}$, ve které se nachází rovnoměrně rozptýlená sekundární fáze magnetoplumbitu. Magnetoplumbitová fáze má šesterečnou strukturu. V jejích elementárních buňkách se nachází vrstvy minerálu spinelu (MgAl_2O_4) s ionty Al^{3+} a Mg^{2+} oddělené iontem lanthanoidu. Vrstvená struktura má za následek precipitaci magnetoplumbitu v podobě destiček. Materiál s tímto složením a mikrostrukturou vykazuje vysokou tvrdost i houževnatost, což jej činí vynikajícím abrazivem. Od roku 1990 je prodáván pod obchodním označením Cubitron 321 a nachází uplatnění v podobě brusných kotoučů pojených pryskyřičnými pojivy i jako brusivo na podložce. [20] [25] [24]



Obr. 18- Mikrostruktura zrna Cubitron 321 (destičky magnetoplumbitu se jeví světlé) [25]

Mikrostruktura korundo-magnetoplumbitových zrn může být dále přizpůsobována konkrétní průmyslové aplikaci. Použití kationtů jiných lanthanoidů- například gadolinia. A dvojmocného kovu, například zinku. Způsobí tvorbu velmi podobné lamelární struktury, jako je tomu v případě Cubitronu 321, avšak struktura je výrazně hrubší. To je způsobeno zejména nárůstem velikosti elementární buňky magnetoplumbitové fáze. 3M tento produkt označuje jako Cubitron 331. Jeho hrubší mikrostruktura má za následek, ve srovnání s Cubitronem 321, zlepšení brusných vlastností, zejména při vysokotlakém broušení při jeho použití jako brusiva na podložce. [25] [20]



Obr. 19- Cubitron 331- oxid hlinitý legovaný zinkem a gadoliniem [25]

Magnetoplumbitová sekundární fáze v materiálech Cubitron 321 a 331 má kromě zvýšení houževnatosti pozitivní vliv na teplotní odolnost. Díky tomu lze použít v keramicky pojených brusných nástrojích, které se vyrábí při teplotě $900^{\circ}\text{C} \div 1300^{\circ}\text{C}$. Při těchto teplotách dochází u jiných keramických materiálů na bázi korundu k růstu zrn, čímž může dojít k výraznému zhoršení fyzikálních vlastností.

Další zajímavou vlastností materiálu Cubitron 321 je schopnost řízeného rozkladu magnetoplumbitové fáze během agresivního broušení. Tedy za vysokého přtlaku a teploty. Podmínkou je použití procesních kapalin Quantalube[®] 270 nebo Quantalube[®] 275 (obchodní značky americké společnosti Milacron), nebo chemických látek aktivujících mletí, například KBF_4 . Rozpad této fáze pomáhá odkrývat nové vrstvy abraziva v nástroji, čímž efektivně předchází nabalování materiálu obrobku na brusný nástroj a zacpávání jeho pór. Při broušení tak nedochází k nadměrnému tření a z toho vyplívajícímu tepelnému ovlivnění. [25]

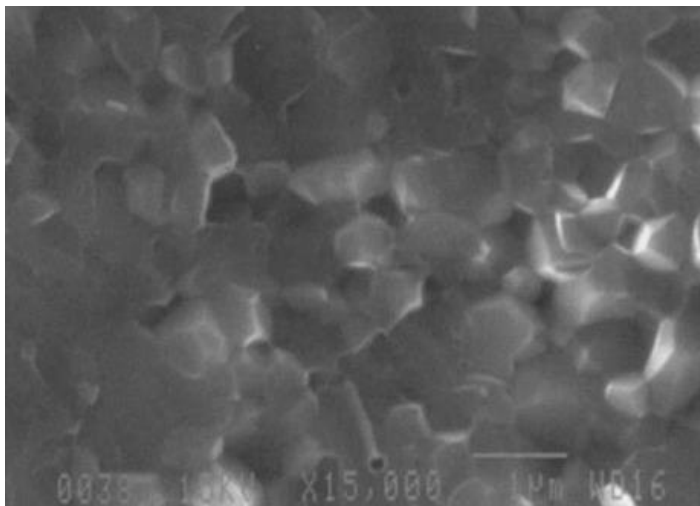
Mezi lety 1986 a 1991 došly výzkumné skupiny několika soukromých společností i univerzit nezávisle na sobě k důležitému objevu. Přidáním jemně namletého $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ do böhmitu, ve fázi výroby koloidního roztoku, dojde k silné podpoře růstu krystalů $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ v jemné, mikrokystalické, struktuře vyráběných abrazivních částic. V anglické literatuře je tato metoda označována jako „Seeding“ - tzv. setí, nebo vysévání krystalů $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. [22] [20] [25] (Za české synonymum pro tento princip zahájení, nebo ovlivňování krystalizace, lze použít slovo očkování.)

Společnost 3M, jeden z objevitelů této metody, následně přišla s takzvaným „ $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ očkovaným abrazivem“ [25], které mělo nahradit původní zrno Cubitron. Tento

materiál obsahoval oxid hořčíku jako leguru a jeho výroba byla výrazně snažší. Zároveň si však zachoval velmi podobné vlastnosti. Výroba původních verzí zrn Cubitron, legovaných kovy vzácných zemin, nebo oxidem yttria, ale přerušena nebyla.

V roce 1987 společnost 3M nahradila zrno „seeded“ za zrno obsahující goethit (minerál α -FeOOH), který v něm působí jako nukleační činidlo pro přeměnu fáze α -Al₂O₃. Goethit (α -FeOOH) a α -Al₂O₃ jsou do jisté míry izostrukturální, nesoulad v parametrech jejich krystalických mřížek je cca 5%.

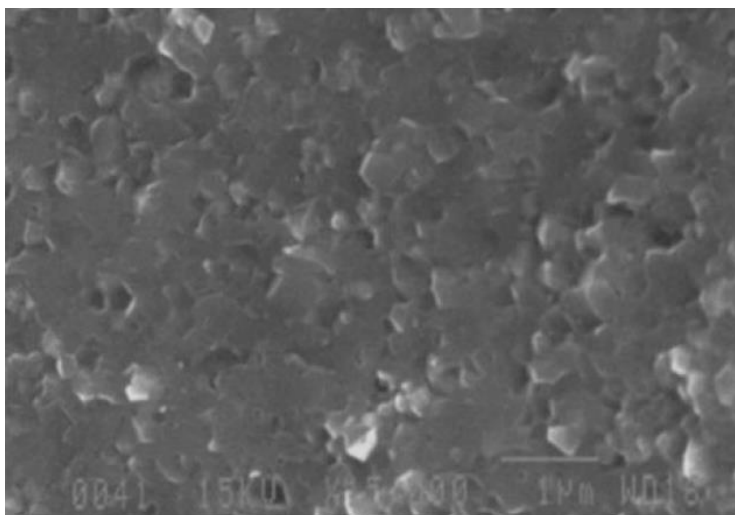
Přidání goethitu do böhmitového solu způsobuje nukleaci alfa oxidu hlinitého při výrazně nižší teplotě, než za běžných podmínek. Následkem toho dojde k prudkému zvýšení počtu míst vykazujících růst fáze alfa. Tím vzniká velmi homogenní a na fázi alfa bohatý mikrokristalický korund, ve kterém mají jednotlivé krystaly často velikost menší, než jeden mikrometr. Bylo zjištěno, že takovýto materiál je zejména vhodný pro broušení méně tvrdých, zejména konstrukčních ocelí, nebo při vysokém přitlaku. [25]



Obr. 20- Lom mikrokristalickým, goethitem nukleovaným, zrnem Cubitron 201, obsahujícím 4,5% váhových MgO. [25]

Přidáním malého množství křemíku lze dosáhnout výrazně odlišné lomové charakteristiky a zjemnění mikrostruktury daného keramického materiálu. Na základě těchto poznatků byl zahájen vývoj zrna Cubitron 222.

Cubitron 222 má oproti 201 výrazně jemnější mikrostrukturu, která umožňuje dosáhnout rovnoměrnějšího opotřebení materiálu v průběhu broušení a tedy i lepší schopnost zachovávat jeho abrazivních vlastnosti. Cubitron 222 se hodí pro broušení hliníku a jeho slitin, k nízkotlakému broušení slitin železa a lze ho s dobrými výsledky uplatnit i při opracovávání dřeva. [25]



Obr. 21- Zrno Cubitron 222 [25]

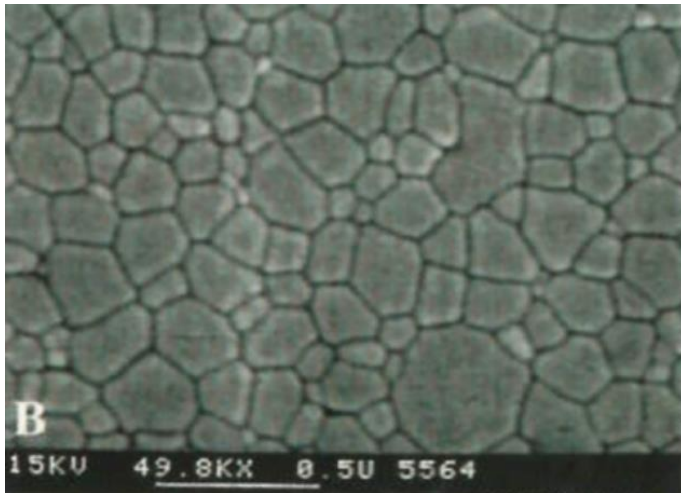
Materiálů Cubitron™ existuje, a souběžně se vyrábí, mnoho. Je to dáno postupným vývojem a vylepšováním produktu a potřebou cílit na konkrétní aplikaci brusiva.

Dodává se pod označeními Cubitron 321, Cubitron 324, Cubitron 421 (vystužen whiskery- vlákny karbidu křemíku) [26], Cubitron 222, Cubitron 777, a další, kde rozdílné číselné označení nemusí nutně znamenat jiné chemické složení samotného zrna Cubitron, nýbrž například různý poměr zrna Cubitron s korundem, rozdílnými pojivy, nebo jinými vylepšeními brusných nástrojů (Grinding Aid).

4.3 Saint-Gobain/Norton: SG, TG, DG

4.3.1 SG™- seeded gel- Cerpass XTL

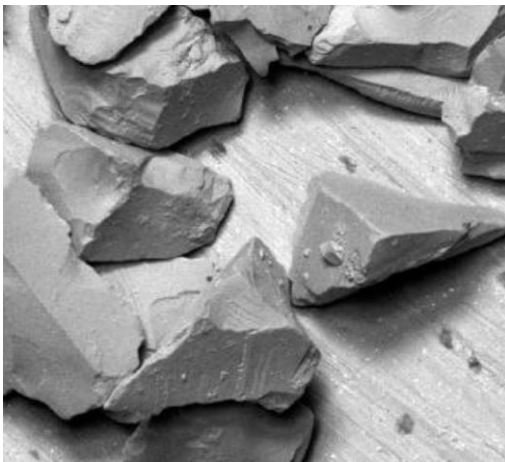
Materiál SG™, známý také například pod obchodním označením Cerpass XTL™, je patentovaný produkt firmy Norton, představený v roce 1984. Jedná se o keramické zrna na bázi oxidu hlinitého s mikrokrytalickou strukturou tvořenou převážně $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. Velikost jednotlivých krystalů v každém zrně se pohybuje v intervalu $0,1 \div 1 \mu\text{m}$, zpravidla je však menší, než $0,2 \mu\text{m}$. (Standartní velikost krystalu bílého korundu je 10 až 20 mikronů.)



Obr. 22- Mikrostruktura zrna SG [27]

Hustota SG je $3,87\text{g/cm}^3$ a jeho tvrdost dosahuje až 9,4 Mohs (21.6 GPa). Chemicky se tvořen 99,6% alfa oxidem hlinitým, je to tedy jednofázový a velmi chemicky čistý produkt. [22] [28]

Zrno SG vyniká ostrým lomem. Zrna mají velmi ostré hrany, plošky, a jednotnější tvar, než zrna bílého korundu. [20]



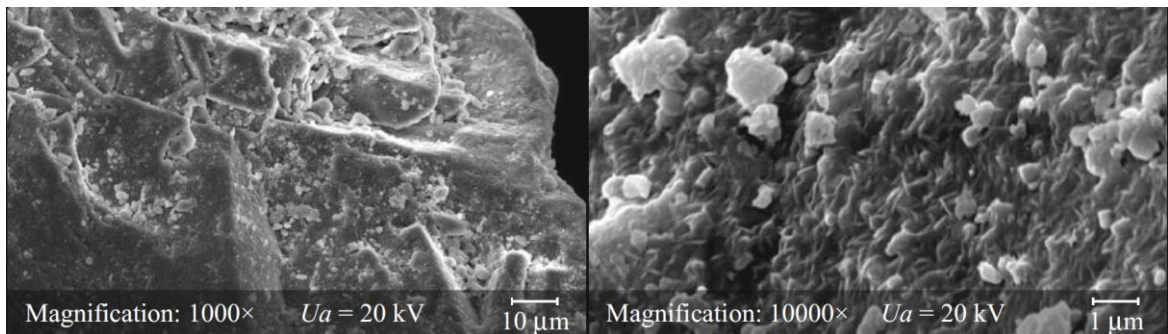
Obr. 23- Zrna SG™ [20]

Životnost zrn SG v řezu je $5x \div 30x$ vyšší, než životnost bílého korundu. SG je určeno pro aplikace, kde je vyžadován velký a rychlý úběr materiálu a zejména vysoká efektivita a produktivita obrábění, s cílem snížit náklady. [22] [20]

SG se vyrábí, jak jeho název napovídá technologií sol-gel, a své vlastnosti získává díky metodě „seeding“, kterou lze označit jako očkování, a je detailně popsána v předchozí kapitole o materiálu Cubitron™. Složení těchto materiálů je totiž velmi podobné. A to

do té míry, že vedlo k rozsáhlým a dlouhotrvajícím soudním sporům mezi společnostmi Saint-Gobain Abrasives a 3M.

Brusivo SG se pro optimalizaci nákladů, zvýšení efektivity a zejména pak pro zabránění vzniku nežádoucích sil, které by vysoká pevnost a houževnatost zrn mohla vyvolat, mísí v různém poměru s běžným taveným korundem. Tyto směsi jsou označovány následujícím způsobem: 1SG obsahuje 10% zrn SG, 3SG obsahuje 30% zrn SG, 5SG 50% a SG 100%. [22] [19] Poměrný objemový obrus G abraziva SG se liší v závislosti na poměru mísení s taveným korundem. V každém případě ale dochází, oproti samotnému bílému korundu, k výraznému zlepšení. Čisté SG vykazuje zvýšení hodnoty G o 1300%, 5SG o 920% a 3SG o 900% [22]



Obr. 24- (zleva) Zrno SG zvětšeno 1000x a 10 000x [20]

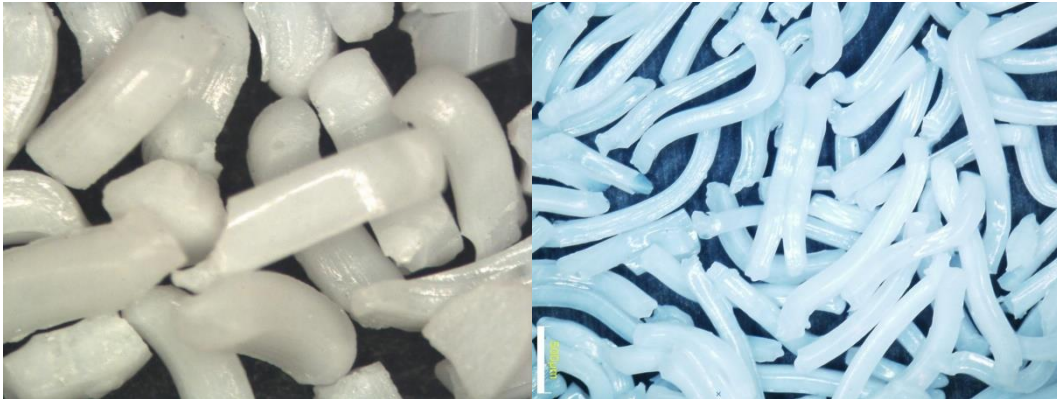
4.3.2 TG™- „Targa“ Cerpess TGE

Dalším vývojovým stádiem abraziv byl vynález abrazivního zrna s podlouhlým tvarem, které je označováno jako zrno TG™ a které bylo představeno roku 1993 [20]. Prodává se pod různými obchodními názvy, např. Cerpess TGE™. Chemické složení, a tedy i základní fyzikální vlastnosti jsou, až na tvrdost, která klesá z 21.6 GPa, na 21 GPa, shodné se zrnem SG. Liší se však podlouhlým tvarem, který vzniká technologií extrudování před slinováním zrn. [27] Podlouhlý tvar mění chování zrn v řezu a vytváří podmínky pro výrobu nástrojů s výrazně odlišnou strukturou, zejména pak s vysokou porozitou. [27]

Zrno TG je vyráběno ve dvou variantách s odlišným poměrem stran. Standartní TG má poměr stran 4:1 a zrno označované jako TG2 má poměr stran 8:1.

Tvar zrna umožňuje provádět agresivní řez za použití menších sil a zároveň zajišťuje vysokou porozitu nástrojů. Otevřená struktura nástrojů usnadňuje dopravu procesní kapaliny do místa řezu. [20] [27] Zrno TG je vhodné zejména pro broušení ložiskových

ocelí, nástrojových ocelí a pro hluboké broušení a broušení ozubených kol a těžko
obrobitelných slitin, např. Inconel. [19] [20] [27]



Obr. 25- (zleva) Zrna TG a TG2 [27]

Zrna TG se rovněž, za účelem snížení působení nežádoucích sil v procesu broušení,
nebo za účelem optimalizace vlastností brusného nástroje, mísí s běžnými tavenými
abrazivy. Produkt směsi zrna TG a růžového korundu se prodává pod obchodním
označením TGP™. [20] [26]



Obr. 26- Zrno TG mísené s růžovým korundem [20] [26]

4.3.3 DG™- „Delta“ Cerpass DGE

Zrno DG má stejné chemické složení a mikrokrystalickou strukturu, jako SG. Liší se
zejména tvarem a lomovou charakteristikou. Jeho tvrdost je 21,6 GPa a má poměr
stran 2,5:1. [27]

DG má oproti SG výrazně ostřejší hrany a při jeho zatížení dochází k lasturovitému
lomu, který vede k současnému zvyšování počtu řezných hran. Tento efekt má za
následek zvyšování řezivosti kotouče v průběhu procesu broušení. [19]

Zrno DG bylo vyvinuto pro potřeby aplikací s nižšími řeznými silami nebo pro broušení měkkých materiálů. Dle interního výzkumu společnosti Saint-Gobain zrno DG svými vlastnostmi údajně překonává standartní brusivo SG a řadu konkurenčních produktů. [27]



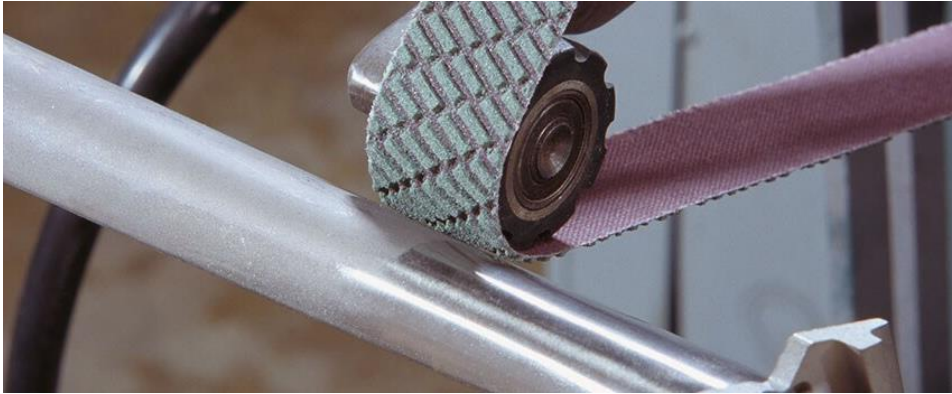
Obr. 27- Zrna DG [27]

4.4 Trizact™

Brusivo Trizact™ vyvinuté společností 3M patří mezi takzvaná strukturovaná abraziva. Pro výrobu těchto struktur používá 3M technologie, které označuje jako mikroreplikaci a makroreplikaci. Trizact byl vyvinut pro použití na brusných pásích pro dokončování a leštění. Zároveň byl navržen s cílem snížit počet kroků nutných pro dosažení kvalitního povrchu. Pás Trizact, s drsností ekvivalentní FEPA P400, lze nasadit přímo jako další krok po ručním, nebo strojním broušení pásem zrnitosti FEPA P120. Přeskakuje se tak několik kroků, které by byly, při použití konvenčních pásů, pro dosažení stejného výsledku nezbytné. Tím dochází ke snížení časové náročnosti dokončovacích operací, spotřeby brusiva i nákladů. [29] [30]

Pásy Trizact mohou být využity pro leštění a úpravu povrchu před pokovováním, nebo povlakováním, pro dokončování povrchů titanových implantátů, nebo pro leštění a úpravy povrchů obtížně obrobitelných niklových slitin, ale i sklokeramiky (Zerodur™), nebo Optického skla (Boroflat™). [30]

Hlavní výhodou materiálu Trizact je zejména pravidelnost uspořádání brusných zrn na nástrojích, která zajišťuje rovnoměrné opotřebení pásu a konzistentní a předvídatelné výsledky po celou dobu životnosti pásu.

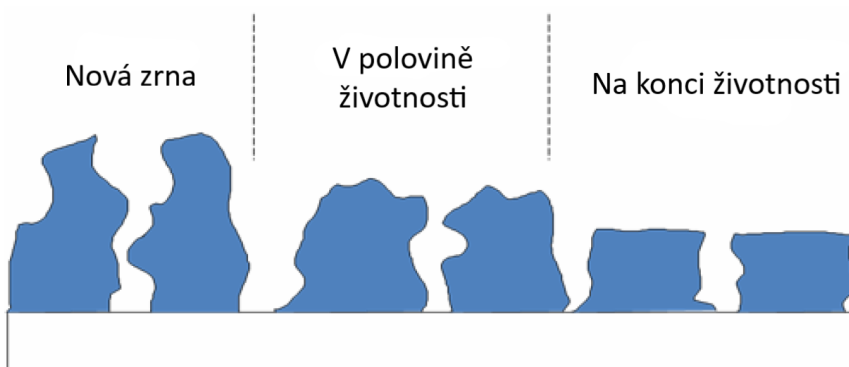


Obr. 28- broušení pásem Trizact [31]

Materiál Trizact se skládá z drobných brusných útvarů, tvořených velmi jemnými elementárními zrny oxidu hlinitého a pryskyřičným pojivem. Výjimkou jsou materiály 963FA, který obsahuje zrna Cubitron 1. generace a 663FC, který obsahuje zrna diamantová. [29] [32]

Tyto útvary jsou umístěny na podkladovém pojivu, které zajišťuje adhezi k, zpravidla textilnímu, podkladu. Pomocí uspořádání zrn do brusných útvarů lze přesně regulovat množství a polohu abraziva na nástroji, čímž se zvyšuje opakovatelnost broušení a pás se opotřebovává rovnoměrně po celou dobu životnosti. [29]

Opotřebení standartního brusného pásu znamená jeho znehodnocení a je nutné ho vyměnit. Opotřebením brusných pásů s abrazivními útvary (strukturované) dochází k odkrytí další vrstvy zrn uvnitř brusného útvaru, a obnově řezivosti nástroje. Protože se opotřebením brusných útvarů zvětšuje styčná plocha nástroje a obrobku, dochází ke zrychlení úběru materiálu a zároveň i ke zvýšení tření. Pro snížení tepelného namáhání obrobku je vhodné s opotřebením brusných útvarů snižovat přítlak. Při robotickém broušení lze využít aktivní systém řízení přítlaku. [30] [31] [33]



Obr. 29- mechanismus opotřebení zrn konvenčního pásu [29]

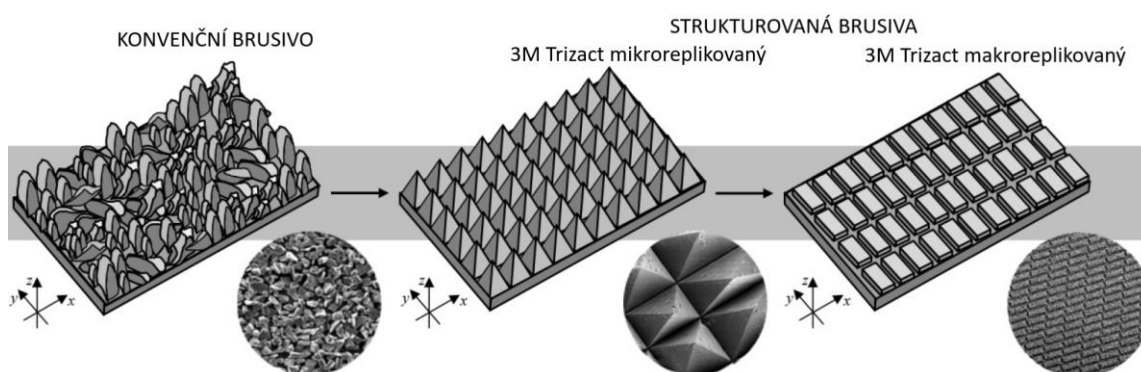


Obr. 30 Mechanismus opotřebení strukturovaného pásu [29]

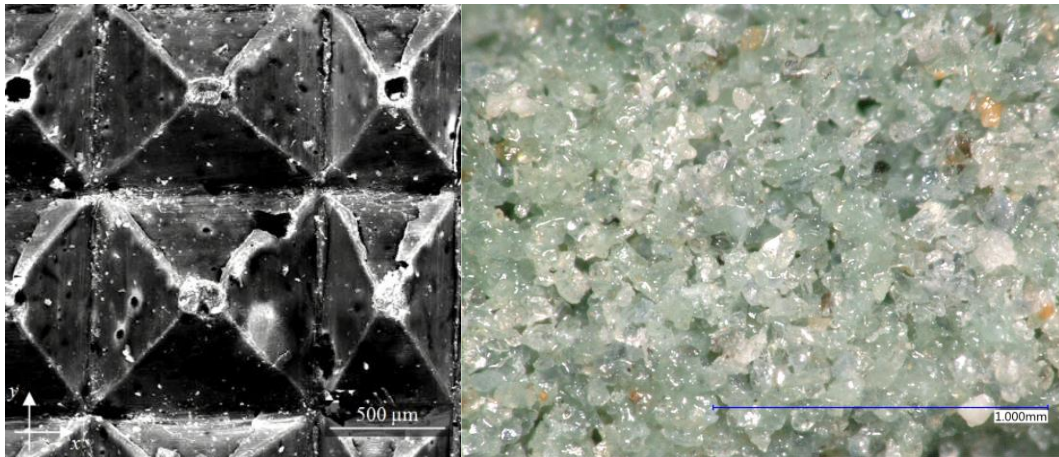
Existují 2 základní typy abraziva Trizact. Mikroreplikovaná verze má podobu velmi drobných pyramid s pohledově hladkým povrchem. Tyto pyramidy jsou několika typů s různým poměrem stran a opakují se. Představitelem této verze je Trizact 237AA. Další variantou je tzv. makroreplikovaná verze. Její brusné útvary mají obdélníkový tvar a vizuálně i na dotyk hrubý povrch. Představitelem je Trizact 337DC.

Obě verze plní funkci dokončovacího nástroje velmi dobře. Verze 337DC je vhodná pro broušení neželezných kovů a jejich slitin a pro použití na dílenských bruskách (broušení z ruky). Při snížených řezných podmínkách s ní lze brousit i plasty. Mezery mezi obdélníkovými útvary podporují odvod třísek a chlazení.

Verze 237AA je vhodnější pro broušení komplikovaných tvarových ploch volným pásem, protože je dodáván na poddajnějším podkladu, a díky menším rozměrům brusných útvarů jej lze snáze deformovat. Zároveň je vyráběn s vyššími zrnitostmi. [32] I přes velmi odlišný vzhled jsou brusná zrna uvnitř brusných útvarů na obou verzích uspořádána stejně. [32] [33]



Obr. 31- Porovnání struktury brusných pásů [30]



Obr. 32- Zleva: struktura materiálu Trizact 237AA A160 [30], struktura abrazivního útvaru Trizact 337DC A65- zvětšeno 200x.

Trizact 337 má výrazně poréznější strukturu.



Obr. 33- pohled na uspořádání brusných útvarů materiálu Trizact 337DC [34]

Kvůli nekonvenčnímu tvaru i struktuře zrn společnost 3M připravila svůj vlastní systém hodnocení zrnitosti (nebo spíše hrubosti) svých strukturovaných abraziv. Označení je odvozeno od průměrné velikosti elementárního zrna v µm a začíná písmenem A. [30] [32]

Tab. 2- Ekvivalentní hodnoty zrnitostí 3M strukturovaných abraziv a FEPA P [30] [32]

Hrubost strukturovaného brusiva Trizact™	Ekvivalentní hodnota FEPA P
A003	P3500
A005	P3000
A006	P2000
A016	P1200
A020	P1000
A030	P600

A040	P500
A045	P400
A060	P320
A065	P280
A080	P240
A090	P220
A100	P220
A110	P180
A130	P150
A160	P120
A300	P80
A400	P60

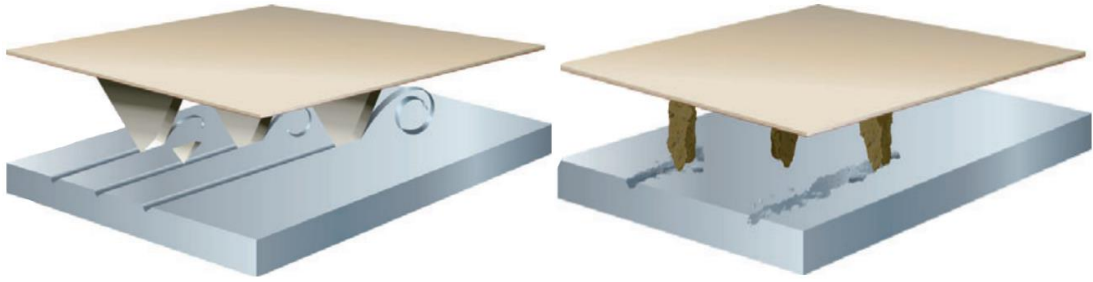
4.5 Cubitron™ II

Nedostatečně uspokojivé vlatnosti materiálu Cubitron™ při broušení těžko obrobitelných slitin, zejména nízká schopnost provést čistý mikrořez (obr._dole_) a velké riziko vylamování celých zrn vlivem jejich vysoké houževnatosti a pevnosti, vedly k vývoji zrn s řízenou geometrií.

Cubitron™ II lze mezi tyto materiály zařadit. Jedná se o zrna slinutého submikrokrytalického oxidu hlinitého s vícefázovou strukturou, přesně tvarovaná do trojúhelníkových plochých útvarů.

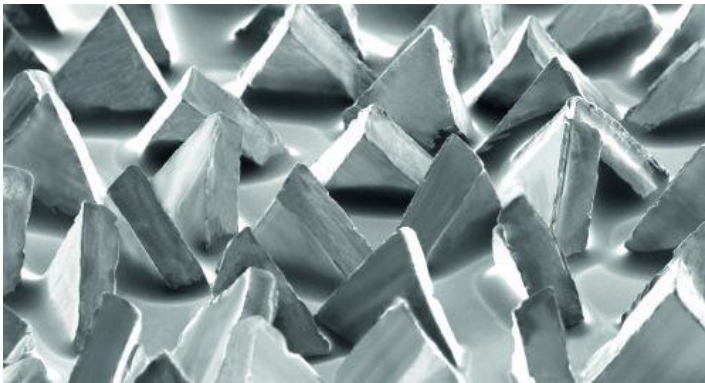
Společnost 3M tato zrna označuje jako Precision Shaped Grain (přesně tvarované zrno) a technologii jejich výroby nazývá tzv. mikroreplikací.

Zrna jsou velmi ostrá, mají pravidelný tvar, téměř stejnou velikost a schopnost samoostření. V řezu se chovají předvídatelněji, než konvenční brusiva a vynikají výrazně pravidelnějším řezem. Tyto drobné trojúhelníkové útvary se způsobem úběru materiálu podobají ostří frézy. Jejich tvar zároveň snižuje odpor a tření při průchodu broušeným materiálem, čímž se snižuje množství vytvořeného i vneseného tepla. Zároveň dochází ke snížení míry tvorby nárůstků. Velká část tepla je, podobně jako při běžném třískovém obrábění nástroji s definovanou geometrií břitu, odvedena mimo obrobek třískami. [35] [36] [37] [38]



Obr. 34- Ilustrace porovnání úběru materiálu zrna Cubitron™ II a konvenčním abrazivem [24]

Materiál Cubitron™ II vyniká vysokou životností v řezu (různé zdroje uvádí až 5x vyšší životnost, oproti běžným kornudnovým nástrojům) a zároveň i skvělou schopností ubírat materiál. Proto dosahuje, oproti konvenčním abrazivům, výrazného zlepšení hodnot poměrného objemového obrusu G. [35] [37]



Obr. 35- Pohled na zrna materiálu Cubitron™ II [36]

Cubitron™ II je určen pro provoz při rychlostech okolo $45 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Zejména při použití strojů s počítačovým číslicovým řízením, lze pomocí něj dosáhnout vynikajícího povrchu s nízkou drsností (až cca $R_a 0,14 \mu\text{m}$) a velmi příznivého materiálového nosného podílu, připomínajícího výsledky honování. [37] Při ručním broušení naopak vyniká vysokou rychlostí úběru materiálu a vysokou životností, například při ručním opracování litých polotovarů. [35]

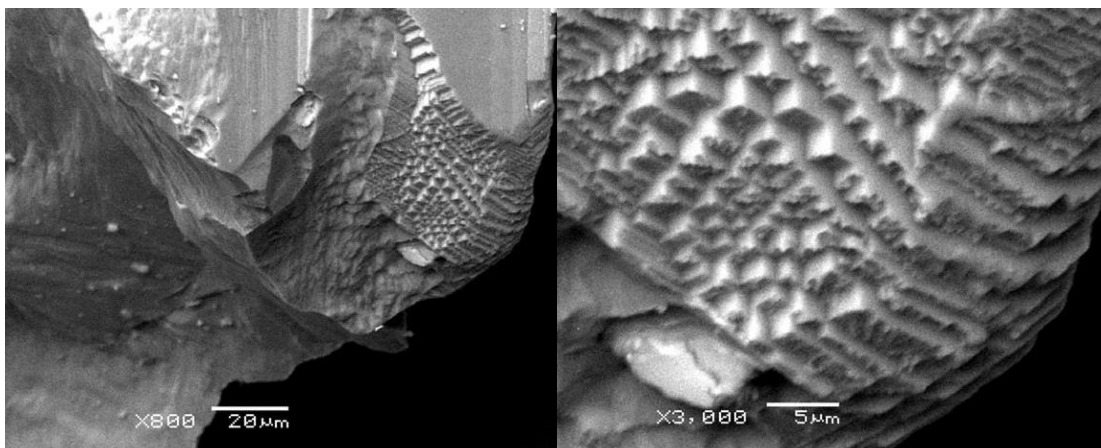
Cubitron II je hojně využíván takřka ve všech aplikacích abrazivních technologií. Lze se s ním setkat při přesném broušení pomocí kotoučů, na řezacích kotoučích, nebo jako s brusivem na podložce. Pro broušení brusivem na podložce je dodáván ve více variantách. Velmi rozšířenými variantami jsou 984F a 784F, kde 984F je určena pro broušení se strojním přítlakem, například pomocí robotů, a nástroje kromě složek Grinding-aid obsahují 100% podíl brusného zrna Cubitron II. A 784F, která obsahuje směs zrn Cubitron II a taveného bílého korundu. Tato varianta je určena pro použití s nižším přítlakem a je proto vhodná i pro broušení ruční, tedy dílenské. [32] [35] [36]

4.6 Abral®

Abral bezesporu patří mezi nové abrazivní materiály. Jednoduše se dá popsat jako mikrokrystalický korund legovaný kyslíkem a dusíkem. Jedná se o materiál, který vzniká reakcí oxynitridu hliníku (AlON) s korundem, po které následuje pozvolné tuhnutí. [37] [19]

Oxynitrid hliníku byl poprvé zkoumán v 60. a 70. letech 20. Stolení. Následně našel uplatnění jako průhledný keramický materiál vhodný například pro výrobu průhledných desek pro balistickou ochranu. AlON má polykrystalickou krychlovou spinelovou strukturu. [39] [40]

Nástroje s AlON zrna jsou méně náchylné na zanášení materiálem obrobku. Zrna zároveň disponují schopností samoostření blízkou keramickým materiálům (SG, Cubitron) a mají jemnější účinek. [19] Tyto vlastnosti dělají AlON zrna zvláště vhodnými pro broušení ocelí s tvrdostmi 45 až 60 HRC a nerezových ocelí. Dobré vlastnosti vykazují zrna AlON i v abrazivních metodách s velkou plochou kontaktu, jakou je například hloubkové broušení, a to zejména z důvodu snížení tření a z toho vyplývajícího snížení tepelného zatížení obrobku, způsobené právě nižší náchylností na zanášení a schopností samostření. [40]



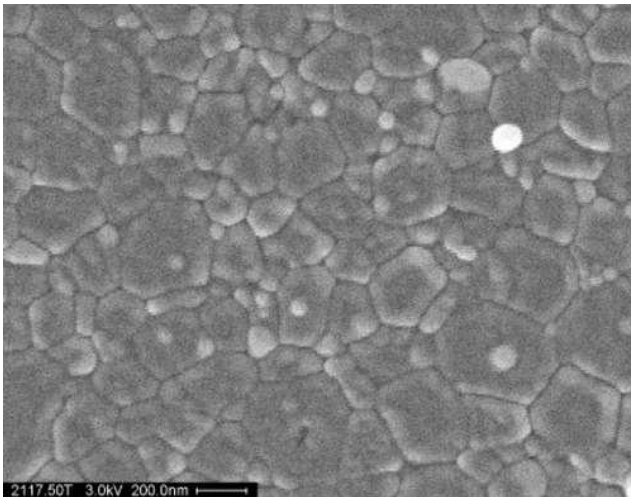
Obr. 36- Elektronová mikroskopie zrna Abral® zleva: zvětšení 800x, 3000x, pohled na krychlovou strukturu [40]

Materiál Abral® má tvrdost 18GPa dle Knoop, velikost krystalů je přibližně 10μm. [40] Při broušení nástroji se zrna Abral je nutné použít stroj, který umožňuje velmi tuhé upnutí obrobku i nástroje. Zrna jsou velmi houževnatá a pevná a proto mají nástroje tendenci při nízké tuhosti upnutí odskakovat od obrobku a způsobovat vibrace. [41]

4.7 NQ™

Norton Quantum™ je dvoufázový keramický abrazivní materiál. Složením vychází z původního zrna SG, obohaceného o sloučeniny tvořící druhou fázi. Právě tato druhá fáze, podobně, jak je tomu u materiálu Cubitron II, není veřejně známá. NQ™ je totiž v současnosti stále chráněno patentem. Výrobce uvádí, že přítomnost druhé fáze výrazně zlepšuje vlastnosti abraziva. [42] Díky ní by se mělo tvořit na stejné ploše zrna, v porovnání s SG, větší množství nových řezných hran. Přizpůsobení mikrokrystalické struktury je jedním z hlavních způsobů, jakými lze řídit opotřebení zrna.

Protože mají krystaly uvnitř zrn NQ™ větší odchylky rozměrů a méně pravidelný tvar, a menší velikost než je tomu u SG™, mělo by docházet ke zlepšení účinnosti efektu samoostření. [43] Krystalová zrna uvnitř zrn NQ™ však stále nejsou dostatečně malá, aby mohlo být NQ™ považováno za nanokrystalický materiál. [20]



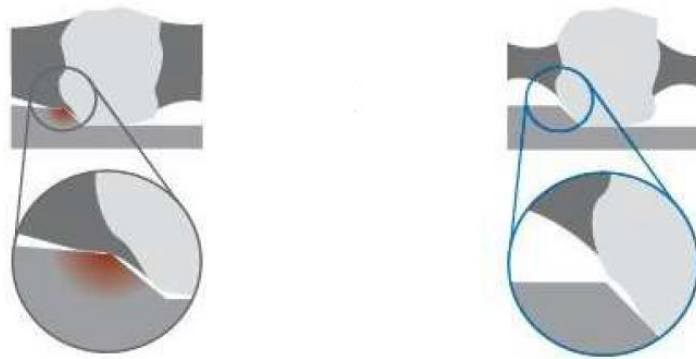
Obr. 37- Mikrostruktura zrna NQ [43]

Druhá fáze zároveň podporuje drobivost brusných zrn. Díky zvýšené drobivosti se ze zrn vylamují menší úlomky a samoostření probíhá konstantněji a předvídatelněji, než je tomu u SG. Tím se zároveň zvyšuje životnost zrn v řezu. Jediné zrno NQ™ si tak lze představit jako miniaturní brusný nástroj, který se skládá z brusných zrn, tedy mikrokrystalů $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ a „pojiva“, tedy druhé fáze. [44]

NQ™ je úspěšně nasazováno na nástrojích využívajících pojivového systému Virtum3™, který umožňuje optimální využití vlastností tohoto brusného materiálu. Virtum3™ je poměrně specifické zvláštním, inovovaným, způsobem pojení zrn. Uplatňuje se v něm strategie, která za pomoci menšího množství pevného pojiva, umožňuje lépe zadržovat zrna v nástroji a do jejich opotřebení lépe brání jejich vylamování. Toho je docíleno

pomocí menšího obklopení zrn pojivem. Pojivové „mosty“ jsou tak kontaktu s obrobkem vystavovány výrazně méně. Při kontaktu pojiva s obrobkem totiž dochází k porušení pojiva, které vede ke snížení pevnosti spoje a následnému vypuštění zrna. Nástroje s pojivovým systémem Virtum3™, se zrny NQ™ tak dle výrobce vyžadují rovnávání trojnásobně méně často, než běžné korundové kotouče. [43] [44]

Spojením těchto dvou zlepšení získáváme nástroj, u kterého je opotřebení účinně přesunuto z vylamování zrn a jejich částí u běžných nástrojů, na mikrometrickou úroveň, kdy se vylamují samotné mikrokrystaly uvnitř zrn a celá zrna až následně. Dochází tak ke zlepšení vyžitelnosti brusných nástrojů. Kontakt pojiva s obrobkem zároveň způsobuje tření, omezením množství pojiva v kontaktu s obrobkem tedy dojde ke snížení řezných sil a teploty v místě řezu. [44]



Obr. 38- Zleva: srovnání konvenčního pojiva a pojiva systému Virtum 3 [44]

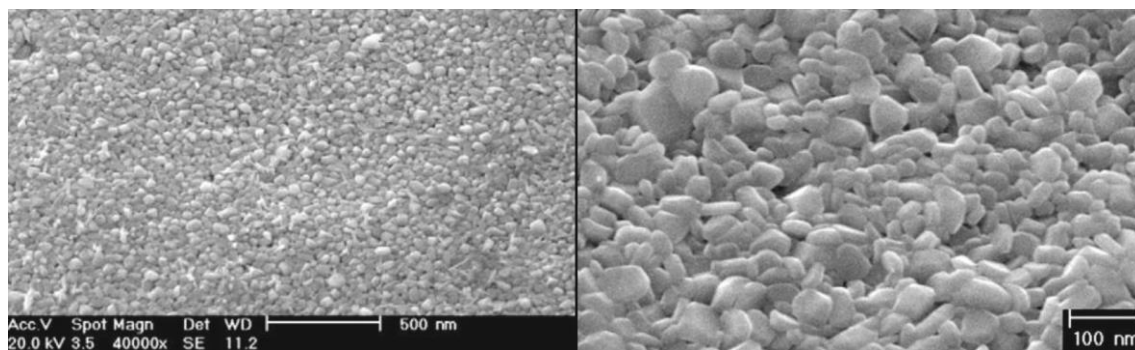
Z ilustrace je možné pozorovat situaci, kdy pojivo přichází do kontaktu s povrchem. U Virtum3™ k tomuto nedochází. Virtum3™ zároveň zvyšuje porozitu nástrojů.

4.8 Nanokrystalický korund

Usilovným vývojem nyní prochází korundová abraziva s nanokrystalickou strukturou a technologie jejich výroby (od roku 2008).

Nanokrystalická zrna jsou vyráběna technologií sol-gel s dvoustupňovým slinováním za teplot 1150÷1300°C. V průběhu posledních kroků slinování mohou být přidávány chemické látky podporující slinování, například MgO–CaO–SiO₂. Vyrobené materiály zpravidla mají hustotu přesahující 99% teoretické hustoty. Za nanokrystalický materiál považujeme, pokud jeho krystalická zrna velikostí nepřesahují 100nm (60nm dle některých pramenů). Od nanokrystalických korundových abraziv se očekává zvýšená pevnost i houževnatost. Zároveň by mělo dojít, díky odlamování a samoostření

opotřebených hran abrazivních zrn na nano úrovni, k výraznému prodloužení životnosti takovýchto materiálů. [20]



Obr. 39- Elektronová mikroskopie nanokrystalické korundové struktury. Zleva: zvětšeno 40000x, 125000x. [20]

5 Plán experimentu

Úkolem, který jsem si stanovil je provést srovnání výsledků drsnosti povrchů broušených různými abrazivními produkty, brusnými pásy, od různých výrobců. Pomocí brusných pásů a dílenské pásové brusky bude broušen povrch ploché tyče z nerezové austenitické oceli.

Naměřené hodnoty budou představeny v tabulkách. Následně bude provedeno jejich srovnání v skupinách ekvivalentních produktů, případně v typových řadách.

Výsledky měření a srovnání by měly pomoci utvářet pohled na problematiku výběru brusných pásů pro dílenské aplikace, při kterých je nutné dbát na drsnost vytvářeného povrchu.

5.1 Výčet a popis zkoumaných abrazivních produktů

Tab. 3- pásy běžných zrnitostí

Výrobce	Označení	Typ zrna	Zrnitost->	P36	P60	P80	P120
3M	984F	Cubitron II		X			X
3M	784F	Cubitron II+ korund		X	X	X	X
3M	777F	Cubitron + korund				X	
NORTON	R822	zirkonkorund					X
NORTON	R996	SG			X		

Tab. 4- pásy jemné a velmi jemné

Výrobce	Označení	Typ zrna	Zrnitost->	A100	A65	A45	A30	A16
3M	237AA	Trizact™ (Al ₂ O ₃)				X	X	X
3M	337DC	Trizact™ (Al ₂ O ₃)		X	X	X		

Vzorky budou nadále identifikovány pomocí kódu, kterým je označuje výrobce v katalogu, a informace o jejich zrnitosti. Vzorek z prvního řádku první tabulky tedy bude označen jako 984F-P36.

Jedná se o brusné pásy rozměrů 2000x50 mm.

5.1.1 984F

Produkt 984F se skládá pouze ze zrna Cubitron™ II a chemicky aktivních přísad Griding-Aid™, které přispívají ke snížení teploty v místě řezu. Výrobce je doporučován pro

broušení se strojním přítlakem. Vyznačuje se vysokou životností a rychlostí úběru materiálu (velmi dobrý poměrný objemový obrus). [32] [36]

5.1.2 784F

Produkt 784F se skládá ze směsi umělého spékaného korundu a zrna Cubitron™ II. Je rovněž opatřen aktivními přísadami Griding-Aid™. Tento produkt je výrobcem označován jako vhodný pro broušení se strojním přítlakem a rovněž pro dílenské broušení s ručním přítlakem. V tomto případě proto poslouží jako srovnávací základna ve skupině pásů s běžnými zrnitostmi. 784F dosahuje oproti 984F nižších hodnot poměrného objemového obrusu. [32] [35]

5.1.3 777F

Produkt 777F je tvořen směsí zrn Cubitron™ a zrn korundu a v pryskyřičném pojivu s aktivními přísadami. Lze u něj tedy předpokládat vyšší životnost a lehké zlepšení brusných vlastností oproti konvenčním abrazivům. Výrobcem je označován jako vhodný pro použití na nerezové oceli, chrom, chrom-niklové oceli, vysokolegované oceli a slitiny Niklu a Titanu. [32]

5.1.4 R822

Produkt firmy Norton, označovaný jako R822 a prodáváný pod obchodní značkou Norzon™, je slitinou oxidu hlinitého a oxidu zirkoničitého. V matici tvořené alfa oxidem hlinitým jsou rozmístěny tyčinkovité krystalické útvary tetragonálního a monoklinického oxidu zirkoničitého, které mají délku typicky v řádu jednotek mikronů. Hustota zrna Norzon™ je přibližně $4,42 \text{ g.cm}^{-3}$, tvrdost dle Knoopu dosahuje přibližně 16.50 GPa. [42]

Tento velice univerzální a cenově dostupný produkt lze dle distributora využít pro broušení nejrůznějších kovů, včetně nerezových ocelí. [45]

5.1.5 R996

Takzvaný Viking™ R996 je produkt firmy Norton, vyvinutý se záměrem poskytnout uživateli vysoký brusný výkon a životnost. Jedná se o brusné zrno SG s aktivními přísadami na velmi pevném a nepoddajném textilním podkladu. Dle distributora je vhodný pro broušení velmi tvrdých a těžko obrobitelných ocelí například v leteckém

průmyslu, kovárnách ocelárnách a v dalších odvětvích, kde je kladen požadavek na velký brusný výkon a životnost nástroje. [45]

5.1.6 237AA

Brusné pásy Trizact™ 237AA s korundovým zrnem v pryskyřičném pojivu, uspořádaným do drobných brusných útvarů tvaru čtyřbokého jehlanu. Pásy jsou velmi poddajné a ohebné, proto je lze použít pro broušení tvarových ploch. Jsou určeny zejména pro dokončovací operace. Pásy mají velmi dlouhou životnost. Vlivem vysokého tření, které je při jejich použití nevyhnutelné, je ale nutné používat poměrně malý přítlak, který je, z důvodu zvětšování styčné plochy mezi obrobkem a nástrojem, vhodné postupným opotřebením pásu dále snižovat. Hodí se pro odstraňování stop po broušení a sjednocování po opravách povrchu. [32] [45]

5.1.7 337DC

Trizact™ 337DC je rovněž vyroben z korundových zrn v pryskyřičném pojivu. Oproti 237AA je má ale výrazně vyšší porozitu. To se projevuje rychlejším úběrem materiálu a nižším třením. Tvar brusných útvarů však lehce snižuje poddajnost brusných pásů. 337DC je rovněž je vhodný pro odstraňování stop po broušení a sjednocování po opravách povrchu nejrůznějších kovových materiálů, včetně nerezových ocelí. [32]

5.2 Příprava zkušebních těles

Zkušební tělesa mají podobu ocelových destiček o rozměrech 25x3x70 mm. Rozměry brusných pásů jsou 50x2000. Délka destičky 70mm by měla usnadnit manipulaci při broušení.

Destičky jsou zhotoveny z tažené ploché tyče dle normy EN 10278 z austenitické oceli ČSN 17 240 (DIN 1.4301)

Je žádoucí zabezpečit, aby výsledek nemohl být ovlivněn původním povrchem polotovaru. Proto je nutné, pro zachování objektivitu, odbrousit celou povrchovou vrstvu polotovaru. Odbroušení této vrstvy nebude představovat velký problém s pásy, které jsou navrženy pro velký úběr materiálu. Pásy dokončovací (Trizact™) nejsou pro velký úběr materiálu uzpůsobeny, proto pro ně budou destičky předbroušeny, dle doporučení výrobce. [33] [34]

5.3 Použité stroje a přístroje

Pásová bruska s třífázovým asynchronním motorem. Pomocí frekvenčního měniče byly otáčky motoru zvýšeny na $4500 \text{ ot. min}^{-1}$. Odpovídají řezné rychlosti cca 26 m.s^{-1} .

Otáčkoměr IO-30

Přístroj MarSurf LD 120 pro měření kontury a drsnosti povrchu.

Digitální mikroskop Keyence VHX-6000

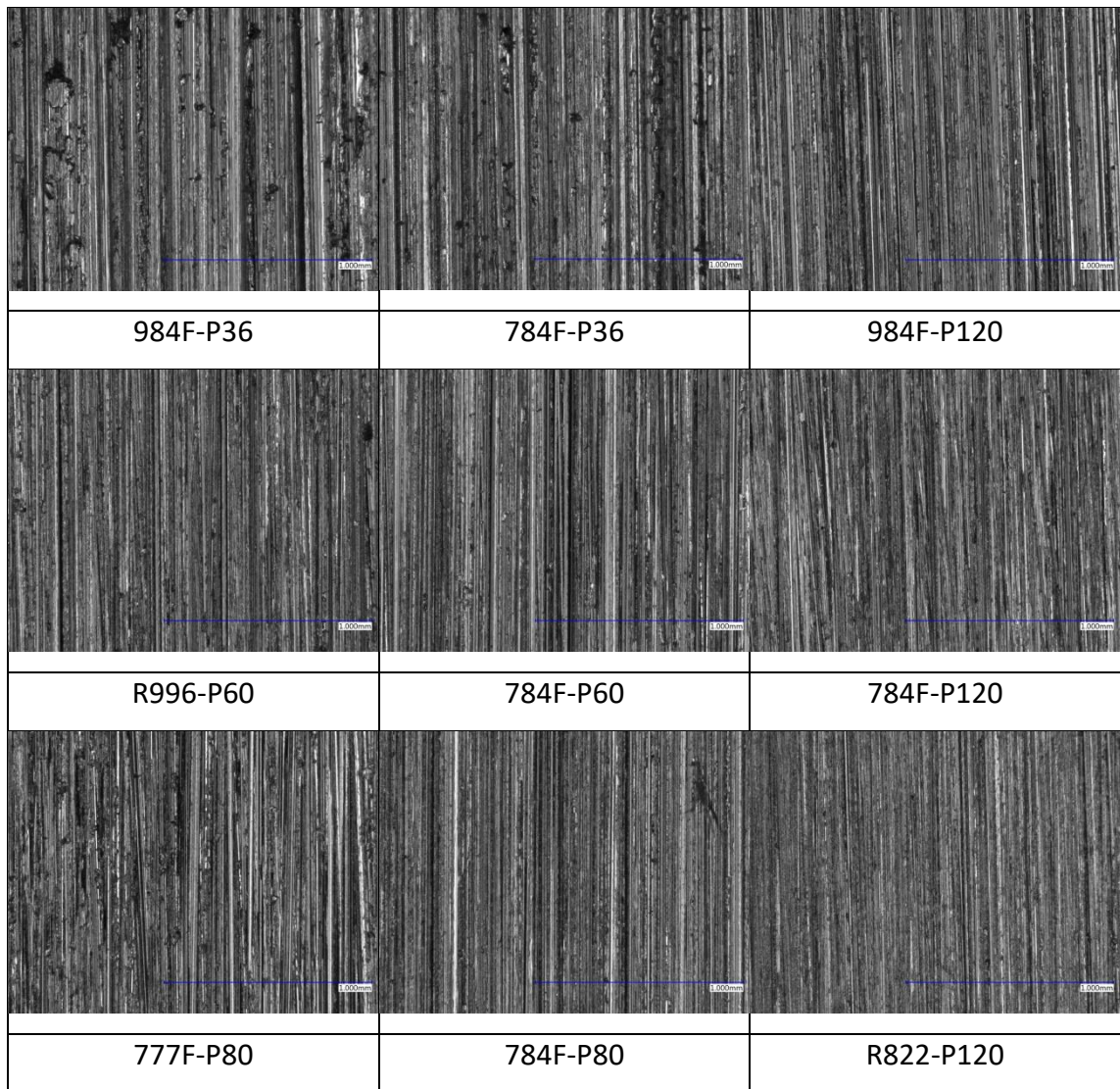
5.4 Vyhodnocení a porovnání výsledků

Výsledky pásů rozřazených do skupin se stejnou udávanou drsností (ekvivalentní výrobky) nebo se stejným určením (dokončovací) nebo ze stejné produktové řady, budou v těchto skupinách srovnány pomocí grafů z hlediska naměřených hodnot výsledného povrchu. Protokoly měření jsou k dispozici v příloze.

Měřeny byly následující parametry: [46]

Ra:	Střední aritmetická odchylka drsnosti profilu od střední čáry na délce měřeného úseku.
Rz:	Střední vzdálenost mezi pěti nejvyššími a pěti nejnižšími body zjištěného profilu od jeho střední čáry v délce měřeného úseku.
Rt:	Hloubka drsnosti, nebo celková výška profilu drsnosti. Je součtem hodnot R_p (nejvyšší vrchol profilu) a R_v (nejhlubší prohlubeň profilu) na délce měřeného úseku.
Rsm:	Průměrná šířka prvků profilů. Jedná se o aritmetický průměr šířek prvků profilu v rozsahu měřeného úseku.
Materiálový poměr profilu:	Jinak nosný podíl, je poměr materiálové délky profilu na dané úrovni k délce vyhodnocovaného úseku.

5.5 Pásky běžných zrnitostí



Obr. 40- Snímky povrchů broušených pásky běžných zrnitostí, pořízené pomocí digitálního mikroskopu. Zvětšeno 200x

5.5.1 Srovnání ve skupině 784F

Tab. 5- naměřené hodnoty 784F

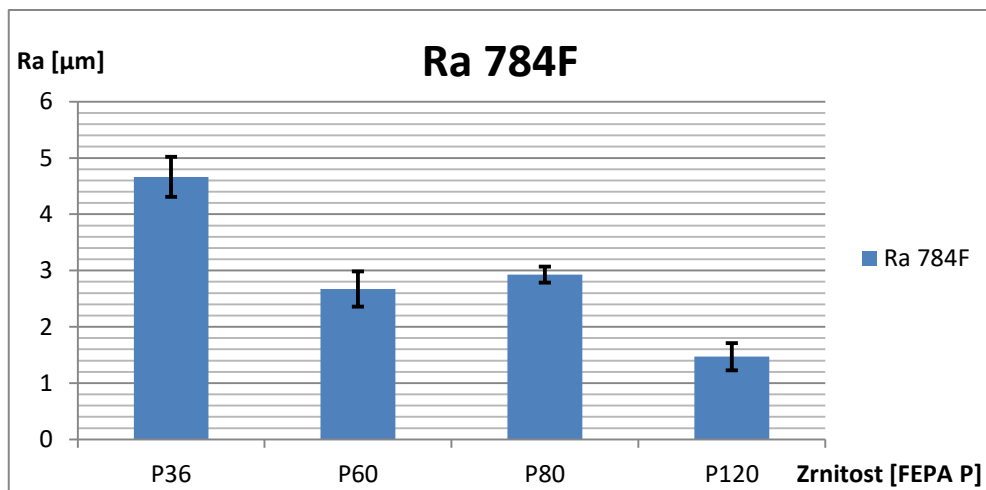
	Ra	Ra σ	Rz	Rz σ	Rt	Rt σ	Rsm	Rsm σ
P36	4,664	0,356	38,083	2,884	50,871	6,666	198,385	4,426
P60	2,672	0,311	22,957	3,48	28,119	5,192	111,175	1,948
P80	2,928	0,143	23,697	1,941	28,375	2,387	113,414	5,748
P120	1,47	0,241	10,678	1,452	13,267	2,294	59,666	5,292

Výsledky přibližně odpovídají očekávání. Se stoupající zrnitostí pásů, hodnota drsnosti Ra klesá. Pásky P60 a P80 jsou si z hlediska zrnitosti, oproti ostatním vzorkům, výrazně blíže. Vlivem opotřebení pásu jsou hodnoty Ra, Rz, i Rsm, naměřené na vzorku broušeném pásem P60 nižší, než na vzorku P80. Tento jev lze označit jako „zaběhnutí brusného nástroje“. Pokud budeme brát záběh brusných nástrojů v úvahu, lze pásy P60 a P80 v jistých případech zaměnit.

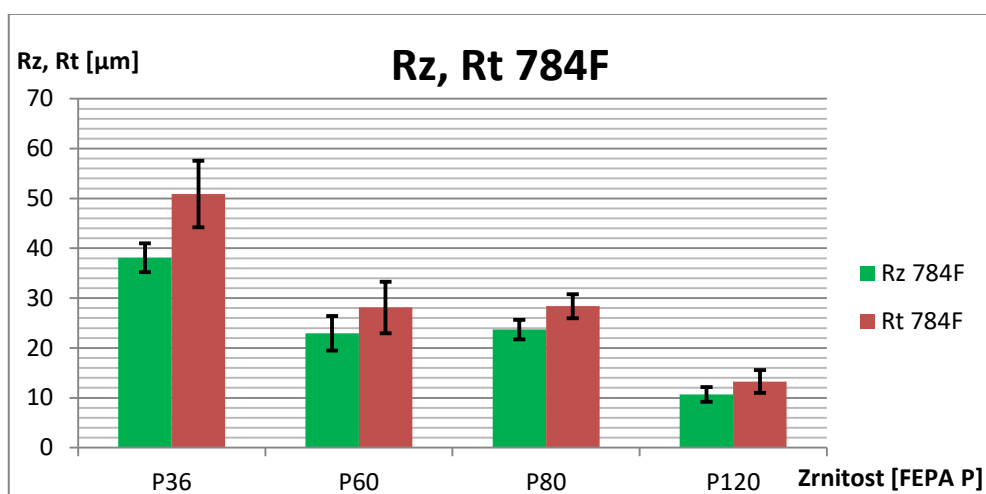
Lehce vyšší opotřebení pásu P60 se promítá do všech grafů. Vliv opotřebení lze z grafů odhalit pozorováním chybových úseček, které představují směrodatnou odchylku σ . Pro pás se zrnitostí P36 lze předpokládat směrodatnou odchylku vyšší, zejména kvůli velikosti brusných zrn. Ta jsou uzpůsobena pro maximální úběr materiálu, který se pojí se vznikem defektů povrchu. Ve srovnání s pásem P60 se ale směrodatná odchylka příliš neliší a má přibližně stejnou velikost pro všechny hodnoty, až na Rsm, kde opotřebení působí opačně. To lze vyhodnotit jako promítnutí nepravidelností vzniklých na povrchu pásu jeho opotřebením do povrchu vzorku.

Opotřebením abrazivních zrn vznikají nové řezné hrany (tzv. samoostření), těch je zpravidla více a jsou drobnější, zrna tak odebírají větší množství drobnějších třísek a tím dochází ke snížení hodnot parametrů drsnosti Ra a Rz. Samoostření má na proces broušení pozitivní vliv. Moderní abrazivní materiály, jakým je Cubitron II, jsou pro samoostření uzpůsobeny a je to jednou z jejich hlavních výhod oproti zrnům konvenčním. Nerovnoměrným zatěžováním brusných nástrojů však může docházet ke vzniku odchylek v míře opotřebení brusných zrn v různých místech. To způsobuje nepravidelnost v účinku na broušený povrch, který poté může vykazovat rozdílné hodnoty drsnosti v různých místech. Směrodatná odchylka proto narůstá.

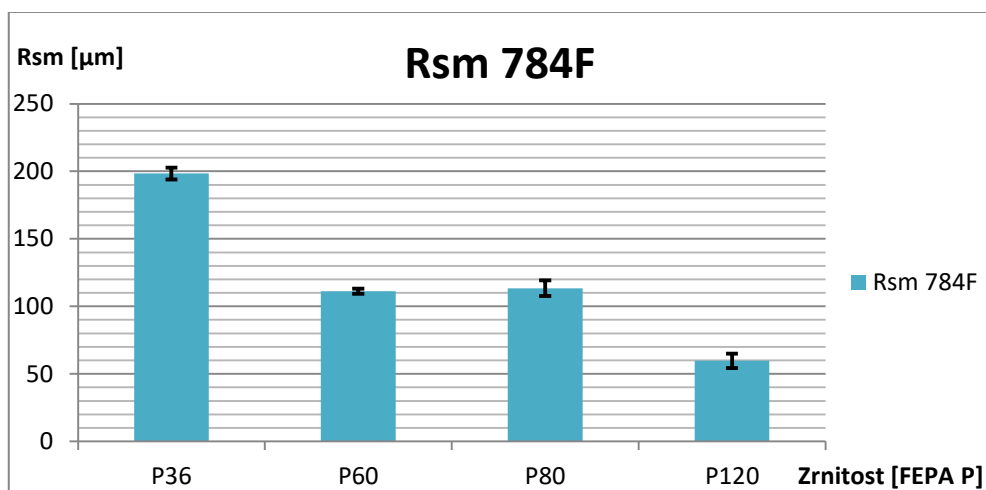
Rovnoměrné opotřebení a zatěžování pásů je však při dílenském broušení s ručním přitlakem velmi obtížné zajistit.



Obr. 41- Vliv zrnitosti řady pásů 784F na drsnost povrchu Ra



Obr. 42- Vliv zrnitosti řady pásů 784F na drsnost povrchu Rz a hloubku drsnosti Rt



Obr. 43- Vliv zrnitosti řady pásů 784F na průměrnou šířku prvků profilu

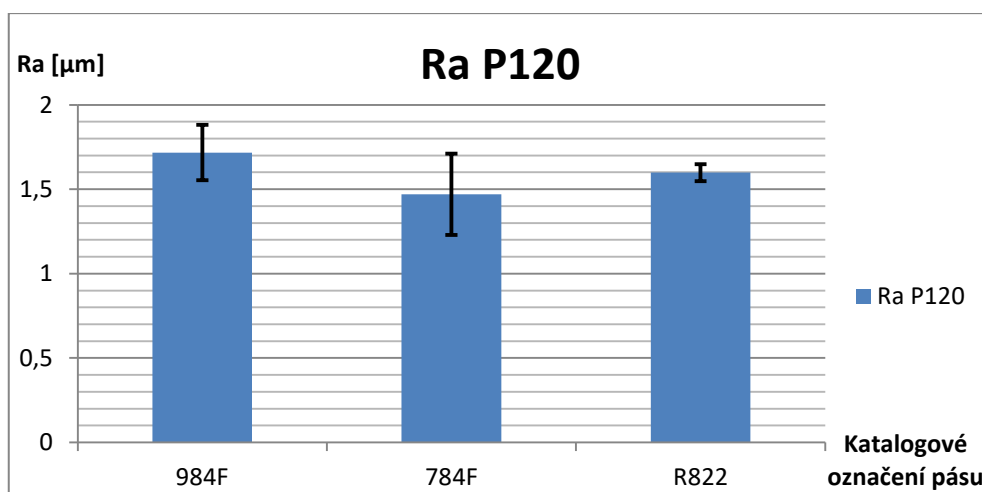
5.5.2 Srovnání ve skupině P120

Tab. 6- naměřené hodnoty P120

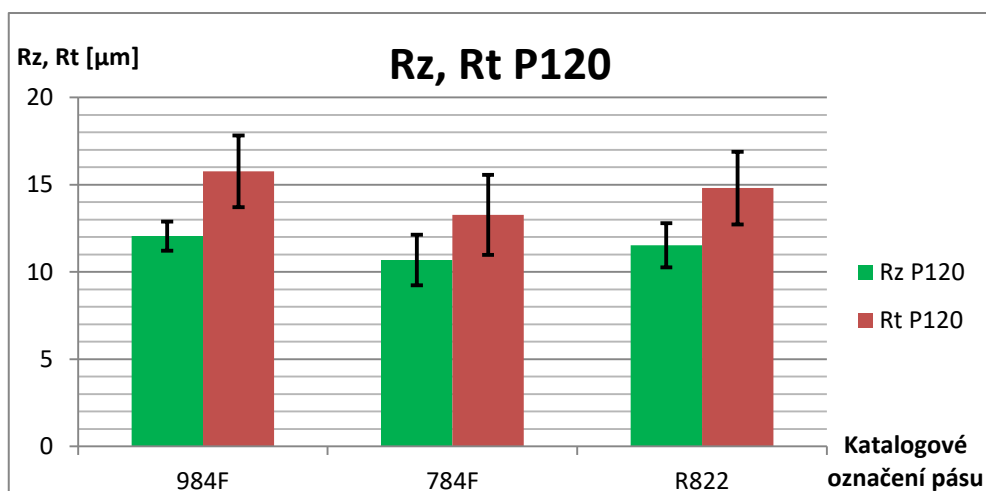
	Ra	Ra σ	Rz	Rz σ	Rt	Rt σ	Rsm	Rsm σ
984F	1,717	0,164	12,052	0,831	15,766	2,062	71,126	12,191
784F	1,47	0,241	10,678	1,452	13,267	2,294	59,666	5,292
R822	1,598	0,051	11,531	1,26	14,809	2,083	70,785	5,859

Výsledky pásů se zrnitostí P120 jsou poměrně vyrovnané. Materiál 984F má dle očekávání hodnoty Ra, Rz a Rt nejvyšší. To je možné přisoudit jeho složení pouze ze zrn Cubitron II. Ta jsou velmi pevná a ostrá a proto mají velmi agresivní účinek. Svými velmi ostrými a špičatými výčnělky vytváří, zejména při ručním broušení bez posuvu, hluboké rýhy. Materiál 784F, který obsahuje příměs bílého korundu, tak hluboké rýhy nevytváří (lze pozorovat na parametrech Rt a Rz).

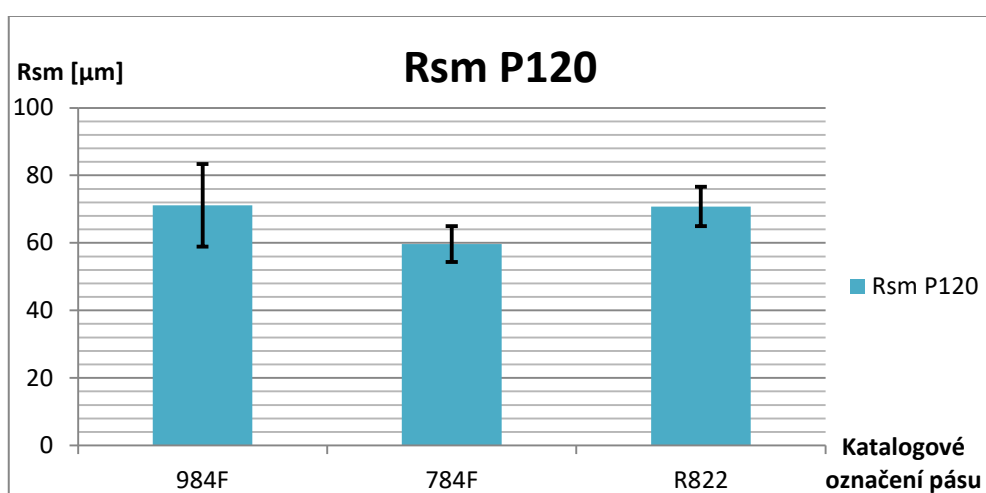
Materiál R822 dosahuje ve srovnání se 784F rovněž horších výsledků. To je možné přisoudit zvýšené houževnatosti a lomové odolnosti zrn zirkonového korundu, která je oproti bílému korundu vyšší. Zirkonkorundová zrna proto působí na broušený povrch agresivnějším účinkem. Je však možné, že po zaběhnutí pásu by se parametry R822 a 784F vyrovnaly. Lepší výsledky dosažené pásem 784F lze přisoudit zejména obsahu bílého korundu, který netvoří tak ostré hrany a snáze se opotřebovává. Opotřebovaná zrna pak povrch lépe vyhlazují.



Obr. 44- Vliv různých pásů se zrnitostí P120 na drsnost povrchu Ra



Obr. 45- Vliv různých pásů se zrnitostí P120 na drsnost povrchu Rz a hloubku drsnosti Rt



Obr. 46- Vliv různých pásů se zrnitostí P120 na průměrnou šířku prvků profilu

5.5.3 Srovnání ve skupině P80

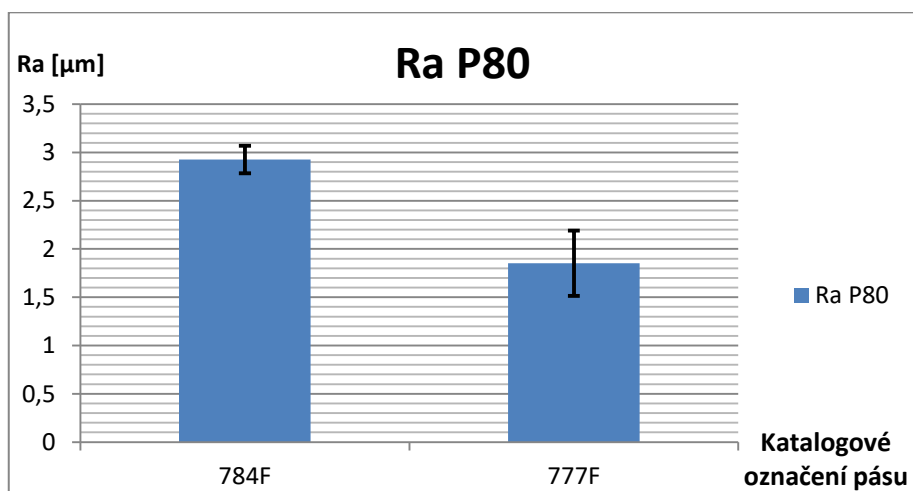
Tab. 7- naměřené hodnoty P80

	Ra	Ra σ	Rz	Rz σ	Rt	Rt σ	Rsm	Rsm σ
784F	2,928	0,143	23,697	1,941	28,375	2,387	113,414	5,748
777F	1,853	0,339	14,909	1,449	20,363	0,595	144,98	6,117

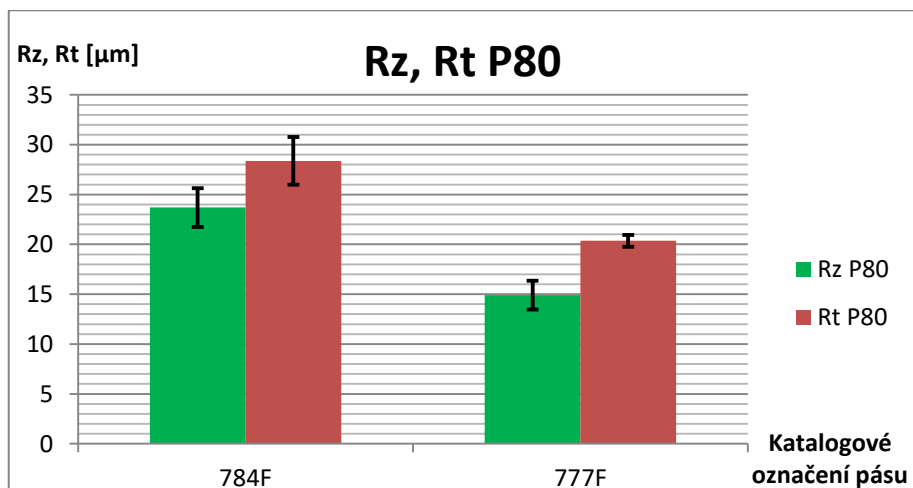
Porovnáním hodnot naměřených na površích získáváme poměrně překvapivé výsledky. Vzorek broušený pásem 777F se zrnem Cubitron první generace vykazuje výrazně lepší hodnoty Ra, Rz a Rt, než vzorek broušený pásem 784F. (tím se potvrdilo tvrzení z 1. strany kapitoly Cubitron)

To je možné přisoudit zejména tvaru brusných zrn Cubitron, která mají, na rozdíl od zrn Cubitron II, velmi nepravidelný tvar. Jak se ukazuje, tvar zrn má na kvalitu povrchu velmi významný vliv. Nepravidelná zrna oblejšího tvaru vytváří na povrchu méně

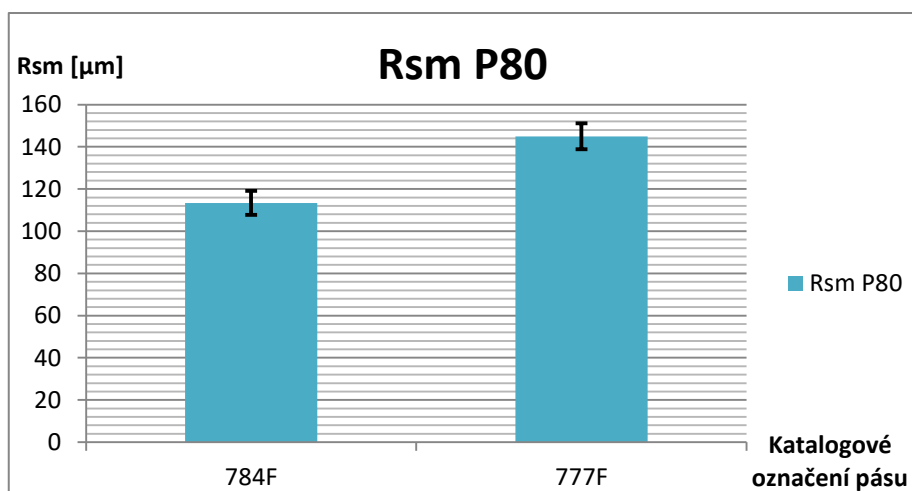
hluboké a nepravidelné vrypy. Ze snímků povrchů pořízených mikroskopem je možné pozorovat, že povrch vzorku 777F je výrazně méně pravidelný a vytvořily se na něm, na rozdíl od 784F, drobné otřepy. Rovněž zde můžeme potvrdit, že zrna Cubitron II vytváří rovnoměrnější a předvídatelnější povrch. Proto vychází Rsm, jako jediná z hodnot ve prospěch 784F. Výsledky ve prospěch vzorku 777F se rovněž promítají do materiálového podílu.



Obr. 47- Vliv různých pásů se zrnitostí P80 na drsnost povrchu Ra



Obr. 48- Vliv různých pásů se zrnitostí P80 na drsnost povrchu Rz a hloubku drsnosti Rt



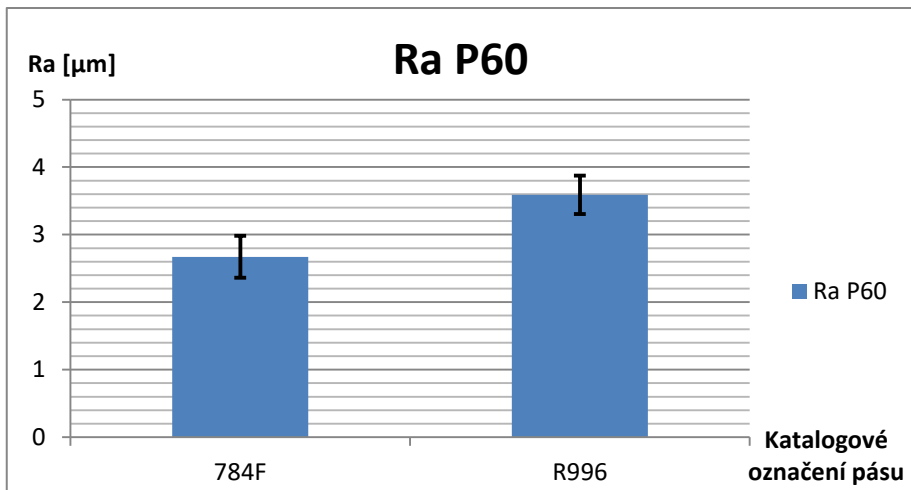
Obr. 49- Vliv různých pásů se zrnitostí P80 na průměrnou šířku prvků profilu

5.5.4 Srovnání ve skupině P60

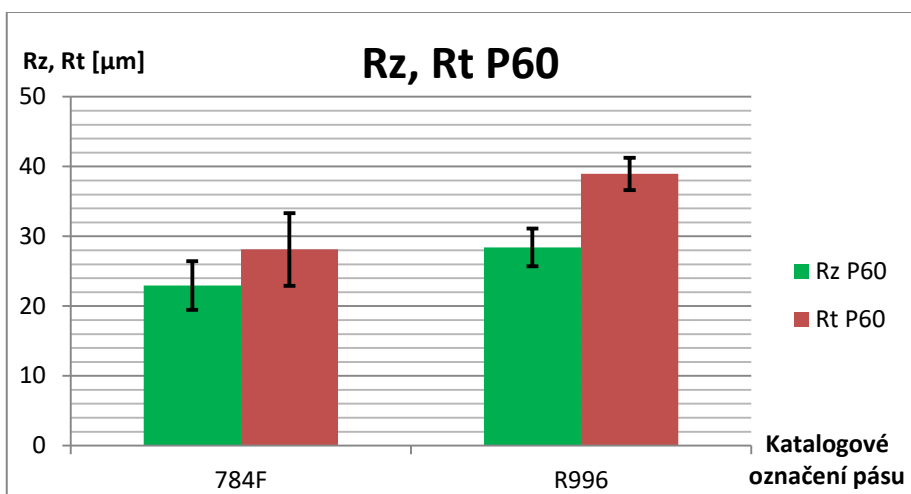
Tab. 8- naměřené hodnoty P60

	Ra	Ra σ	Rz	Rz σ	Rt	Rt σ	Rsm	Rsm σ
784F	2,672	0,311	22,957	3,48	28,119	5,192	111,175	1,948
R996	3,589	0,286	28,404	2,723	38,95	2,322	113,566	6,366

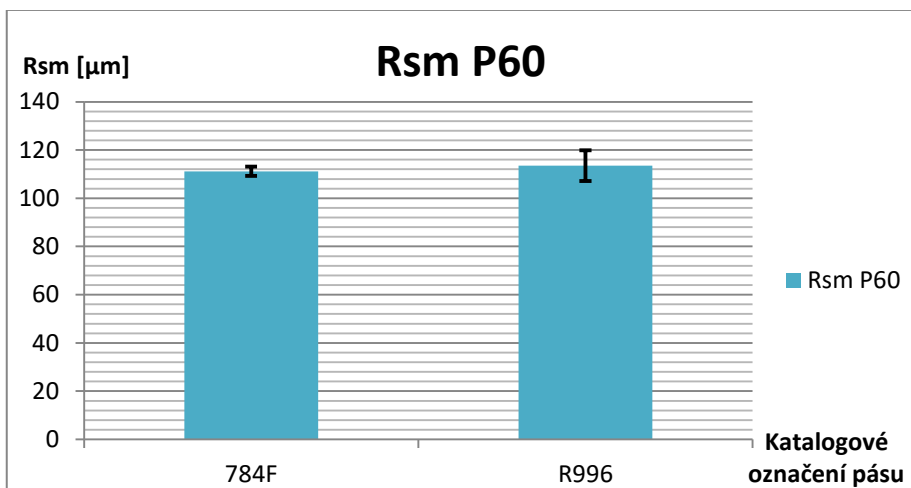
Pás R996 má výrobcem deklarované určení pro provoz v náročných podmínkách, broušení tvrdých materiálů a maximální úběr materiálu. 784F je rovněž určen pro podobné podmínky, ale zdaleka ne v tak extrémní míře. Pásky se už od prvního pohledu výrazně liší. Pás R996 má vyšší hmotnost, je méně poddajný a ohebný a má velmi hrubou strukturu. Proto není divu, že v rámci všech měřených veličin, kromě Rsm, vykazuje výrazně horší výsledky. Na snímcích broušených povrchů můžeme opět pozorovat rovnoměrně rozložené rýhy bez otřepů tvořené materiálem 784F a méně pravidelné, hlubší rýhy tvořené zrny SG materiálu R996. Materiálový podíl je ale u obou vzorků velmi podobný, takřka shodný.



Obr. 50- Vliv různých pásů se zrnitostí P60 na drsnost povrchu Ra



Obr. 51- Vliv různých pásů se zrnitostí P60 na drsnost povrchu Rz a hloubku drsnosti Rt



Obr. 52- Vliv různých pásů se zrnitostí P60 na průměrnou šířku prvků profilu

5.5.5 Srovnání ve skupině P36

Tab. 9- naměřené hodnoty P36

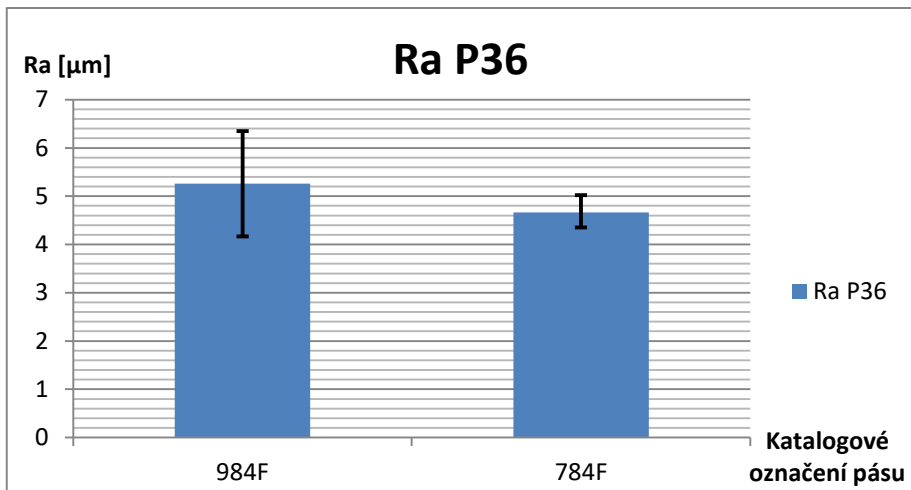
	Ra	Ra σ	Rz	Rz σ	Rt	Rt σ	Rsm	Rsm σ
984F	5,258	1,092	39,144	7,76	55,56	15,525	224,015	99,217
784F	4,664	0,356	38,083	2,884	50,871	6,666	198,385	4,426

Vzorky broušené pomocí pásů 984F-P36 a 784F-P36 vykazují, nepřekvapivě, daleko nejhorší hodnoty ze všech pásů, které byly v experimentu použity. Pásky se zrnitostí P36 jsou určeny například pro velmi hrubé prvotní opracování polotovarů a jsou konstruovány hlavně s ohledem na maximalizaci úběru materiálu. Uplatnění by našly například ve slévárnách při ručním zabrušování litých polotovarů po odstranění nálitků a vtokových soustav.

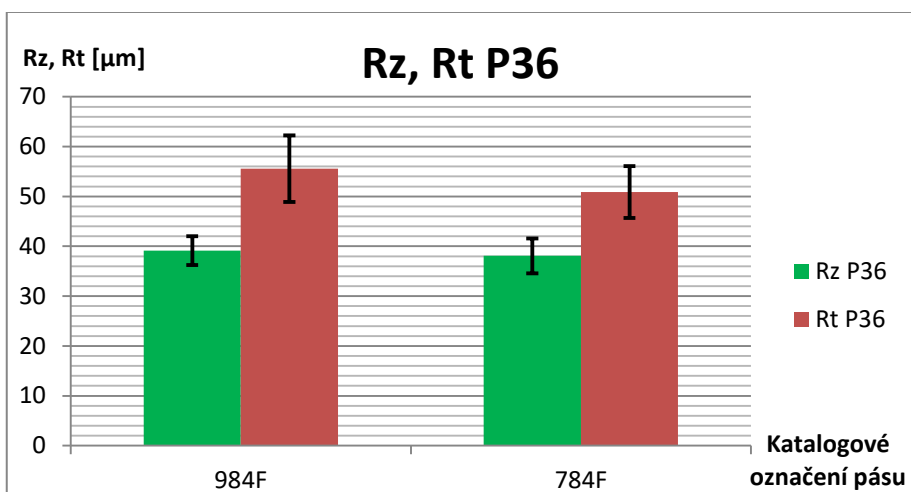
Na povrchu vzorku broušeného pomocí 984F vzniklo velké množství defektů. Ty mají podobu nepravidelných kráterovitých útvarů. Pravděpodobně vznikly vytrháváním kusů materiálu nebo jeho deformací. Na povrchu rovněž vznikají jakési drobné otřepy. Na povrchu broušeném pomocí 784F vnikly defekty rovněž, ale ve výrazně menší míře. Do povrchu vzorku 984F se pravděpodobně promítla nepravidelnost způsobená předchozím opotřebením brusného pásu. Tomu je možné přisoudit velikost směrodatné odchylky Ra a Rsm.

Povrchy vykazují hodnoty velmi podobné a pro aplikaci hrubého obrábění je rozdíl v některých případech zanedbatelný. Pokud bychom chtěli po hrubém opracování povrch dále obrábět, je ze dvojice vhodnější 784F, protože má na povrch jemnější účinek. Hloubka profilu drsnosti, která jeho působením vznikla, je menší.

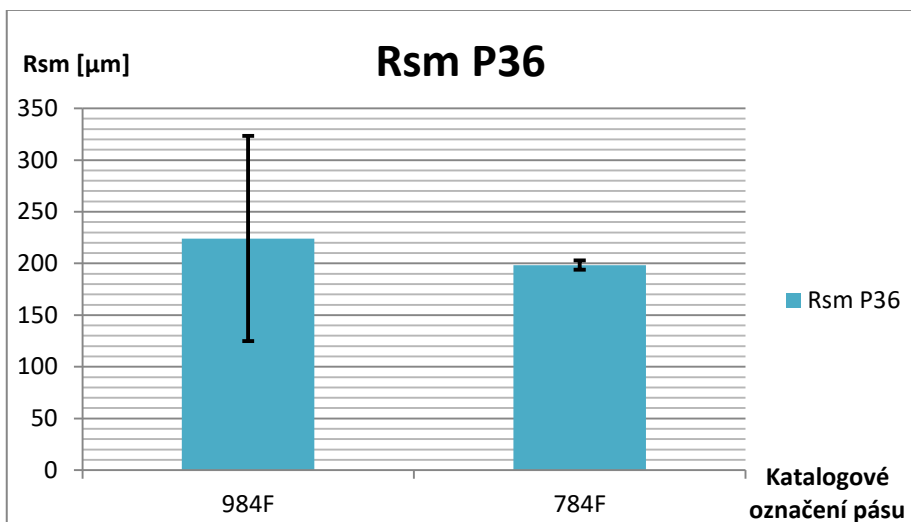
Pro broušení zejména tvrdých materiálů a při požadavku na maximální životnost je však vhodnější 984F. V předchozích odstavcích popsany vliv většího podílu špičatých zrn Cubitron II v materiálu 984F na kvalitu povrchu se zde rovněž podepisuje a lze ho tím potvrdit.



Obr. 53- Vliv různých pásů se zrnitostí P36 na drsnost povrchu Ra

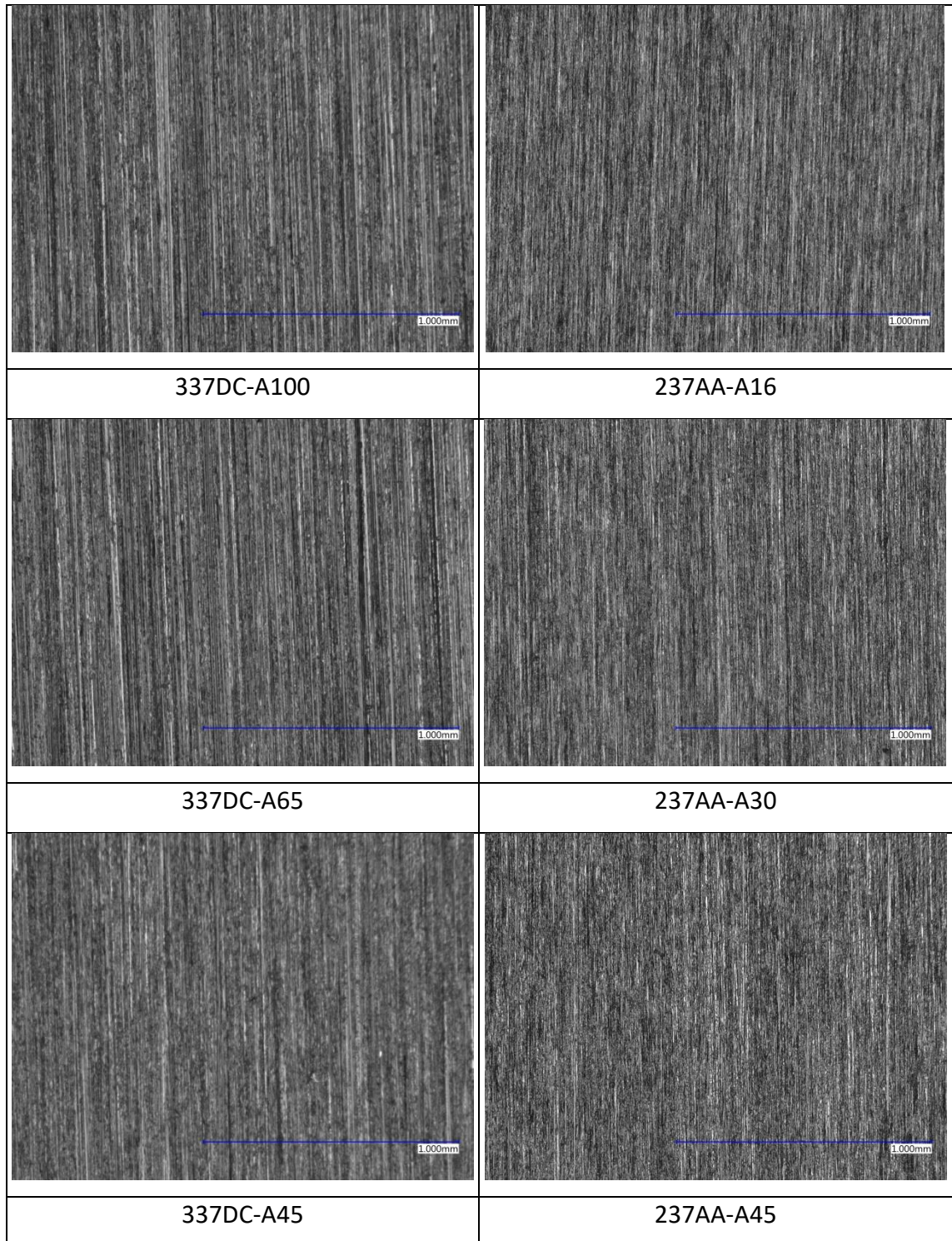


Obr. 54- Vliv různých pásů se zrnitostí P36 na drsnost povrchu Rz a hloubku drsnosti Rt



Obr. 55- Vliv různých pásů se zrnitostí P36 na průměrnou šířku prvků profilu

5.6 Pásy jemné a velmi jemné



Obr. 56- Snímky povrchů broušených jemnými a velmi jemnými pásy, pořízené pomocí digitálního mikroskopu. Zvětšeno 200x

5.6.1 Trizact: hromadné porovnání

Tab. 10- naměřené hodnoty Trizact

	Ra	Ra σ	Rz	Rz σ	Rt	Rt σ	Rsm	Rsm σ
337DC A100	0,503	0,011	4,621	0,445	5,88	0,926	29,707	1,671
337DC A065	0,679	0,029	5,893	0,437	6,935	0,88	30,082	1,504
337DC A045	0,461	0,016	4,519	0,43	5,827	0,743	24,897	0,243
237AA A045	0,157	0,015	1,683	0,101	2,273	0,218	38,802	3,853
237AA A030	0,211	0,042	2,443	0,555	3,238	1,044	18,936	1,291
237AA A016	0,078	0,01	1,009	0,112	1,541	0,351	16,697	2,212

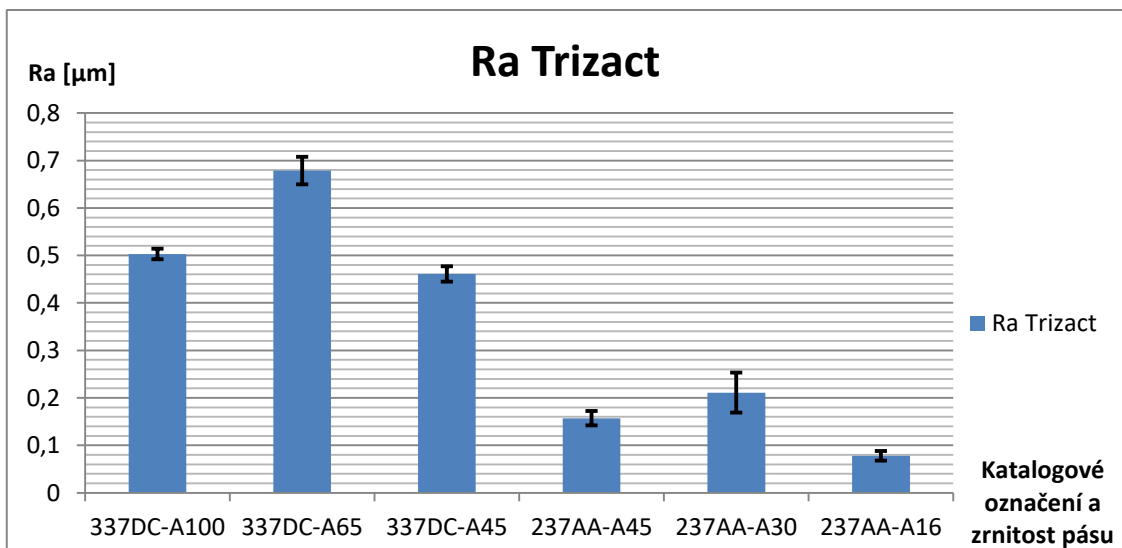
Povrchy broušené materiálem Trizact vykazují velmi dobré hodnoty. Pokud je potřeba nabrousit povrch s Ra nižším, než 0,5, neměl by to být problém při použití kteréhokoli z pásů A45, nebo pásu s nižší zrnitostí. Pásky 337DC vytváří povrch s přibližně 2÷4x vyšším Rz a Rt, než pásy 237AA.

Z naměřených hodnot lze pozorovat výskyt dvou „anomálií“. Na površích broušených pásy 337DC-A65 a 237AA-A30 byly naměřeny horší hodnoty, než na 337DC-A100 a 237AA-A45. Tento jev je opět možné přisoudit většímu opotřebení pásů jim v řadě předcházejícím, nebo spíše nepřekročení doby záběhu těchto pásů.

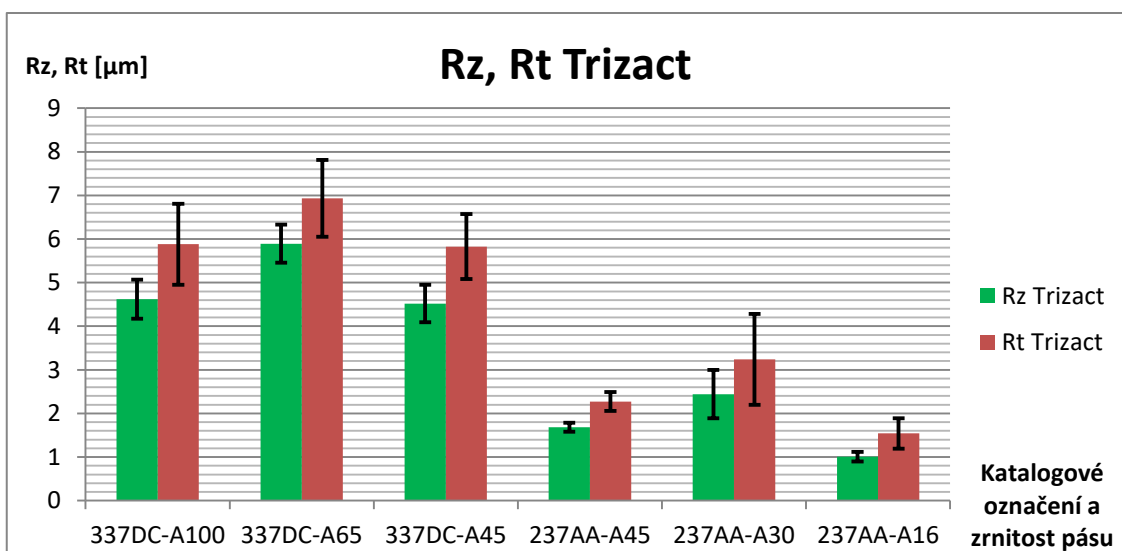
Umělý korund není schopný samoostření zdaleka v takové míře, jako mikrokrystalická abraziva, a proto se jevy spojené s jeho opotřebením a otupením projevují výrazněji.

Povrch broušený pásem 237AA-A45 vykazuje výrazně horší hodnotu Rsm, než veškeré ostatní vzorky v tomto souboru. To lze rovněž připsat předchozímu opotřebení pásu. Jako jediný z těchto pásů totiž nebyl nový, ale v minulosti poměrně používaný. Až na tuto výjimku hodnoty Rsm tvoří náznak sestupné řady.

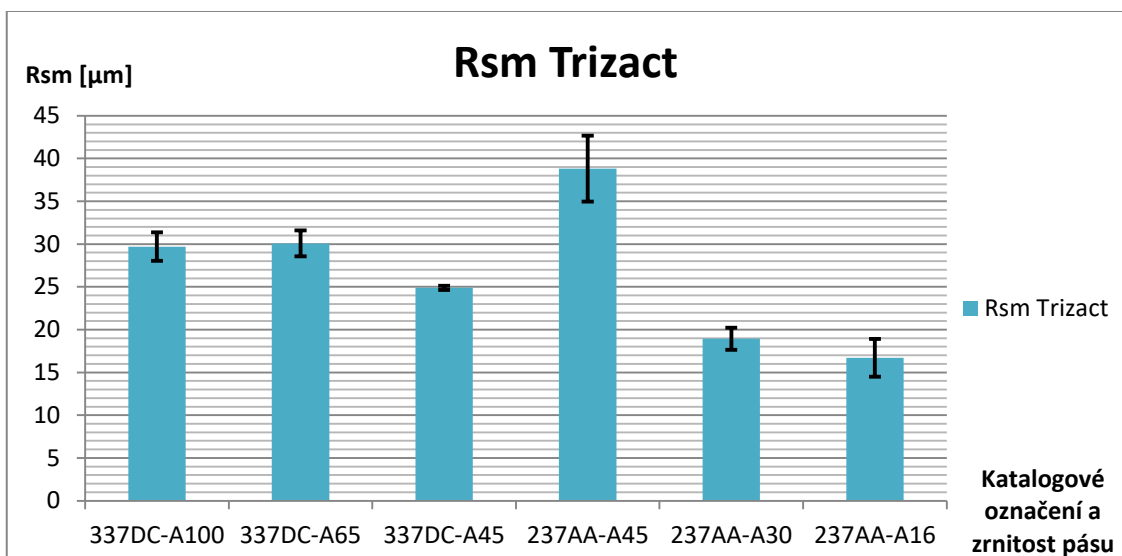
Rozdíl hodnot Ra, Rz i Rt naměřených na vzorcích broušených dvojic pásů A45 je poměrně značný. Do jisté míry to přikládám otevřenější a poréznější struktuře materiálu 237DC. Mezery mezi zrny sice umožňují pásu vyšší a efektivnější úběr materiálu s nižším třením, ale zároveň zrnům umožňují zarývat se hlouběji do materiálu. Tím vznikají hlubší rýhy. Oproti tomu uzavřená struktura materiálu 237AA, kde jsou zrna zalitá v pojivu, efektivně brání zrnům pronikat hluboko do materiálu. Jemnější účinek Trizactu 237AA lze pozorovat i z fotografií pořízených digitálním mikroskopem na předchozí straně. Snímky struktury pásů jsou v kapitole Trizact.



Obr. 57- Vliv zrnitosti pásů Trizact na drsnost povrchu Ra



Obr. 58- Vliv zrnitosti pásů Trizact na drsnost povrchu Rz a hloubku drsnosti Rt



Obr. 59- Vliv zrnitosti pásů Trizact na průměrnou šířku prvků profilu

5.7 Shrnutí výsledků experimentální části

Měření broušených vzorků přibližně koresponduje s v teoretické části prezentovanými poznatky. Je ale velmi ovlivněno lidským faktorem. Pro rozhodování o výběru pásu pro dílenské broušení jsou ale výsledky přínosné.

Potvrdila se v práci prezentovaná informace, že materiály se směsí konvenčních a abrazivních zrn působí na povrch jemnějším účinkem. Stále si však zachovávají výhody moderních abraziv. Materiál 784F, který obsahuje směs zrn Cubitron II a bílého korundu, poskytuje při dílenském broušení nejpříznivější výsledky a zároveň je i vysoce výkonný a trvanlivý. Materiál 984F obsahující pouze zrna Cubitron II vykazoval opakovaně kvalitativně horší výsledky a pro dílenské broušení s ručním přitlakem ho tedy nelze doporučit, pokud jsou kvalitu výsledného povrchu kladeny požadavky. 984F však v takové míře netrpí otupováním brusných zrn, lze u něj tedy předpokládat vyšší brusný výkon a trvanlivost.

Materiál R822 se zirkonkorundovým zrnem vykazoval oproti 784F zhoršené výsledky, srovnatelné s 984F. Jeho trvanlivost bude pravděpodobně nižší. Zároveň je ale výrazně nižší i jeho pořizovací cena a proto může být pro některé méně náročné aplikace dobrou volbou.

V případech, kdy na kvalitu výsledného povrchu nejsou kladeny vysoké požadavky, by stál za zvážení také materiál R996 se zrnem SG. Oproti 984F má rovněž nižší pořizovací cenu. Rozhodujícími faktory by pak pravděpodobně byl brusný výkon a trvanlivost.

Kvalitativně nejlepší výsledky vykazoval materiál 777F se zrny Cubitron 1. generace. Tvar těchto zrn lze považovat za velmi blízký konvenčním abrazivům. Díky legování a modernímu způsobu výroby však získává lepší samoostřicí schopnosti a zvýšenou trvanlivost. Pro aplikace, kde je při dílenském broušení důležitá zvýšená trvanlivost a je kladen požadavek na kvalitu výsledného povrchu jej lze jednoznačně doporučit, nejen kvůli jeho nižším pořizovacím nákladům oproti 984F a 784F. Brusným výkonem se však zrnům Cubitron II nevyrovná.

U vzorků broušených pásy Trizact jsem očekával větší kvalitativní rozdíly uvnitř produktových řad. Zdá se, že nehledě na velikost abrazivních zrn, pásy vytváří přibližně stejné povrchy, které jsou ovlivněny spíše opotřebením brusných zrn a vnějšími vlivy. Pouhým pohledem je vzorky k pásům obtížné přiřadit a rozeznat. Naměřené hodnoty

však drobným odchylkám ve vzhledu povrchů odpovídají. Kvalita povrchů tvořených pásy 337DC i 237AA je silně závislá na způsobu aplikace a použití pásů. Troufám si tvrdit, že při odstranění vlivu člověka z procesu broušení by pravděpodobně byly rozdíly patrnější a volba pásu by hrála větší roli.

Pro domácí kutilské použití je však rozdíl mezi pásy 337DC-A100, A65 a A45 zcela zanedbatelný. Pro Trizact 237AA platí totéž, jen lze očekávat povrchy dosahující lepších kvalit. Pokud požadujeme povrch velmi kvalitní, stává se Trizact 237AA-A16 jasnou volbou.

Je možné, že při optimální řezné rychlosti by mezi povrchy byly lépe patrné rozdíly. Hodnoty drsnosti by pravděpodobně lépe korespondovaly se seřazením dle jemnosti pásů v produktových řadách. Například u hodnot Ra a Rz by ale pravděpodobně došlo ke zhoršení. Při vyšších rychlostech totiž dochází k zesílení efektu samoostření brusného nástroje vylamováním otupených brusných zrn, která při nižších rychlostech nejsou pro vylomení dostatečně zatížena. S mým vybavením bohužel nebylo možné dosáhnout optimálních řezných podmínek.

6 Závěr

V prvních kapitolách se práce věnuje zejména běžně používaným metodám abrazivního obrábění a parametrům, kterých je pomocí jednotlivých metod možné dosáhnout. Dále se práce zabývá pojmem brusný materiál a definuje ho. Následně se zabývá historicky používanými přírodními abrazivy, jejich vlastnostmi a jejich uplatněním v době minulé i dnešní. Kapitola o syntetických brusných materiálech rozebírá jejich fyzikální, chemické a technologické vlastnosti. Její část se stejným způsobem věnuje supertvrdým materiálům.

Ve čtvrté kapitole se rozepisují o nových brusných materiálech, zejména na bázi oxidu hlinitého. Nejprve je popsána technologie jejich výroby a následně se detailně věnují novým abrazivním zrnům, jejich vlastnostem i mikrostruktuře. Kapitulu nových abraziv zakončuje výhled do budoucna o nanokrystalických korundových abrazivech, která nyní prochází intenzivním vývojem.

Dílenské broušení pásovými bruskami zažívá v posledních letech velký rozmach. Stále více domácích kutilů, ale i profesionálů z řad uměleckých kovářů a dalších, si dílenské pásové brusky pořizuje. Pásové broušení se rovněž uplatňuje i ve výrobě, kde se vyskytují nejrůznější problémy spojené zejména s nedostatkem relevantních informací. Požadovaných výsledků se pak uživatelé dobírají zdlouhavým experimentováním s různými brusnými pásy. V praktické části této práce jsem se pokusil výsledky takového experimentu vyjádřit číselně pomocí různých veličin drsnosti a ilustrovat fotografiemi z digitálního mikroskopu.

Experimentální část se zabývá srovnáním vlastností brusných pásů, na kterých se uplatňují v předchozích kapitolách popsaná brusná zrna. Je zkoumán jejich účinek při dílenském broušení.

Ačkoli je dílenské broušení silně zatíženo lidským faktorem a zkoumaný vzorek brusných pásů neobsahuje zdaleka všechny produkty, které jsou na trhu k dispozici, představují výsledky zajímavý náhled.

Pokud je brusné zrno zkoumaného abrazivního produktu známé, je možné dedukovat, jakých výsledků bude dosahovat na jiných produktech, nebo v jiných zrnitostech, pomocí porovnání se srovnávací základnou, kterou v tomto případě byl produkt 784F firmy 3M. Z katalogů prezentovaných výrobcí není možné podobné hodnoty získat a tak mohou sloužit potenciálním zákazníkům pro ucelení pohledu na problematiku a pomoci jim tak s výběrem vhodného brusného nástroje pro oblast dílenského broušení.

7 Zdroje

- [1] DRÁBEK, Lukáš. *Návrh technologie broušení tlačných pružin*. 2015. Dostupné také z: <https://core.ac.uk/download/pdf/94765419.pdf>
- [2] Obrábění a zpracování kovů. In: *Elektronická učebnice*. Olomouc: eluc, 2012. Dostupné také z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1825>
- [3] HUMÁR, Antonín. *Technologie obrábění – 3. část: Interaktivní multimediální text pro bakalářský a magisterský studijní program* [online]. In: . Vysoké učení technické v brně, Fakulta strojího inženýrství, Ústav strojírenské technologie, s. 3-31 [cit. 2022-06-09]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/13479-Technologie-i-technologie-obrabeni-3-cast.html>
- [4] KAZDERA, Tomáš. *Nové metody dokončování vnitřních rotačních ploch*. Technická 2896/2, 616 69, Brno, 2011.
- [5] DVOŘÁK, Luděk. Zlepšení povrchu a tvaru. In: *Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2022-06-09]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20211222140756/https://www.mmspektrum.com/clanek/zlepseni-povrchu-a-tvaru>
- [6] *TechCentrum: Postupy při honování a vhodná brusiva* [online]. In: . Česká Třebová: TechCentrum, 2021 [cit. 2022-06-09]. Dostupné z: <https://www.prodejbrusiva.cz/postupy-pri-honovani-a-vhodna-brusiva-techcentrum>
- [7] Filcový leštící kotouč. In: *Abrasiv*. Abrasiv, a.s. Pod Borkem 312 293 01 Mladá Boleslav: Abrasiv a.s, 2022. Dostupné také z: <https://eshop.abrasiv.cz/filcovy-lestici-kotouc-150x5x254>
- [8] POŠMOURNÝ, Josef. *Použití nanovláknenných nosičů nanoabraziv*. Hálkova 6 461 17 Liberec, 2014. Dostupné také z: https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/49366/V_04714_Mb.pdf?sequence=-1

- [9] HANZLÍK, Václav. *Technologie a metody dokončování rovinných ploch*. Technická 2896/2, 616 69, Brno, 2011. Dostupné také z: <http://docplayer.cz/22085489-Technologie-a-metody-dokoncovani-rovinnych-ploch.html>
- [10] Lapování. In: *SlideToDoc*. Místo vydání neznámé: Nakladatelství neznámé, 2022. Dostupné také z: <https://slidetodoc.com/lapovn-pat-mezi-dokonovac-zpsoby-obrbn-kdy-k/>
- [11] *Díly Perkins: honovací hlava* [online]. In: . Místo vydání neznámé: Webnode, 2020 [cit. 2022-06-09]. Dostupné z: <https://perkins-dily.webnode.cz/servis-motoru-perkins/honovani-a-lisovani-vlozek-valcu/>
- [12] JAMROZIK, Artur, Łukasz KLAPISZEWSKI, Beata STRZEMIECKA, Adam VOELKEL a Teofil JESIONOWSKI. *Abrasive Technology. Abrasive Technology - Characteristics and Applications* [online]. Lublin University of Technology: IntechOpen, 2018, kapitola 6 [cit. 2022-06-09]. ISBN 978-1-83881-680-3. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/chapters/59695>
- [13] VINTER, Bohuslav. *Brusiva, brusné prostředky* [online]. [cit. 2022-01-02]. Střední odborné učiliště stavební, odborné učiliště a učiliště. Sabinovo náměstí, 16 360 09, Karlovy Vary, 2014. Dostupné také z: <https://www.slideserve.com/fauna/stredn-odborn-u-ili-t-stavebn-odborn-u-ili-t-a-u-ili-t>
- [14] Broušící materiály. In: *Studijní materiály nejen do strojírenství* [online]. Vzdělání pro život [cit. 2022-06-09]. Dostupné z: <http://strojirenstvi-stredni-skola.blogspot.com/2011/04/3244-brousici-materialy.html>
- [15] *Nerudní a stavební suroviny: Smírek* [online]. In: . Ostrava: Institut geologického inženýrství Hornicko-geologická fakulta, Katedra stavebních hmot a hornického stavitelství, Fakulta stavební, Vysoká škola báňská- Technická univerzita Ostrava, 2006 [cit. 2022-06-09]. Dostupné z: <http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/nerudy/smirek.html>
- [16] ZUMR, Filip. *Broušící nástroje*. Praha, Dejvice, Technická 4, 2018.
- [17] Břidlicový brousek. In: *Maxihobby*. Wagnerova 832, 666 01 Tišnov: Maxihobby, 2021. Dostupné také z: <https://www.maxihobby.cz/>

- [18] *Krystalický křemík. Zabiják číslo jedna na každé stavbě!* [online]. In: . CRDR spol. s r.o. Jana Masaryka 108/10, 120 00 Praha 2 - Vinohrady: BOZP koordinace.cz, 2021 [cit. 2022-06-09]. Dostupné z: <https://www.koordinacebozp.cz/aktuality/krystalicky-kremik-ve-stavebnictvi/>
- [19] *Návštěva horninového mikrosvěta :Pískovec: virtuální galerie mikroskopických výbrusů hornin* [online]. In: . Praha: Fakulta stavební, ČVUT v Praze, 2011 [cit. 2022-06-09]. Dostupné z: <https://departments.fsv.cvut.cz/k135/wwwold/webkurzy/mikro/piskovec.html>
- [20] Arkansas stone. In: *Sharpening Supplies*. Middleton WI 53562: Wingra Direct LLC, 2006. Dostupné také z: <https://www.sharpeningsupplies.com/Soft-Arkansas-Pocket-Stone-P1627.aspx>
- [21] *Druhy brusiv používaných na brusných pásech* [online]. In: . Piskač a syn a.s. Novohradská 1737 České Budějovice 370 08: Piskač a syn, 2020 [cit. 2022-06-09]. Dostupné z: <https://www.eshop.piskacasyn.cz/druhy-brusiv-pouzivanych-na-brusnych-pasech/t-24>
- [22] HENCL, Marek. *Tvarování a orovnávání brousicích kotoučů z KNB a DIA*. Praha, Dejvice, Technická 4, 2020.
- [23] *Technologie keramiky* [online]. In: . Praha: VŠCHT, Ústav skla a keramiky, 2003 [cit. 2022-06-09]. Dostupné z: https://old.vscht.cz/sil/keramika/technologie_keramiky.html
- [24] HOLEŠOVSKÝ, František. *Abrazivní metody dokončování povrchů: Metodická příručka* [online]. 1. Praha: Centrum pro studium vysokého školství, v.v.i, 2015 [cit. 2022-06-09]. ISBN 978-80-86302-68-3. Dostupné z: <https://adoc.pub/queue/frantiek-holeovsky.html>
- [25] NADOLNY, Krzysztof. State of the art in production, properties and applications of the microcrystalline sintered corundum abrasive grains. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014, **74**(9-12), 1445-1457. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-014-6090-2
- [26] *Abranova: tryskáčské materiály* [online]. In: . Rvenice: Anranova, 2022 [cit. 2022-06-09]. Dostupné z: <https://abranova.cz/korund>

- [27] LINDSAY, R.P. The Performance of Seeded Gel Abrasives in the Laboratory and at Customer Test Sites. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*. 1989, **61**(10), 20-26. Dostępne z: doi:doi.org/10.1108/eb036854
- [28] DISLICH, Helmut. Sol-Gel 1984 → 2004 (?). *Journal of Non-Crystalline Solids*. 1985, **73**, 599-612. Dostępne z: doi:https://doi.org/10.1016/0022-3093(85)90379-5.
- [29] *MECHANIK: NAUKOWA SZKOŁA OBRÓBKI ŚCIERNEJ*. Al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków: Politechnika Krakowska, Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji, 2013, . Dostępne także z: https://www.mechanik.media.pl/pliki/do_pobrania/artykuly/2/5208_33_s_311_323.pdf
- [30] WOOD, Thomas E., Dwight D. ERICKSON, Mark G. SCHWABEL a Chris J. GOODBRAKE. Sol–Gel Abrasive Grains: History, Precursor Properties, and Microstructural Control. *Handbook of Sol-Gel Science and Technology*. Cham: Springer International Publishing, 2017, s. 1-18. ISBN 978-3-319-19454-7. Dostępne z: doi:10.1007/978-3-319-19454-7_60-1
- [31] *Archives of civil and mechanical engineering*. Wrocław: Committee of Civil and Mechanical Engineering of Polish Academy of Science, 2003, . ISSN 1644-9665. Dostępne także z: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.956.5202&rep=rep1&type=pdf#page=51>
- [32] The Three Pillars of Ceramic Abrasive Grain Performance. In: *Abrasive Grains*. Saint-Gobain Specialty Grains and Powders Worcester, Massachusetts: Saint-Gobain, 2020. Dostępne także z: <https://www.abrasivematerials.saint-gobain.com/news/three-pillars-ceramic-abrasive-grain-performance>
- [33] Aerospace Manufacturer Benefits from New Norton SG Abrasive Technology. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*. 1989, **61**(8), 9-10. Dostępne z: doi:https://doi.org/10.1108/eb036821

- [34] ELEKOVÁ, L. a Z. LIPA. *Comparison of conventional and structured abrasives: Research Papers*. 18. Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology, 2009, , 21-28 s. Dostupné také z: https://www.mtf.stuba.sk/buxus/docs/doc/casopis_Vedecke_prace/27/elekova.pdf
- [35] KAPŁONEK, Wojciech Kapłonek a Miorița UNGUREANU. SEM-based imaging and analysis of surface morphology of the Trizact™ advanced structured abrasives. *Journal of Mechanical and Energy Engineering* [online]. 2018, **2**(1), 17-26 [cit. 2022-06-09]. ISSN 25441671. Dostupné z: doi:10.30464/jmee.2018.2.1.17
- [36] 3M™ Trizact™ Abrasives for Metal Polishing and Finishing. In: *3M Science Applied to Life™* [online]. Indonesia: 3M, 2022 [cit. 2022-06-09]. Dostupné z: https://www.3m.co.id/3M/en_ID/metalworking-id/products/featured-products/trizact/
- [37] *Brusné systémy: Brusné materiály pro pásové broušení*. Vyskočilova 1 Praha 4, 2007, 16 s. Dostupné také z: <https://www.piskacsyn.cz/wp-content/uploads/3m-brusne-materialy-pro-pasove-brouseni.pdf>
- [38] Co znamená 3M Trizact?. In: *Piskač a syn a.s.* Novohradská 1737 České Budějovice: Piskač a syn, 2020. Dostupné také z: <https://www.eshop.piskacsyn.cz/co-znamená-3m-trizact/t-17>
- [39] WESELÝ, Aleš. Jak brousit s brusným pásem 3M Trizact?. In: *Piskač a syn a.s.* Novohradská 1737, České Budějovice: Piskač a syn, 2020. Dostupné také z: <https://www.eshop.piskacsyn.cz/brouseni-trizact/t-18>
- [40] *3M™ Cubitron™ II Brusné pásy* [online]. In: . V Parku 2343/24, 148 00, Praha 4: 3M Česko, Průmyslová divize - brusiva a brusné systémy, 2011 [cit. 2022-06-09]. Dostupné z: <https://www.piskacsyn.cz/wp-content/uploads/3m-brusne-pasy-cubitron-ii.pdf>

- [41] *3M™ Cubitron™ II Flap Discs: For grinding, weld removal, deburring and more* [online]. In: . 3M House, 28 Great Jackson Street, Manchester M15 4PA: 3M Abrasive Systems Division, 2016 [cit. 2022-06-09]. Dostupné z: <https://multimedia.3m.com/mws/media/13437410/3m-cubitron-ii-flap-discs-brochure-fi.pdf>
- [42] HOLEŠOVSKÝ, František, Martin BARTOŠ, Milan DIAN a Jan ŘEHOŘ. Application of New Abrasives and their Quality Parameters. *Solid State Phenomena*. Trans Tech Publications, Ltd, 2017, **261**, 181-188. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.261.181>
- [43] GUJRATHI, Ankit V, Abhijeet DALVI a Abhijit WAGH. Optimization of Generation Gear Grinding Process. *Gear technology*. The American Gear Manufacturers Association, 2020, **36**(6), 46-50. Dostupné také z: <https://www.geartechnology.com/ext/resources/issues/0820x/grinding-optimization.pdf>
- [44] DHOBLE, S.J., D.R. PESHWE a Abhilasha JAIN. Spectroscopy of Lanthanide Doped Oxide Materials: Aluminum Oxynitride. In: *Advanced research on oxynitride phosphors*. Nagpur, India: Woodhead Publishing, 2020, s. 305-326. ISBN 9780081029350. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102935-0.00008-3>
- [45] NADOLNY, Krzysztof, Paweł SUTOWSKI a Daniela HERMAN. Analysis of aluminum oxynitride AlON (Abral®) abrasive grains during the brittle fracture process using stress-wave emission techniques. *Int J Adv Manuf Technol*. 2015, **81**(1961–1976)2015. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1007/s00170-015-7338-1>
- [46] HOLEŠOVSKÝ, František, profesor, odborník na broušení a abrazivní materiály [ústní sdělení]. Praha, Technická 4, 8.2.2022. (fyzikální a technologické vlastnosti abrazivních zrn, zrno Abral a náročnost jeho aplikace).

- [47] BREVAL, E., G.C. DODDS a N.H. MACMILLAN. The hardness, stiffness and toughness of diphasic abrasive materials prepared by sol-gel techniques. *Materials Research Bulletin*. Materials Research Laboratory The Pennsylvania State University University Park, PA 16802: Pergamon Press Ltd, 1985, **20**(4), 1-17. Dostupné z: doi:10.1016/0025-5408(85)90009-1
- [48] KORN, Derek. Reducing Fastener Grinding Costs Using Advanced Abrasives. In: *Modern Machine Shop*. 6915 Valley Ave., Cincinnati, OH 45244: Gardner Business Media, Inc, 2011. Dostupné také z: <https://www.mmsonline.com/articles/reducing-fastener-grinding-costs-using-advanced-abrasives>
- [49] KISS, Sándor, János KUNDRÁK a Zsolt MAROS. Norton Vitrium 3 – Revolutionary Grain Adhesion. *Key Engineering Materials*. Trans Tech Publications, Switzerland, 2013, **581**(1), 229-234. Dostupné z: doi:doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.581.229
- [50] *Eshop Piskač a syn: (informace o výrobcích prezentované distributorem)* [online]. In: . Novohradská 1737 České Budějovice: Piskač a syn, 2020 [cit. 2022-06-09]. Dostupné z: <https://www.eshop.piskacasyn.cz/brusne-pasy>
- [51] *Měření drsnosti povrchů se zaměřením na měřící techniku Mytutoyo SJ 210*. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích Pedagogická fakulta, 2013. Dostupné také z: https://theses.cz/id/xoi08h/BP_Gajdok.pdf

Seznam obrázků

Obr. 1- Broušení na plocho [2].....	5
Obr. 2- Broušení na kulato [2]	5
Obr. 3- Broušení vnitřních válcových ploch [2].....	6
Obr. 4- Bezhroté broušení [2]	7
Obr. 5- Filcový leštící kotouč [7]	8
Obr. 6- Lapovací nástroje [8]	9
Obr. 7- Lapovací trn [10]	9
Obr. 8 Honovací hlava [11]	10
Obr. 9- Pohyby při superfinišování [6]	10
Obr. 10- Smírek [12].....	13
Obr. 11- Světlá pórovitá pemza [12].....	14
Obr. 12- Břidlicový brousek [16]	14
Obr. 13- Krystal obecného křemene [12]	15
Obr. 14- Hořický pískovec [15].....	15
Obr. 15- Chalcedon: brusné kameny z odrůdy Arkansas [19]	16
Obr. 16- Zrna Cubitron [24]	25
Obr. 17- Mikrokrystalický oxid hlinitý legovaný yttriem [25].....	25
Obr. 18- Mikrostruktura zrna Cubitron 321 [25]	26
Obr. 19- Cubitron 331- oxid hlinitý legovaný zinkem a gadoliniem [25]	27
Obr. 20- Lom zrnem Cubitron 201 [25].....	28
Obr. 21- Zrno Cubitron 222 [25]	29
Obr. 22- Mikrostruktura zrna SG [27]	30
Obr. 23- Zrna SG™ [20]	30
Obr. 24- (zleva) Zrno SG zvětšeno 1000x a 10 000x [20]	31
Obr. 25- (zleva) Zrna TG a TG2 [27]	32
Obr. 26- Zrno TG mísené s růžovým korundem [20] [26].....	32
Obr. 27- Zrna DG [27].....	33
Obr. 28- broušení pásem Trizact [31]	34
Obr. 29- mechanismus opotřebení zrn konvenčního pásu [29]	34
Obr. 30 Mechanismus opotřebení strukturovaného pásu [29].....	35

Obr. 31- Porovnání struktury brusných pásů [30]	35
Obr. 32- struktura materiálu Trizact 237AA[30] a abrazivní útvar Trizact 337DC.....	36
Obr. 33- pohled na uspořádání brusných útvarů materiálu Trizact 337DC [34]	36
Obr. 34- porovnání úběru materiálu zrna Cubitron II a konvenčním abrazivem [24]	38
Obr. 35- Pohled na zrna materiálu Cubitron II [36]	38
Obr. 36- Elektronová mikroskopie zrna Abral [40]	39
Obr. 37- Mikrostruktura zrna NQ [43]	40
Obr. 38- Zleva: srovnání konvenčního pojiva a pojiva systému Virtum 3 [44]	41
Obr. 39- Elektronová mikroskopie nanokrystalické korundové struktury [20]	42
Obr. 40- Snímky povrchů broušených pásů běžných zrnitostí.....	47
Obr. 41- Vliv zrnitosti řady pásů 784F na drsnost povrchu Ra	49
Obr. 42- Vliv zrnitosti řady pásů 784F na drsnost povrchu Rz a hloubku drsnosti Rt	49
Obr. 43- Vliv zrnitosti řady pásů 784F na průměrnou šířku prvků profilu.....	49
Obr. 44- Vliv pásů se zrnitostí P120 na drsnost povrchu Ra	50
Obr. 45- Vliv pásů se zrnitostí P120 na drsnost povrchu Rz a hloubku drsnosti Rt.....	51
Obr. 46- Vliv pásů se zrnitostí P120 na průměrnou šířku prvků profilu	51
Obr. 47- Vliv pásů se zrnitostí P80 na drsnost povrchu Ra	52
Obr. 48- Vliv pásů se zrnitostí P80 na drsnost povrchu Rz a hloubku drsnosti Rt.....	52
Obr. 49- Vliv pásů se zrnitostí P80 na průměrnou šířku prvků profilu	53
Obr. 50- Vliv pásů se zrnitostí P60 na drsnost povrchu Ra	54
Obr. 51- Vliv pásů se zrnitostí P60 na drsnost povrchu Rz a hloubku drsnosti Rt.....	54
Obr. 52- Vliv pásů se zrnitostí P60 na průměrnou šířku prvků profilu	54
Obr. 53- Vliv pásů se zrnitostí P36 na drsnost povrchu Ra	56
Obr. 54- Vliv pásů se zrnitostí P36 na drsnost povrchu Rz a hloubku drsnosti Rt.....	56
Obr. 55- Vliv pásů se zrnitostí P36 na průměrnou šířku prvků profilu	56
Obr. 56- Snímky povrchů broušených jemnými a velmi jemnými pásy	57
Obr. 57- Vliv zrnitosti pásů Trizact na drsnost povrchu Ra.....	59
Obr. 58- Vliv zrnitosti pásů Trizact na drsnost povrchu Rz a hloubku drsnosti Rt.....	59
Obr. 59- Vliv zrnitosti pásů Trizact na průměrnou šířku prvků profilu	59

Obrázky, u kterých není uveden zdroj, jsou vytvořeny mnou.

Seznam tabulek

Tab. 1- dosahované přesnosti a drsnosti povrchů [1] [3]	11
Tab. 2- hodnoty zrnitostí 3M strukturovaných abraziv a FEPA P [30] [32]	36
Tab. 3- pásy běžných zrnitostí.....	43
Tab. 4- pásy jemné a velmi jemné	43
Tab. 5- naměřené hodnoty 784F	48
Tab. 6- naměřené hodnoty P120	50
Tab. 7- naměřené hodnoty P80	51
Tab. 8- naměřené hodnoty P60	53
Tab. 9- naměřené hodnoty P36	55
Tab. 10- naměřené hodnoty Trizact	58

Seznam příloh

Jedná se o protokoly měření drsnosti na CD.

Příloha č. 1.....	784F_P120.pdf
Příloha č. 2.....	784F_P80.pdf
Příloha č. 3.....	784F_P60.pdf
Příloha č. 4.....	784F_P36.pdf
Příloha č. 5.....	984F_P120.pdf
Příloha č. 6.....	984F_P36.pdf
Příloha č. 7.....	777F_P80.pdf
Příloha č. 8.....	R822_P120.pdf
Příloha č. 9.....	R966_P60.pdf
Příloha č. 10.....	237AA_A16.pdf
Příloha č. 11.....	237AA_A30.pdf
Příloha č. 12.....	237AA_A45.pdf
Příloha č. 13.....	337DC_A45.pdf
Příloha č. 14.....	337DC_A65.pdf
Příloha č. 15.....	337DC_A100.pdf