

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**Fakulta strojní – Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**TVAROVÁNÍ A OROVNÁVÁNÍ BROUSICÍCH KOTOUČŮ  
Z KNB A DIA**

**SHAPING AND DRESSING OF GRINDING WHEELS FROM CBN AND DIA**

**Autor:**

**Marek Hencl**

**Vedoucí práce:**

**Ing. Lubomír Štajnochr**

**Rok:**

**2020**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Henci** Jméno: **Marek** Osobní číslo: **466101**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Tvarování a orovnávání brousících kotoučů z KNB a DIA.**

Název bakalářské práce anglicky:

**Shaping and dressing of grinding wheels from CBN and DIA.**

Pokyny pro vypracování:

1. Popište metody výroby brousících nástrojů ze supertvrdých materiálů.
2. Popište možnosti docílení požadovaného profilu brousících kotoučů.
3. Porovnejte metody oživování a tvarování brousících kotoučů z KNB a DIA.
4. Pokuste se o ekonomické zhodnocení jednotlivých postupů.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Lubomír Štajnochr, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS**

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

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_



Ing. Lubomír Štajnochr  
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.

23.6.2020

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou bakalářskou práci na téma *Tvarování a orovnávání brousících kotoučů z KNB a DIA* vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne: .....

Podpis autora: .....

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu Ing. Lubomíru Štajnochrovi za cenné připomínky a odborné rady pro vypracování mé bakalářské práce. Dále děkuji panu Janu Čeřovskému ze společnosti DIA-Praha s.ro. a Ing. Eduardu Matúsovi, MBA ze společnosti Urdiamant s.r.o za poskytnuté informace.

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce je zaměřena na problematiku tvarování a orovnávání brousících kotoučů z kubického nitridu bóru a diamantu. V úvodní části jsou popsány fyzikální a chemické vlastnosti diamantu a kubického nitridu bóru. Dále jsou uvedeny vlastnosti brousících nástrojů a jejich značení. Následují postupy výroby nástrojů ze supertvrdých materiálů a metody orovnávání kotoučů z tohoto brusiva. V závěru této práce jsou jednotlivé metody porovnány a zhodnoceny.

## **Klíčová slova**

Tvarování, orovnávání, oživování, brousící kotouče, KNB, diamant, supertvrdé materiály

## **Abstract**

This bachelor thesis is focused on the issue of shaping and dressing of grinding wheels made of cubic boron nitride and diamond. The introductory part describes the physical and chemical properties of diamond and cubic boron nitride. The properties of grinding tools and their system of marking are following. Thereinafter, the manufacturing processes of tools from superhard materials and methods of dressing wheels from these abrasives are described. At the end of the thesis, the methods are compared and evaluated.

## **Key words**

Shaping, dressing, cleaning, grinding wheels, CBN, diamond, superhard materials

# Obsah

1	Úvod .....	6
2	Brousicí materiály.....	7
2.1	Konvenční brousicí materiály .....	8
2.2	Supertvrdé brousicí materiály .....	9
2.2.1	Diamant.....	10
2.2.2	Kubický nitrid bóru .....	13
3	Brousicí nástroje.....	15
3.1	Pojiva.....	15
3.2	Sloh.....	16
3.3	Tvrdost .....	17
3.4	Zrnitost.....	18
3.5	Koncentrace .....	19
3.6	Tvar a označení kotouče .....	20
4	Výroba brousících nástrojů ze supertvrdých materiálů .....	23
4.1	Nástroje s pryskyřičným pojivem .....	23
4.2	Nástroje s keramickým pojivem .....	24
4.3	Nástroje s kovovým pojivem .....	26
5	Orovnávání kotoučů z KNB a diamantu .....	28
5.1	Konvenční metoda .....	29
5.2	Elektroerozivní metoda.....	36
5.3	Elektrolytická metoda .....	39
5.4	Laserová metoda.....	40
5.5	Porovnání metod.....	41
6	Závěr.....	42
7	Seznam použité literatury a zdrojů .....	43
8	Seznam obrázků .....	47
9	Seznam tabulek .....	48

# 1 Úvod

Broušení je jednou z nejstarších metod obrábění, při které je potřeba dosahovat velmi přesných rozměrů, tvarů a vysoké kvality povrchu. Pro tyto účely jsou používány brousící nástroje obsahující přírodní či umělá abraziva.

Relativně novými syntetickými materiály jsou umělý diamant a kubický nitrid bóru, které dosahují největších tvrdostí. Přestože jsou tvrdosti kubického nitridu bóru a diamantu podobné, jejich využití v důsledku chemických a fyzikálních vlastností je různé. Z důvodu ceny jsou však využívány jen pro specifické aplikace, kdy není možné alternativní řešení.

Brousící nástroje z kubického nitridu bóru a diamantu se dnes hojně používají v průmyslové praxi především ve formě kotoučů, které se obvykle skládají z tenké brusné vrstvy připevněné k tělu kotouče vyrobeného z kovu, keramiky nebo kompozitního materiálu. Vazba mezi brusnými zrny a tělem je zprostředkována pojivem, které má též vliv na vlastnosti kotouče.

Dosažení požadovaných parametrů je umožněno správnou volbou brousícího kotouče. Při nevhodném výběru kotouče, řezných kapalin nebo řezných podmínek dochází ke zkrácení jeho životnosti a zvýšení nákladů brousícího procesu.

Při ztrátě tvaru brusné vrstvy nebo velkém poklesu brousící schopnosti je potřeba kotouče orovnávat a oživovat pro zachování řezných vlastností.

Orovnávání kotoučů lze pomocí konvenčních, elektroerozivních, elektrolytických nebo laserových metod provést v některých případech přímo na bruskách nebo na speciálních orovnávacích strojích.

## 2 Broušící materiály

Brusiva jsou krystalické povahy a jejich vlastnosti závisí na krystalické struktuře, která je ovlivněna jejich zpracováním nebo obsahem jiných minerálů. Odolnost brusiva vůči opotřebení závisí nejen na tvrdosti brusiva při vysokém kontaktním tlaku, ale také na chemickém složení materiálu. [1]

Broušící materiály jsou používány pro výrobu broušících nástrojů, přípravků nebo jsou použity jako volné brusivo. Přípravky mohou být ve formě pevné nebo tekuté pasty. Broušící nástroje slouží především k dosažení požadovaného tvaru, rozměru a kvality povrchu broušených předmětů. [5]

Mezi přední vlastnosti broušících materiálů patří tvrdost. Je důležité, aby brusivo bylo stabilní i za vysokých teplot a neztrácelo svou tvrdost. Tvrdost většiny broušících materiálů se snižuje s rostoucí teplotou. Dalším požadavkem je chemická stabilita, kdy je nežádoucí, aby docházelo k chemickým reakcím nebo k difundování do obrobku. [1]

Dalším parametrem definujícím vlastnost zrna je drobivost. Popisuje tendenci ke zlomení zrna při stlačení. Pro malé brusné síly jsou lepší zrna s větší drobivostí. Zlomením zrna se vytváří nové ostré hrany. Proto jsou pro zachování ostrosti brusných kotoučů vhodnější materiály s větší drobivostí, kdy dochází k takzvanému samoostření zrn. Oproti tomu však dochází k většímu opotřebení kotouče. Proti abrazivnímu opotřebení jsou též důležité tepelné vlastnosti, kterými jsou hlavně tepelná vodivost a difuzivita. [1]

Existuje mnoho možností, jak lze broušící materiály rozčlenit. Jedním z typů dělení je dle původu, kde rozlišujeme brusiva přírodní a umělá (syntetická). Druhý způsob rozdělení je na konvenční a supertvrdá brusiva (superabraziva). [1], [5]



## 2.1 Konvenční brousicí materiály

Mezi konvenční brusiva patří z přírodních materiálů pemza, pískovec, břidlice, křemen, chalcedon, smirek, přírodní korund a ze syntetických materiálů to jsou umělé korund, slinutý korund a karbid křemíku. [1], [5]

Pískovec je usazená hornina tvořená zrny křemene, slídy a živce. Pojení zrn zajišťují přírodní cementy, které dle přísad rozlišujeme na křemičité, jílovité, vápenaté a slínité. Tvrdost pískovce se pohybuje od měkkého až po velmi tvrdý. Vyznačuje se především svou samoostřicí schopností. [5]

Břidlice, která též patří mezi usazené horniny, jejíž vlastnosti a složení jsou velmi rozdílné. Pro brousicí aplikace je vhodná břidlice s vysokým obsahem oxidu křemičitého. Používá se zvláště ke zhotovení jemných dokončovacích kamenů. [5]

Chalcedon je hornina tvořená výhradně oxidem křemičitým, ze které se vyrábějí obtahovací kameny a pilníky. [5]

Smirek je minerál na bázi krystalického oxidu hlinitého, který je v porovnání s oxidem křemičitým tvrdší. Výskyt oxidu železa ve smirku má za následek vyšší houževnatost, ale dochází k poklesu tvrdosti. Drcený smirek se dodnes používá na výrobu brousících papírů. [4],[5]

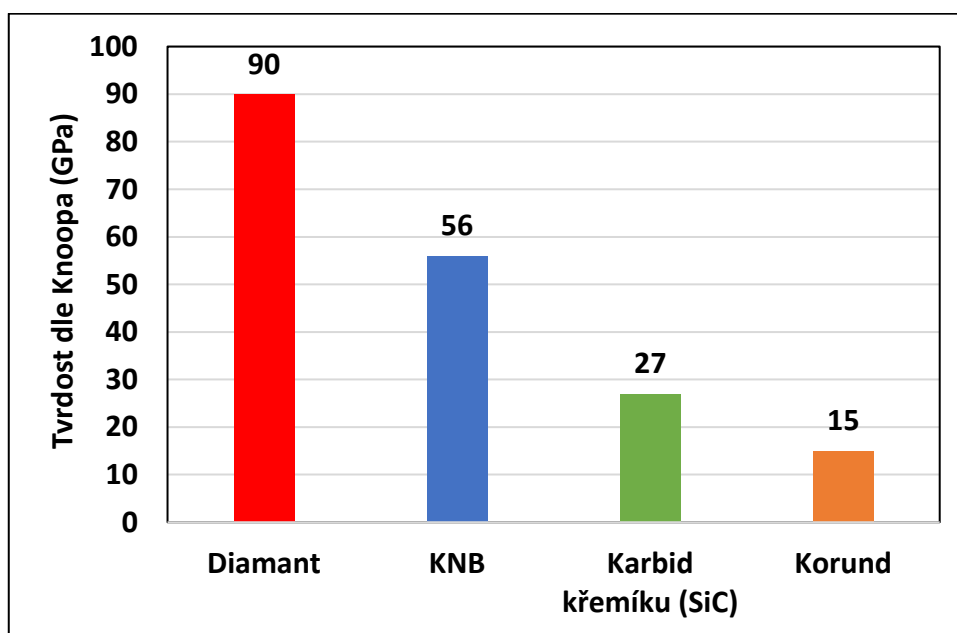
Korund ( $Al_2O_3$ ) je minerál skládající se zejména z krystalického oxidu hlinitého ( $Al_2O_3$ ) a příměsí dalších minerálů. Krystaluje v šesterečné krystalové soustavě. Obsah oxidu hlinitého se pohybuje v rozmezí 80-90 %. Není tolik křehký a zároveň je velmi tvrdý. Na Mohsově stupnici tvrdosti dosahuje hodnoty 9-9,5. Nevýhodou je vyšší cena z důvodu jeho obtížné těžby. [4], [6]

Karbid křemíku (SiC) patří mezi syntetické materiály. Vyrábí se v elektrických pecích z uhlíku a křemičitého písku. Jeho tvrdost, odolnost a houževnatost je ve srovnání s korundem větší. Z karbidu křemíku jsou zhotovovány především brousicí kotouče, obtahovací kameny, pilníky a lešticí pasty. Své využití má zejména při broušení nekovových materiálů, litiny, barevných kovů, slinutých karbidů a nástrojových ocelí. [5], [10]

Přírodní brusivo se používá čím dál méně k výrobě brousících nástrojů, jelikož dochází k jeho úbytku v přírodě, ve většině případů nebývá chemicky čisté a často jeho tvrdost nevyhovuje požadavkům. Jsou však přírodní materiály, které díky svým vlastnostem doposud nelze nahradit syntetickým materiálem. [5], [6]

## 2.2 Supertvrde brousicí materiály

Mezi supertvrde materiály, též nazývané superabraziva, lze zařadit dva synteticky vyráběné zástupce, a to diamant a kubický nitrid bóru (KNB). Vynikají především svou tvrdostí (obr. 1), pravidelností zrn a ostrostí hran oproti běžným materiálům. Mezi jejich aplikace v průmyslu patří broušení keramických materiálů, feritů, superslitin a dalších materiálů. Navzdory větším výrobním nákladům jsou supertvrde materiály hojně využívány z mnoha důvodů nejen ve strojírenství. Jedním z nich je nemožnost použití klasických materiálů, kterými jsou například korund a karbid křemíku. Využití superabraziv též vede ke snižování výrobních nákladů produktů, jelikož jsou oproti běžným materiálům odolnější a dokážou pracovat s vyšší efektivitou. [1], [2]

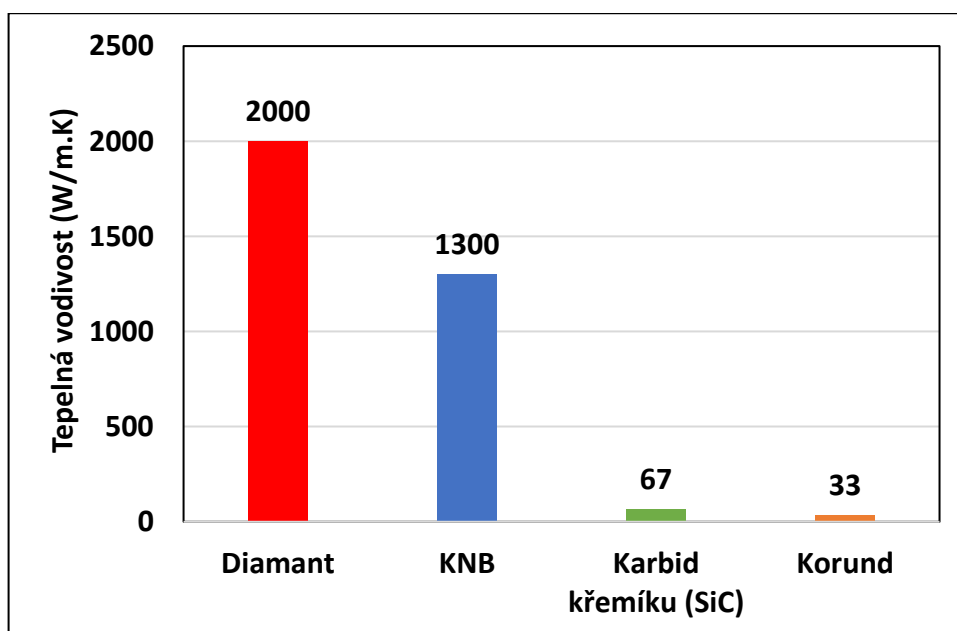


Obr. 1: Porovnání tvrdosti brusiva [3]

Další předností supertvrдых materiálů je jejich velmi vysoká tepelná vodivost, která je dána čistotou materiálu. S větší čistotou materiálu se zvyšuje jeho tepelná odolnost. V případě výskytu cizí částice ve struktuře superabraziv dojde k výraznému poklesu tepelné vodivosti. [1]

## 2.2.1 Diamant

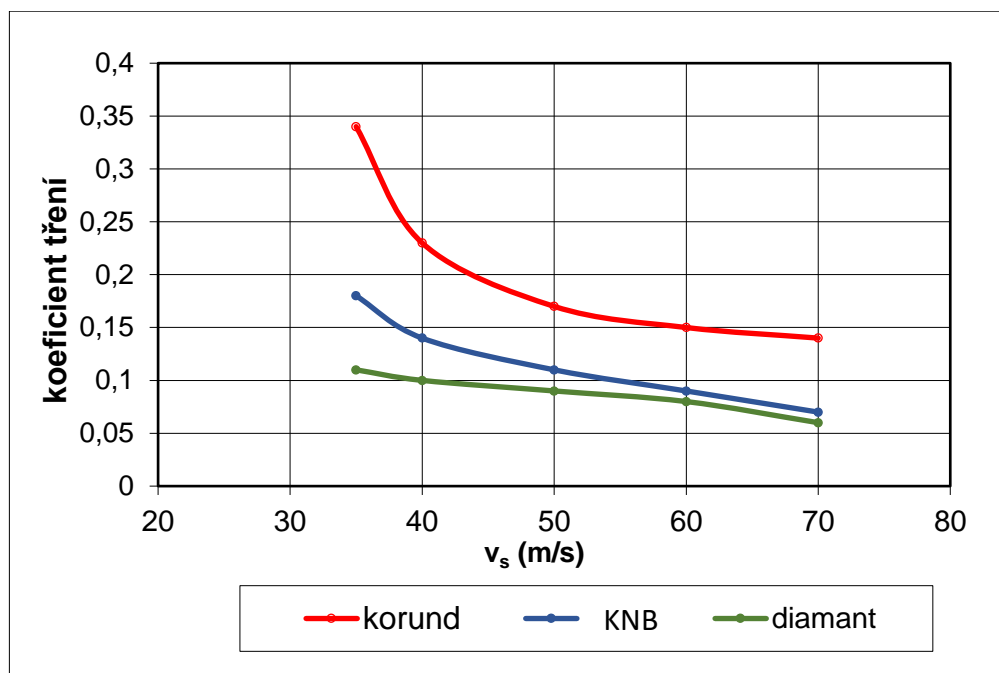
Diamant je doposud nejtvrdší známý materiál, který se využívá pro výrobu brousících nástrojů a obrábění tvrdých kovů. Jeho tvrdost dosahuje v Mohsově stupnici hodnoty 10. Kromě tvrdosti jsou jeho nejdůležitějšími vlastnostmi vysoká pevnost, odolnost proti otěru, tepelná vodivost a tepelná stabilita. Ve vzduchu je tepelně stabilní až do teploty kolem 760 °C. Za normálních podmínek má nejvyšší tepelnou vodivost nejen z brousících materiálů (obr. 2), ale ze všech materiálů vůbec. Tepelná vodivost se pohybuje v rozmezí od 600 W/m.K do 2000 W/m.K, avšak při teplotě 700 °C klesá až na hodnotu 70 W/m.K. [1]



Obr. 2: Porovnání tepelné vodivosti brusiva [2]

Diamant je jednou z forem uhlíku, jehož rozpustnost v železe způsobuje vysoké opotřebení a úbytek diamantového brusiva, a proto je nevhodný pro broušení ocelí a niklových slitin. Další vlastností, kterou by uživatel měl brát na vědomí, je křehkost diamantu v oblasti štěpných rovin. Tato vlastnost je dána orientací krystalů, což způsobuje i obtížné stanovení přesné tvrdosti. Z tohoto důvodu je diamant náchylný na prudké změny teploty a mechanické rázy. Je tedy důležité vyhnout se prudkému ochlazování procesní kapalinou. [1]

Podstatnou vlastností diamantu je nízký součinitel tření. Při zvyšující se obvodové rychlosti kotouče dochází ke snížení součinitele tření (obr. 3). Proto se z důvodu efektivity využívají diamantové nástroje při vyšších rychlostech. [2], [4]



Obr. 3: Závislost koeficientu tření na druhu zrna a rychlosti kotouče [2]

### Přírodní diamant

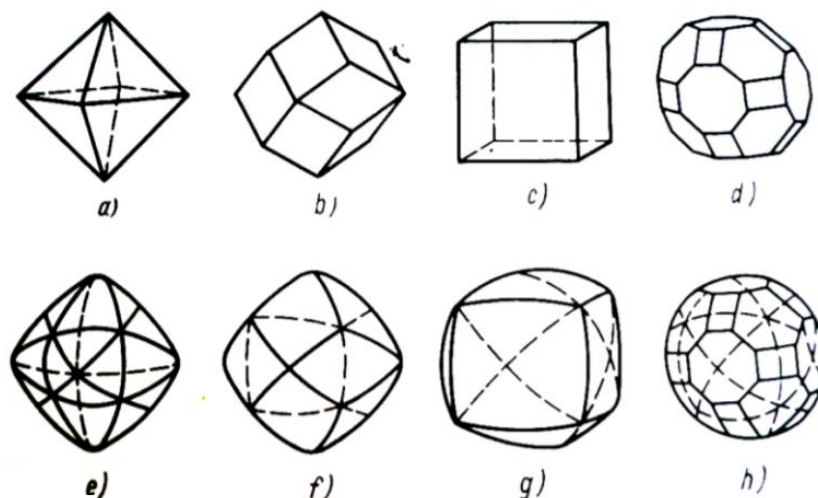
Přírodní diamant je modifikací uhlíku krystalické struktury. Malý obsah příměsí a jiných chemických prvků udává jeho zabarvení.

Vysoká tvrdost je dána vazbami mezi sousedními atomy struktury, které jsou vázány pomocí dvojic valenčních elektronů. Krystal diamantu je anizotropní, což znamená, že má odlišné vlastnosti v různých směrech. [4]

Z geometrických útvarů krystalů rozlišujeme následující (obr. 4):

a) rovnoběžnostěnný osmistěn, b) kosočtvercový dvanáctistěn, c) krychlový, d) kombinovaný s rovinnými stěnami, e) křivostěnný osmistěn, f) křivostěnný dvanáctistěn, g) křivostěnný šestistěn, h) kombinovaný.

Z těchto jsou nejčastější krychle, rovnoběžný osmistěn, kosočtverečný dvanáctistěn a jejich kombinace. [4]



Obr. 4: Tvar krystalů přírodního diamantu [4]

Přírodní diamant se ve formě volného brusiva používá v lapovacích pastách, pilnicích a v brousicích kotoučích, kde je vázán pryskyřicovým či kovovým pojivem. K výrobě diamantových brousicích prášků a past je obvykle použit přírodní diamant nižší kvality. Díky výborné lešitelnosti má též využití u jednokrystalových řezných nástrojů. Dále je využíván při broušení, tvarování a orovnávaní ostatních brusných nástrojů.

Jeho použití je však limitováno teplotou kolem 700 °C, kdy dochází k oxidaci diamantu, a proto je jeho aplikace při vyšší teplotě nevhodná. [4], [5]

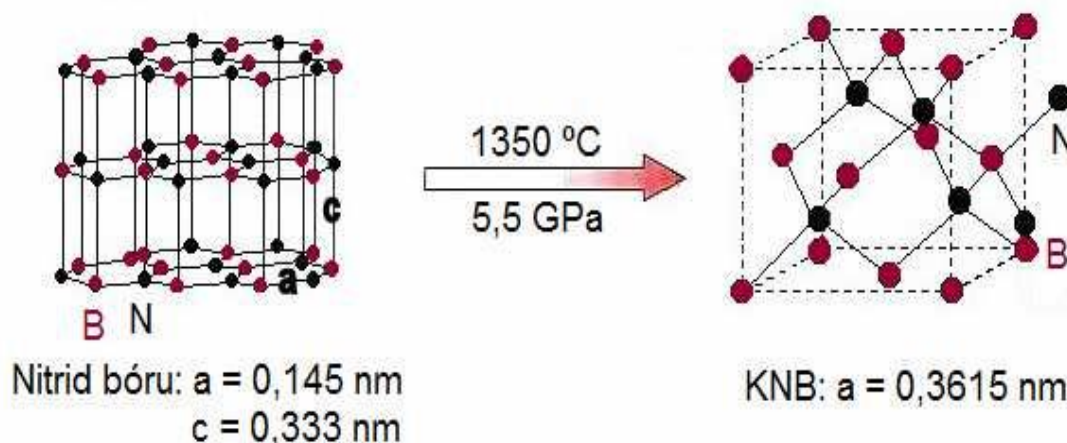
### Syntetický diamant

Syntetický diamant se získává z materiálu bohatého na uhlík pomocí katalyzátoru. Pro výrobu umělého diamantu se běžně používá grafit, méně často saze či dřevěné uhlí. Jako katalyzátor jsou použity kovové materiály, kterými jsou například kobalt, nikl, chrom nebo železo. Za vysokých teplot a tlaků dochází k tavení katalyzátoru a atomy uhlíku mění svou strukturu. Z původně hexagonální struktury vzniká pro diamant typická krychlová struktura. Tímto procesem se podstatně mění fyzikální vlastnosti uhlíku, kde se z měkkého grafitu stává velmi tvrdý diamant. [4]

Tvrdość syntetického diamantu téměř dosahuje tvrdości přírodního diamantu. Využití v průmyslu je též obdobné. Používá se při orovnávaní a tvarování broušicích nástrojů z karbidu křemíku nebo korundu, broušení tvrdých materiálů a lapování nástrojů. Oproti přírodnímu diamantu však mají syntetická zrna hranatější tvar a lepší řezné vlastnosti pro broušicí nástroje. [5]

## 2.2.2 Kubický nitrid bóru

Kubický nitrid bóru (KNB) je synteticky vyráběný materiál. Po diamantu je druhým nejtvrdším broušicím materiálem. Jedná se o sloučeninu bóru a dusíku. Zastoupení bóru ve sloučenině se pohybuje kolem 44 % a dusíku okolo 56 %. Kubický nitrid bóru vzniká z hexagonální formy nitridu bóru za působení vysokých teplot a tlaků (obr. 5). [4], [7]



Obr. 5: Přeměna hexagonální krystalické mřížky nitridu bóru na kubickou [7]

Krystalická struktura KNB je obdobná jako u diamantu, s tím rozdílem, že rozměry krystalické mřížky KNB jsou větší. Delší vzdálenosti mezi atomy KNB, které tvoří mřížku, mají za následek menší tvrdość oproti diamantu. Na druhou stranu je KNB vhodný při broušení kovových materiálů, jelikož chemická vazba mezi atomy je velmi stabilní a nedochází tak k difuzním a oxidačním procesům. Vyniká též výbornou tepelnou vodivostí, velkou houževnatostí a nízkou citlivostí vůči tepelným rázům.

Další předností materiálu je vysoká tepelná odolnost, jelikož na povrchu dochází k tvorbě vrstvy oxidu boritého, který zabraňuje další oxidaci až do teploty 1300 °C. Tato vrstva je ovšem rozpustná ve vodě a při použití procesních kapalin na bázi vody dochází k rychlejšímu opotřebení nástrojů z KNB než při použití kapalin na bázi oleje. [1], [4], [8]

Kubický nitrid bóru je především používán při výrobě brousicích kotoučů, lapovacích a obtahovacích pilníků, dále pak pro výrobu a ostření nástrojů z rychlořezné oceli. [5]

### 3 Broušící nástroje

Broušící nástroje se skládají ze zrn brusiva a pojiva, ve kterém jsou zrna vázána. Existuje mnoho podob broušících nástrojů, od kotoučů přes broušící tělíska, segmenty až po broušící pásy. Broušící nástroj je definován druhem brusiva, velikostí, geometrickým tvarem, pojivem, zrnitostí, tvrdostí, strukturou a koncentrací brusiva. Vlastnosti broušícího nástroje se volí dle použití pro konkrétní účely. Z hlediska tvaru jsou dnes nejvíce používané broušící nástroje ve formě kotoučů. [4]

#### 3.1 Pojiva

Pojivo slouží ke spojení brusných zrn do pevného celku požadovaného rozměru a tvaru. Od typu, množství a zpracování použitého pojiva se odvíjí výsledná tvrdost, pevnost, brusné vlastnosti a struktura kotouče. Převážně používanými pojivy jsou kovová, pryžová, pryskyřičná a keramická. Pojivo má vliv na samoostřicí vlastnosti nástroje a musí též odolávat vlivům teploty a chladicích kapalin. Následující tabulka (tab. 1) uvádí písmenné označení, složení a běžné použití pojiv. [5], [9]

Tab. 1: Druhy pojiv broušících nástrojů [13]

Druh pojiva	Označení podle ČSN 22 4010	Složení	Použití
keramické	V	směsi různých křemičitanů	základní pojivo normálních kotoučů s výjimkou prořezávacích
silikátové	S	alkalické křemičitany	omezené použití např. pro měkké tvarové kotouče nebo drobné nástroje
magnezitové	O	cementové pojivo z magnezitu aj.	omezené použití pro méně přesné broušení
přírodní šelak	E	organická látka	menší pevnost než bakelit, nástroje na ozubení apod.
pryž	R	vulkanizovaná s přídavkem síry	pro velké rychlosti, hladký obráběný povrch
umělé pryskyřice	B	např. bakelit	po keramickém nejdůležitější pojivo, vhodné pro broušení závitů a pro nárazové broušení
kovové	-	slitiny mědi, lehké kovy, litina aj.	pro diamantové kotouče



Pryskyřičné pojivo je ve strojírenství nejpoužívanější. Vyznačuje se vysokou produktivitou broušení, samoostřícími vlastnostmi a cenou. Lze s ním brousit jak s chlazením, tak i za sucha. V případě zanesení brusné vrstvy se oživuje pomocí korundového brousku nebo volným korundovým brusivem. Při ztrátě požadovaného tvaru se kotouče rotačně orovňávají korundovým kotoučem. [14]

Kovové pojivo se uplatňuje při broušení keramiky, skla a stavebních materiálů. Ve strojírenství je určeno pro náročné brousící aplikace, při kterých jsou vysoké nároky na stálost tvaru nebo řezné hrany. V porovnání s pryskyřičným pojivem je více rozměrově stabilní. [14], [15]

Galvanické nanášení kovového pojiva se používá při výrobě tělísek a tvarově složitých kotoučů z KNB a diamantu. Vyznačuje se velkou výkonností broušení s malým přitlakem. Kotouče mají jednovrstvý povlak obsahující brusná zrna. Z tohoto důvodu se netvarují ani neorovňávají, což vede ke snížení nákladů na nástroje. Povlak je tvořený vrstvou niklu, který je elektrochemickými procesy nanášen na kovové tělo kotouče a tloušťka vrstvy odpovídá přibližně polovině průměru použitého zrna. [14], [15]

Keramické pojivo se používá u brusných tělísek z kubického nitridu bóru sloužících k broušení otvorů a pro velmi produktivní broušení kalených ocelí. Diamantové kotouče s keramickou vazbou se používají k broušení nástrojů z polykrystalického diamantu. Orovňání se provádí minimálně, a to diamantovou kladkou nebo vícezrným orovňávačem. [14]

## **3.2 Sloh**

Sloh udává poměr objemu pórů vůči objemu brusných zrn a pojiva v 1 cm<sup>3</sup>. Přítomnost pórů mezi brusnými zrny je podstatná pro dobrý odvod třísek, aby nedocházelo k zanášení kotouče. Větší pórovitost umožňuje lepší odvod tepla při použití chladicí kapaliny. [5], [10]

Z tabulky (tab. 2) je patrné, že čím je číslo označení větší, tím je větší objem pórů ve složení kotouče. Pro broušení měkkých a houževnatějších materiálů se používají pórovitější kotouče. Naopak pro tvrdé, křehké materiály, u kterých je vyžadován hladký povrch, se používají kotouče s hutnějším slohem. [5], [10]

Tab. 2: Označování slohu brousicích nástrojů [5]

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

### 3.3 Tvrdost

Tvrdost je definována jako odpor proti uvolnění zrn z brousicího nástroje, která závisí především na typu použitého pojiva a jeho pevnosti. Při otupení brusného zrna dochází k většímu tření a následně k vylomení zrna, přičemž se odkrývají spodní neotupená zrna. U měkkých kotoučů se zrna uvolňují dříve, než dojde k jejich otupení, což vede k rychlému úbytku kotouče, ztrátě jeho tvaru a rozměru. Oproti tomu u tvrdých kotoučů se otupená zrna nevytlumují a dochází k zanesení povrchu kotouče broušeným materiálem. Kotouč poté ztrácí své řezné vlastnosti a je potřeba odstranit zrna orovnááním. Výhodou některých kotoučů je jejich samoostření, kdy dochází k vylomení zrn po jejich otupení, a kotouč tak neztrácí svou ostrost. [5], [11]

Volba tvrdosti kotouče závisí na druhu broušeného materiálu a způsobu broušení. Pro broušení tvrdých materiálů se výhradně používají měkké kotouče a pro měkké materiály naopak kotouče tvrdé. [11]

Tab. 3: Tvrdost brousících nástrojů [5]

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

### 3.4 Zrnitost

Zrnitost udává velikost jednotlivých zrn použitých v brousícím nástroji. Ovlivňuje výslednou kvalitu povrchu (tab. 4), proto se vybírá dle předepsané drsnosti na výkrese. Pro menší drsnosti se používají kotouče s jemnější zrnitostí a pro větší úběry se volí hrubší zrnitost. Stanovení se provádí proséváním přes síta nebo u menších zrn plavením. [12]

Tab. 4: Vliv zrnitosti diamantu a KNB na drsnost povrchu [16]

Zrnitost		Použití	Drsnost povrchu
Diamant	KNB		~ Ra
D 213 D 181 D 151	B 251 B 213 B 181	Výkonné broušení, kde je žádán především vysoký výkon broušení	1,2
D 126 D 107 D 91	B 151 B 126 B 107	Výkonné broušení a hrubovací operace	0,8
D 76 D 64	B 91 B 76	Střední broušení, ostření řezných nástrojů	0,4
D 54 D 46	B 64 B 54	Dokončovací broušení	0,2
D 39	B 46	Lapování, jemné broušení	0,1
D 27 D 20 D 15	-	Leštění	0,08
D 10 D 7	-	Leštění	0,05
D 6	-	Leštění	0,025

Dříve se pro značení zrnitosti užívala česká norma 22 4015. Zrnitost se uváděla v podobě zlomku, kde číslo v čitateli vyjadřovalo horní mezní rozměr zrna a jmenovatel dolní mezní rozměr. Dnes se však používá norma ISO 6106 (FEPA). [12]

Tab. 5: Převodní tabulka norem [17]

ČSN - 224015 (μm)	ISO 6106 (FEPA) Diamant	ISO 6106 (FEPA) CBN	US Standard ASTM- E-11-70
630/500	D 601		30/35
500/400	D 501		35/40
400/315	D 426		40/45
	D 356		45/50
315/250	D 301	B 301	50/60
250/200	D 251	B 251	60/70
200/160	D 213	B 213	70/80
	D 181	B 181	80/100
160/125	D 151	B 151	100/120
125/100	D 126	B 126	120/140
100/80	D 107	B 107	140/170
80/63	D 91	B 91	170/200
	D 76	B 76	200/230
63/50	D 64	B 64	230/270
50/40	D 54	B 54	270/325
40/28	D 46	B 46	325/400

### 3.5 Koncentrace

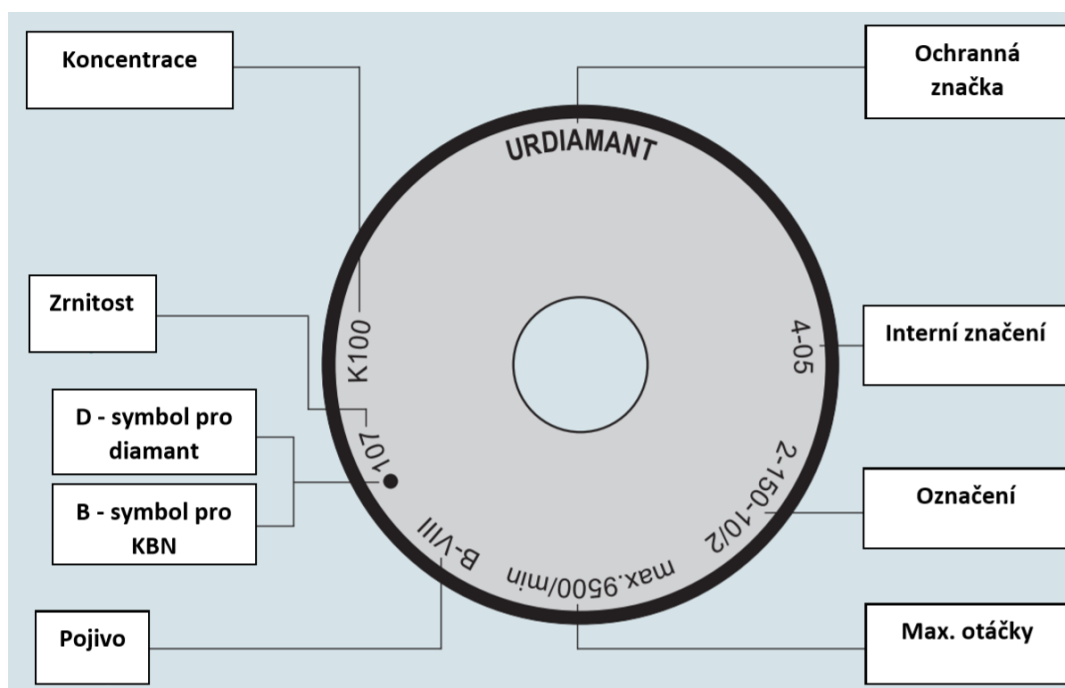
Koncentrace je parametr u KNB a diamantových kotoučů, který vyjadřuje hmotnostní obsah brusiva v 1 cm<sup>3</sup> brousící vrstvy. Je značena písmenem C nebo K. Jako základ byla stanovena koncentrace K100, kde brusivo o hmotnosti 0,88g (4,4 crt.) zaujímá 25 % objemu brusné vrstvy v 1 cm<sup>3</sup>. [14], [16]

Tab. 6: Vlastnosti a využití koncentrací [18]

Nízká koncentrace K25 K40 K50	Střední koncentrace K75 K100	Vysoká koncentrace K125 K150 K175
Sklo Keramika Leštění kovů Zvláštní operace	Běžné broušení kovů Sklo na automatech Drahé kameny Kámen	Broušení otvorů Profilové broušení Kovy na automatech
Dobré samoostřící vlastnosti Zvyšuje výkon broušení Snižuje teplo Snižuje životnost kotouče Zhoršuje stálost tvaru Zvyšuje drsnost povrchu	Většina brousících operací	Horší samoostřící vlastnosti Snižuje výkon broušení Zvyšuje teplo Zvyšuje životnost kotouče Zlepšuje stálost tvaru Snižuje drsnost povrchu

### 3.6 Tvar a označení kotouče

Pro snadnou orientaci o složení a vlastnostech kotoučů na nich musí být zobrazeno jméno výrobce, číslo normy, rozměry, a především informace o jakosti, která se značí kódem. Tento kód obsahuje údaje o tvaru, rozměru, použitém brusivu, zrnitosti, tvrdosti, koncentraci a pojivu. [5]

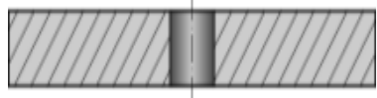
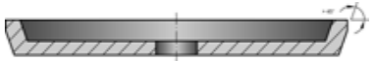

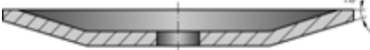

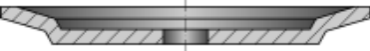
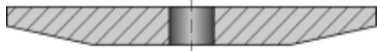
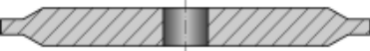
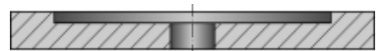
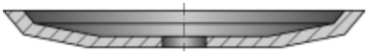
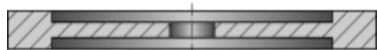
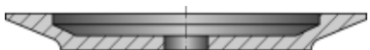


Obr. 6: Příklad značení brousících kotoučů URDIAMANT [16]






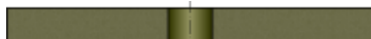


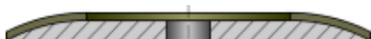

Kotouče se většinou skládají z těla a brousící vrstvy, která je tvořena brusnými zrny a pojivem. Údaje o rozměrech závisí na tvaru. Zpravidla obsahují průměr kotouče, tloušťku brousící vrstvy, celkovou výšku kotouče, rozměr upínacího otvoru a případně rádius nebo úhel zkosení. [16]

Označení tvaru kotouče se řídí danou normou a skládá se ze čtveřice písmen a číslic. Na prvním místě je číslo tvaru nosného tělesa, na druhém písmeno tvaru brusné vrstvy, na třetím číslo umístění vrstvy na nosném tělese a na čtvrtém je písmeno popisující případnou modifikaci. [16]







Tab. 7: Vybrané základní tvary nosného tělesa [19]

Označení	Tvar	Označení	Tvar
<b>1</b>		<b>11</b>	
<b>2</b>		<b>12</b>	
<b>3</b>		<b>13</b>	
<b>4</b>		<b>14</b>	
<b>6</b>		<b>15</b>	
<b>9</b>		<b>18</b>	

Tab. 8: Umístění brusné vrstvy na nosném tělese [19]

Označení	Tvar	Označení	Tvar
1	 NA VNĚJŠÍM OBVODU	6	 NA ČÁSTI VNĚJŠÍHO OBVODU
2	 NA ČELE	7	 NA ČÁSTI ČELNÍ PLOCHY
3	 NA OBOU ČELECH	8	 MONOLITNÍ BRUSNÁ VRSTVA
4	 NA VNITŘNÍ KUŽELOVÉ PLOŠE	9	 NA VNĚJŠÍM ROHU
5	 NA VNĚJŠÍ KUŽELOVÉ PLOŠE	10	 NA VNITŘNÍM OBVODU

Tab. 9: Vybrané základní profily brusných vrstev [19]

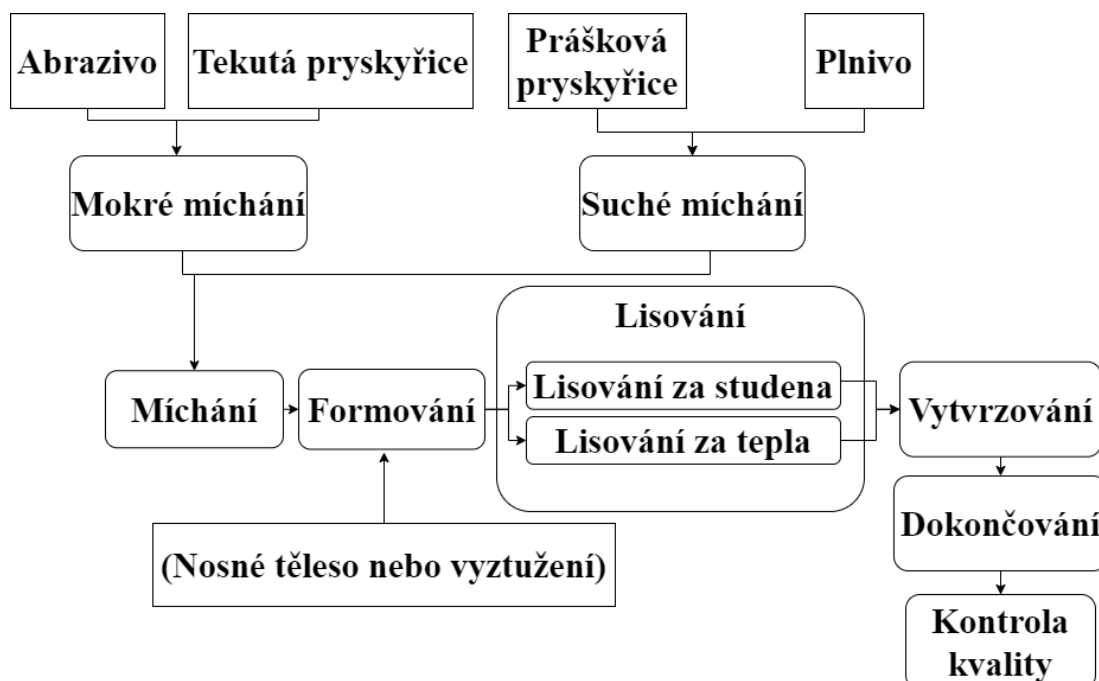
Označení	Tvar	Označení	Tvar
A		K	
B		S	
E		V	

## 4 Výroba brousicích nástrojů ze supertvrdých materiálů

### 4.1 Nástroje s pryskyřičným pojivem

Pryskyřičná pojiva mají vysokou elasticitu. Proto se volí pro brousicí kotouče, které jsou vystavovány vysokým řezným rychlostem, nárazům a bočnímu nebo náhlému zatížení. Nástroje se používají především pro řezání a hrubovací operace. Dobře též fungují pro dokončovací procesy k dosažení vysoké kvality povrchu. Elasticita pojiva ovšem může mít negativní vliv na přesnost broušení. Pryskyřičná pojiva nejsou příliš odolná vůči teplotě. K degradaci pojiva dochází při teplotách vyšších než 200 °C. K odvodu tepla vznikajícího při broušení se používají různé povlaky. [20]

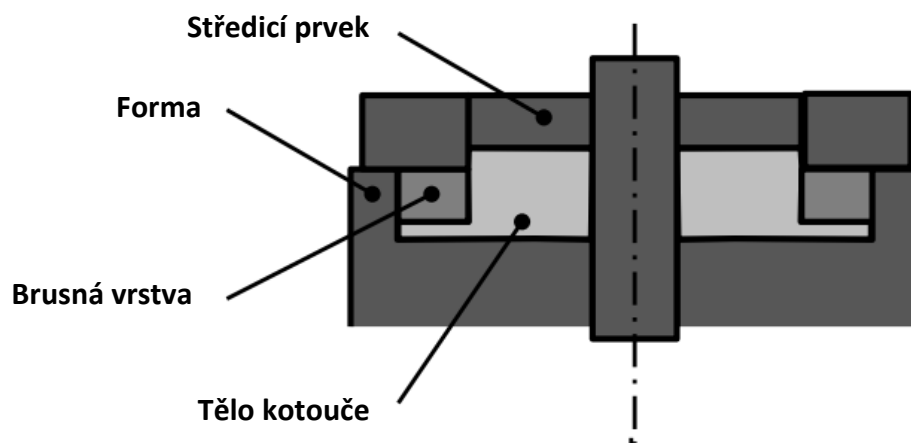
Proces výroby nástrojů s pryskyřičným pojivem se skládá z míchání, lisování a vytvrzování při teplotách do 200 °C (obr. 7). [20]



Obr. 7: Výrobní proces nástrojů s pryskyřičnou vazbou [20]



Při mokrém míchání jsou brusná zrna potažena tekutou pryskyřicí tak, aby na nich dobře drželo plnivo a prášková pryskyřice. Plnivo zlepšuje vlastnosti pojiva, urychluje dobu vytvrzování a zajišťuje pórovitost brusné vrstvy. Pryskyřice na bázi fenolu se míchá ve formě prášku s plnivem za sucha, než dojde ke smísení s mokrou směsí. Přidávají se příměsi pro zlepšení licích vlastností. Poté se směs lije do forem a lisuje pomocí hydraulických lisů na tělo kotouče (obr. 8). Lisování může probíhat za tepla nebo za studena. Následně se provede vytvrzení pryskyřičného pojiva, které se odehrává v pecích, nebo přímo na lisu vybaveného topnou deskou. Kotouče s pryskyřičným pojivem se snadno tvarují, ale následně je potřeba kotouče naostřit, jelikož po tvarování nejsou zrna dostatečně vystouplá z povrchu. [20]



Obr. 8: Lisování kotoučů s pryskyřičným pojivem [20]

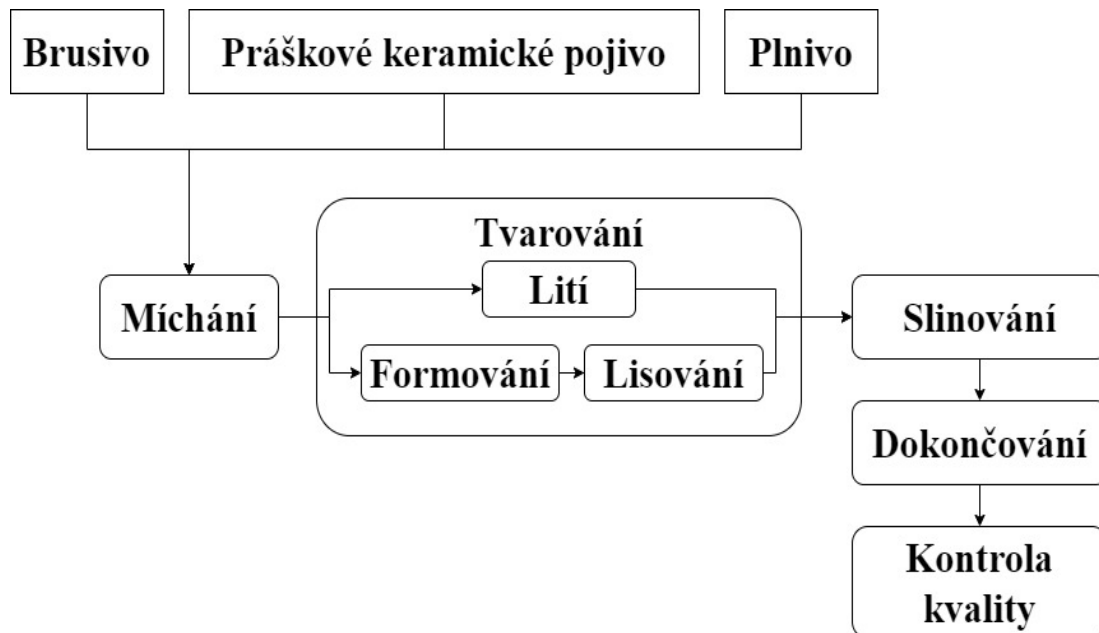
## 4.2 Nástroje s keramickým pojivem

Keramická pojiva se vyznačují vysokou tepelnou stabilitou. Kotouče s tímto pojivem je snadné tvarovat a ostřit, ale pojivo často chemicky reaguje s povrchem zrn.

Keramické pojivo bývá složeno z křemičitanů, živců, frit a kaolinu. Frita je pojem pro skleněný materiál získaný smícháním různých minerálů a oxidů, jejich tavením, prudkým ochlazením a následným rozmělněním. Pro výrobu kotoučů jsou frity běžně tvořeny křemičitany bóru. [20], [21]

Prvním krokem při výrobě kotoučů je smísení pojiva, brusiva, plniva a případně dalších příměsí. Během míchání je kontrolována homogenita materiálu z důvodu zajištění rovnoměrného rozložení řezných hran na výsledném nástroji. Poté se formy plní výslednou směsí. U jílovitých pojiv se plnění provádí litím, v ostatních případech je to pomocí formovacích procesů a následného zhutnění materiálu lisováním. Většina kotoučů je vyráběna právě druhým způsobem, jelikož licí procesy jsou nákladnější. [20], [21]

Meziprodukt je dále vysušen ve speciální sušicí nebo slinovací peci při teplotě do 600 °C. Během slinování dochází ke spékání práškových částic za vysokých teplot. Problém nastává při chladnutí, kdy dochází ke smršťování nástroje. Proto musí být proces ochlazování velmi pomalý, aby se zabránilo tepelnému namáhání, prnutí a praskání nástrojů. V posledním kroku výroby se kotouč obrobí do požadovaného tvaru a provede se kontrola kvality. Keramické pojivo má oproti kovovému nebo pryskyřičnému větší množství pórů, nemusí se tedy tak často orovnávat. [20], [21]



Obr. 9: Výrobní proces nástrojů s keramickou vazbou [20]

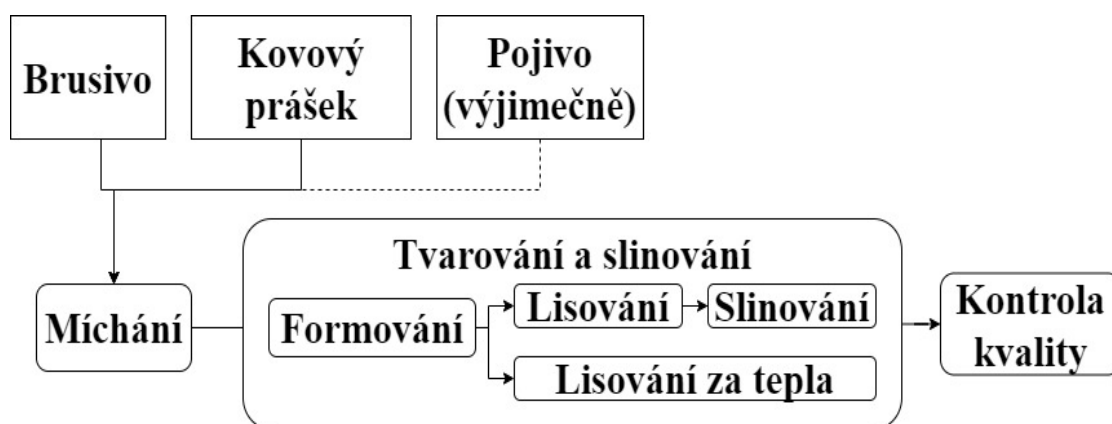
### 4.3 Nástroje s kovovým pojivem

Kovové vazby brousicích nástrojů mohou být jednovrstvé nebo vícevrstvé. Jednovrstvé niklové povlaky se vyrábějí galvanickým pokovením, nebo tvrdým pájením. Slinuté vícevrstvé kovové vazby bývají nejčastěji tvořeny cínovými bronzami, kobaltovými bronzami, karbidy wolframu, nebo slitinami železa, mědi, cínu.

U konvenčních brousicích materiálů se kovové pojivo nepoužívá z důvodu rychlého opotřebovávání zrn. Jelikož kovová pojiva mají nízkou pórovitost, přidávají se do nich plniva, která zajišťují mazání během broušení. Zrna jsou velmi pevně držena v pojivu a opotřebení kotouče při broušení je velmi malé. Mechanické tvarování a orovnávání brusné vrstvy je obtížné. Proto se pro obnovení řezných vlastností používají výhradně elektrofyzikální a elektrochemické procesy. [20]

Proces výroby kotoučů s pojivy z bronzu nebo jiných slitin se provádí následujícím způsobem. Prvně se naplní forma směsí kovového prášku a brusných zrn. Poté je směs lisována buďto za tepla, při kterém dojde za zvýšené teploty ke slinutí materiálu a spojení s tělesem kotouče, nebo za studena, kdy je nutné následné slinutí v tavicí peci. Teplota slinování bronzových pojiv je 500-700 °C. [20], [22]

V některých případech se přidávají organická pojiva, která během slinování vyhoří, a vytvoří tak pórovitější strukturu. [20]



Obr. 10: Výroba nástrojů se slinutými kovovými pojivy [20]

Galvanické pokovování se provádí vložením těla kotouče pokrytého brusivem do elektrolytické lázně tvořené vodním roztokem kovových solí, které bývají na bázi zlata, stříbra, mědi, kobaltu, nebo niklu. Katodou (záporná elektroda) je většinou kovové tělo kotouče a anodou (kladná elektroda) je pojivový materiál v podobě tyčí. Průchodem stejnosměrného elektrického proudu se poté tvoří kovový povlak na povrchu kotouče, který v sobě drží brusná zrna. [20]

Tvrdým pájením lze dosahovat tenčích vrstev kovového pojiva než u galvanického pokovování. Důsledkem toho je větší odkrytí brusných zrn, které umožňuje větší úběr materiálu během broušení. Před samotným pájením je potřeba tělo kotouče očistit. Pájka je aplikována na těleso ve formě prášku. Následně probíhá pájení při teplotě až 1000 °C. Po ochlazení jsou brusná zrna pevně spojena vrstvou pájky s tělem kotouče. [20]

## 5 Orovnávání kotoučů z KNB a diamantu

Tvarování a ožívání brusných kotoučů je úzce spjato s operací zvanou orovnávaní. Během broušení dochází ke změnám tvaru, řezných vlastností a struktury pojiva kotouče vlivem opotřebení nebo zanesení jeho póru. Tyto změny mají následný vliv na brusné síly, geometrickou přesnost obrobku a jeho kvalitu povrchu. Proto je nutné kotouče ožívovat a orovnávat z důvodu zachování jeho produktivity a prodloužení životnosti. [23]

Orovnávání se využívá nejen při obnově tvarové geometrie, nebo specifickém požadavku na tvar brusné vrstvy, ale i pro ostření brusného kotouče. Ožívání se provádí za účelem obnovení broušících vlastností kotouče, které byly ztraceny vlivem zanesení zrn. Volba metody závisí především na použitém brusivu a pojivu. [23]

Oživení brusných kotoučů z KNB nebo diamantu je možné třemi základními způsoby. První možností je přejíždění povrchu brusné vrstvy oživovacím kamenem s keramickým nebo pryžovým pojivem, který odebere zbytky broušeného materiálu a odkryje brusná zrna. [16], [23]

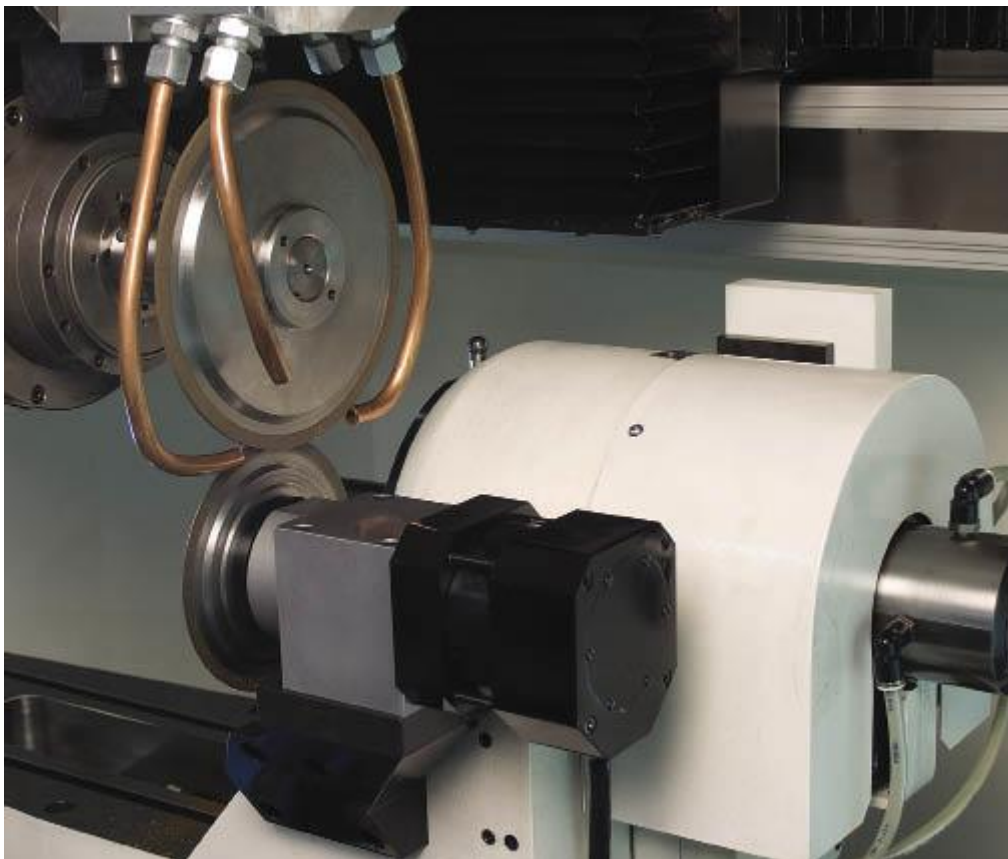
Dále lze kotouč oživit přisypáváním volného brusiva z karbidu křemíku mezi broušící vrstvou a kostku z měkké oceli nebo litiny během procesu jejího broušení. Broušící kotouč je současně orovnávan a ožíván v důsledku rychlejšího otěru pojivového materiálu. U čelních kotoučů lze oživení provést mimo stroj na skleněné podložce volným brusivem z karbidu křemíku. [23]

Poslední způsob je pomocí rotujícího kotouče z karbidu křemíku, ke kterému je postupně přibližován oživovaný kotouč. Následně se kotoučem přejíždí podél jeho povrchové vrstvy. Tímto způsobem se dosahuje nejlepších výsledků oživení. [23]

## 5.1 Konvenční metoda

Konvenční metoda zahrnuje mechanické použití nástrojů, které jsou po celou dobu orovnávaní v kontaktu s brusným kotoučem. Může se provádět manuálně, poloautomaticky i plně automaticky. Obecně lze říci, že se stále jedná o nejpoužívanější způsob orovnávaní z důvodu jeho univerzálnosti, dostupnosti a finanční nenáročnosti v porovnání s ostatními metodami.

Dnes se pro přesné orovnávaní používají CNC brusky a speciální orovnávací stroje. Veškeré pohyby stroje jsou zprostředkovány pomocí počítačem řízených a regulovaných pohonů, díky kterým lze dosahovat přesných výsledků. Požadovaného profilu je poté dosaženo orovnávacím nástrojem, který je veden pomocí programu řídicího systému stroje. [24]



*Obr. 11: CNC bruska vybavená orovnávacím zařízením [25]*

Pro dosažení požadovaného tvaru a řezných vlastností běžných kotoučů se využívají jednokrystalové nebo vícezrnné diamantové orovnávače. Pro sériovou výrobu se však v posledních letech používají především rotační profilové diamantové kladky. [24]

Tvar kladek je tvořen základními křivkami a jejich povrch je osazen velkým počtem diamantových zrn v kovovém pojivu, který zajišťuje mnohonásobně delší životnost oproti statickým orovnávačům. Požadovaný profil na kotouči poté vzniká metodou zápichu. Díky tomu kladky dosahují největších přesností a rychlostí orvnání. Proto jsou výhodné i z ekonomického hlediska. Nevýhodou ovšem je potřeba různých tvarů kladek pro různé profily kotoučů. [24]



*Obr. 12: Profilové diamantové kladky [26]*

V případě orvnání rovinných ploch se používají nástroje v podobě destiček, které jsou pokryty tyčinkami ze syntetického diamantu. Lze s nimi docílit srovnatelné kvality orvnání jako s nástroji s přírodním diamantem. Výhodou těchto destiček je ovšem možnost dosažení až stoprocentní opakovatelnosti po celou dobu jejich životnosti. [24]



Obr. 13: Diamantová ořnávací destička [28]

Kotouče z diamantu a kubického nitridu bóru se tvarují a oživují výhradně použitím kotoučů z karbidu křemíku, nebo korundu bez ohledu na typ pojiva. Výjimkou jsou kotouče s keramickým pojivem, které lze ořnávat i diamantovými nástroji v podobě profilových kladek. Následný tvar vznikne pohybem nástroje podél povrchu kotouče. Ořování se provádí na specializovaných strojích, ořnávacím zařízením umístěném přímo na brusce, nebo lze kotouč upnutím za trn ořnat pomocí hrotové brusky. [23], [29]

Pro kotouče s jednoduchými tvary a jakýmkoli typem pojiva se používají dobře cenově dostupná ořnávací zařízení používající kotouče z karbidu křemíku. Vyrábějí se ve dvou provedeních, a to s motorem poháněným ořnávacím kotoučem, nebo bez pohonu s odstředivým bržděním. Využívají se zejména pro ořování čelních a obvodových ploch brusných kotoučů. Při obvodovém ořování se zařízení umísťuje na stroj tak, že jsou osy vřeten ořnávacího a ořovaného kotouče vůči sobě rovnoběžné. V případě čelního ořování se umísťují kolmo na sebe. [37]

Během ořování se oba kotouče otáčejí ve stejném směru a po každém přejezdu by ořnávací kotouč měl vyjet mimo povrch druhého kotouče, jinak by mohlo docházet k jeho odlamování. [37]

Při běžném ořování se vhodná obvodová rychlost ořnávacího kotouče pohybuje v rozmezí 5-8 m/s, jelikož při nižších rychlostech dochází k jeho nadměrnému opotřebování. Oproti tomu vyšší rychlosti mají za následek nedostatečné opotřebování kotouče, které je podstatné pro efektivní ořování. Rychlost je na zařízení regulována pomocí brzdových čelistí. U zařízení bez pohonu je kotouč zpomalován odstředivou brzdou při překonání určité odstředivé síly. [37]



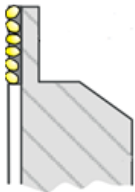
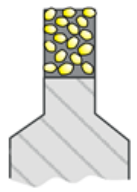
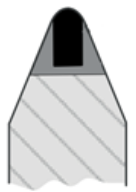



Obr. 14: Orovnávací zařízení s pohonem (vlevo) a s odstředivým bržděním (vpravo) [37]

Pro orovnávaní KNB a diamantových kotoučů s keramickým pojivem přímo na CNC bruskách nabízí společnost DR. KAISER DIAMANTWERKZEUGE GmbH & Co. KG řešení v podobě vřeten a rotačních orovnávačů různých tvarů dle požadavku (tab. 10).

Rotační orovnávače se vyrábějí slinováním nebo galvanickým pokovováním. Především jednovrstvé, galvanicky pokovené mají velmi přesný tvar, pomocí kterého lze orovnávat velmi složité profily. [26]

Tab. 10: Varianty rotačních diamantových orovnávačů [26]

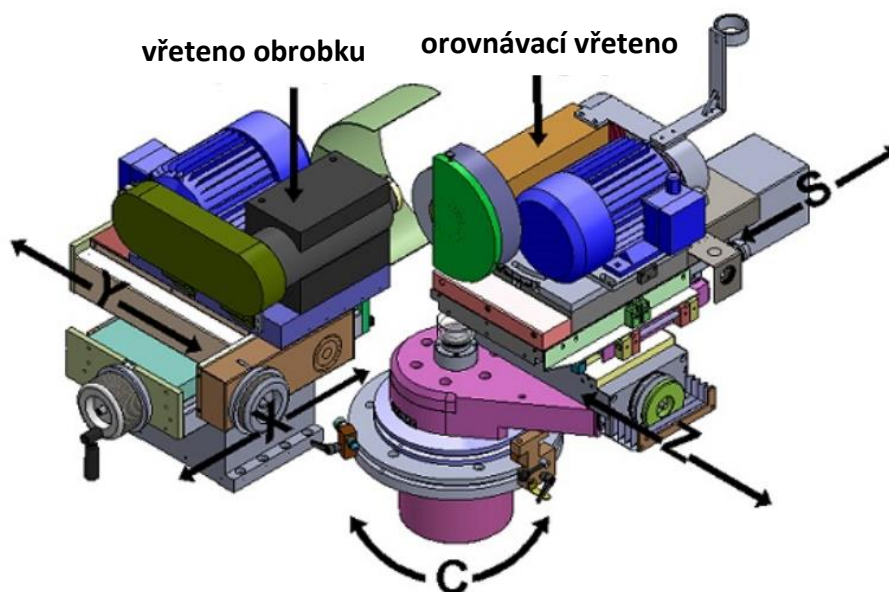
Ostření		Tvarování	
			
přírodní diamant niklové pojivo	přírodní diamant kovové nebo keramické pojivo	syntetický diamant wolframové pojivo	přírodní diamant wolframové pojivo

Při použití těchto vřeten je důležité vědět, kdy přijde rotační orovnávač do kontaktu s kotoučem, aby se zamezilo jeho nadměrnému zatěžování a zbytečným přejezdům, během kterých nedochází k orovnávaní. Za tímto účelem je možné vřeteno osadit akustickými senzory, které detekují kontakt kotoučů. Dále je možné osazení senzory monitorující rychlost otáčení nebo teplotu vřetene a ložisek. [27]



Obr. 15: Vřeteno pro rotační orovnávače [27]

Společnost Cleveland Lineartechnik GmbH nabízí speciální stroje, které k orovnávaní používají kotouče z karbidu křemíku. Jedním z nabízených orovnávacích strojů je model s označením GAPI-5, který disponuje pěti počítačem řízenými osami. Dráha nástroje je generována řídicím systémem, který umožňuje interpolaci jednotlivých os. Orvnávací kotouč, který se pohybuje kolmo k orovnávanému povrchu, osciluje podél této dráhy při zadané hloubce úběru. Tím je možné orovnávaní složitějších tvarů a dosažení přesných rozměrů. [36]



Obr. 16: Kinematické schéma orvnávacích strojů [39]

Výhodou stroje je především snadné programování, flexibilita a vysoká opakovatelnost kvality orvnání. Stroj umožňuje orvnávání i více kotoučů najednou a vykonává práci automaticky. Na počátku je nutné zadat přesné parametry pro pohyb a tvar orvnávacího nástroje. V případě potřeby je též možnost manuálního ovládání. [36]

Stroj je vybaven obrazovkou pro přesné sledování orvnávacího procesu, které je umožněno pomocí profilprojektoru nebo kamerového systému zobrazujícího prostor záběru brusných kotoučů. Odvod vznikajícího prachu je zprostředkován odsávacím zařízením umístěným přímo pod místem záběru. [36]

Přesnosti orvnání je dosaženo pomocí sto devadesáti stupňového úhlového rozsahu otočné osy a jemným rozlišením snímačů otáček motorů, které zajišťují přísuvné, oscilační a výklopné pohyby stroje. [36]

Na tomto stroji lze orvnávat jednotlivé kotouče až o průměru 400 mm nebo více kotoučů najednou o maximálních průměrech 150 mm. Otáčky lze u orvnávacího vřetena nastavovat v rozmezí 700-2500 ot/min a u vřetena s diamantovým/KNB kotoučem v rozmezí 500-1500 ot/min. [30]



Obr. 17: Orvnávací stroj GAPI-5 CNC od firmy Cleveland Lineartechnik GmbH [30]

V současné době je mnoho dalších společností, které vyrábějí zařízení s obdobným konstrukčním řešením. Orovnávání kotouči z karbidu křemíku nebo korundu je ovšem vlivem jejich rozměrů omezené především pro konkávní tvary. U konvexních profilů lze dosahovat vnějších zaoblení o nejmenším poloměru 0,05 mm, což uvádí například společnost Kirner Schleifmaschinen GmbH & Co. KG. u svého orovnávacího stroje K430 CNC. [38]

## 5.2 Elektroerozivní metoda

Elektroerozivní metody se používají pro brusné kotouče s kovovým pojivem. Jedná se o bezkontaktní proces orovnění, tudíž nevznikají žádné mechanické síly mezi elektrodou a kotoučem. Jako nástroj je zde použita měděná nebo mosazná elektroda, která zajišťuje tvarové orovnění a oživení kotouče. Kovový materiál je odebírán pomocí pulzů elektrického proudu o vysoké frekvenci, které umožňují odstranění velmi malých kovových částic. Nastavením frekvence lze měnit množství odebíraného materiálu. Během orovnávacího procesu je mezi elektrodou a kotouč přiváděna nevodivá kapalina sloužící k odvodu roztaveného pojiva. [31]

Použitá elektroda může mít specifický tvar (tvarová elektroda) nebo je v podobě drátu. V případě tvarové elektrody je její profil přenášen na kotouč, což ovšem není příliš efektivní z pohledu flexibility procesu. [31]

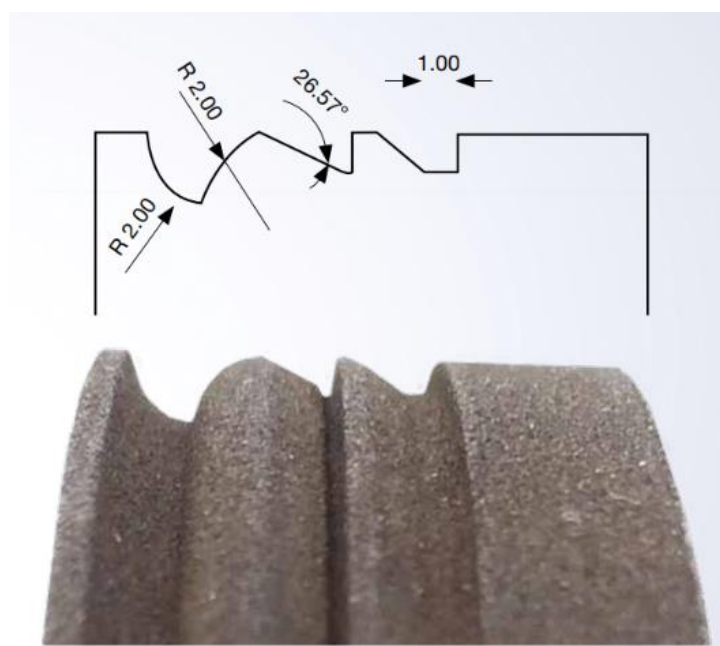
Výhodnějším řešením je drátová elektroda, která nepotřebuje mít speciální tvar. Drát je navíjen do cívek a je postupně podáván do kotouče s drážkou sloužící k jeho vedení. Posuv drátu podél povrchu kotouče způsobuje odstranění pojiva a vzniku požadovaného profilu. Společnosti nabízející zařízení pro elektroerozivní orovnění jsou například Fritz Studer AG nebo Mitsubishi Electric. [31]



Obr. 18: Elektroerozivní drátové orovnávací zařízení od firmy Mitsubishi Electric [32]

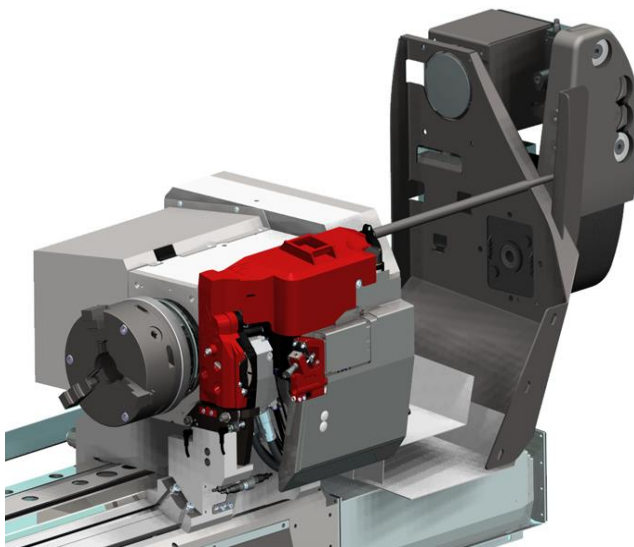
Společnost Mitsubishi Electric nabízí elektroerozivní drátové orovnávací stroje především pro sériové výroby. A to v podobě buďto pro automatizované orovnávání jednotlivých kotoučů nebo sad více kotoučů. Další možností je plně automatizovaný stroj s robotickým ramenem a zásobníkem na kotouče, kdy orovnávání probíhá bez nutnosti zásahu operátora. Robotické rameno si tak samo odebírá kotouče ze zásobníku a provede výměnu. Poslední možností, kterou společnost nabízí je využití stroje v plně automatizovaných linkách. [32]

Pomocí elektroerozivního drátového orovnávání lze realizovat složité a komplexní tvary brusných kotoučů. Společnost Mitsubishi Electric uvádí možného dosažení vnitřních zaoblení o poloměru 0,05 mm. Poloměry vnějších zaoblení jsou limitovány pouze velikostí použitého brusného zrna. [32]

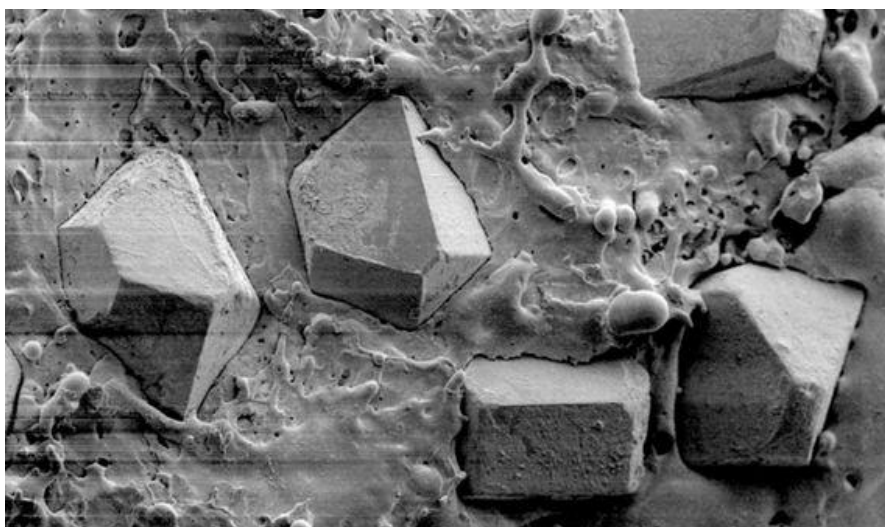


Obr. 19: Ukázka možného komplexního tvaru kotouče [32]

Firma Fritz Studer AG přišla se zařízením WireDress, které je implementováno do CNC brusek a umožňuje orovnávaní přímo na stroji během procesu broušení, a to dokonce při maximální obvodové rychlosti kotouče. Výhodou je přesné orovnávaní a velká úspora času. Výrobce uvádí možné dosažení vnitřního poloměru 0,2 mm a vnějšího 0,05 mm. [33]



*Obr. 20: Implementace elektroerozivního zařízení WireDress na brusce [33]*



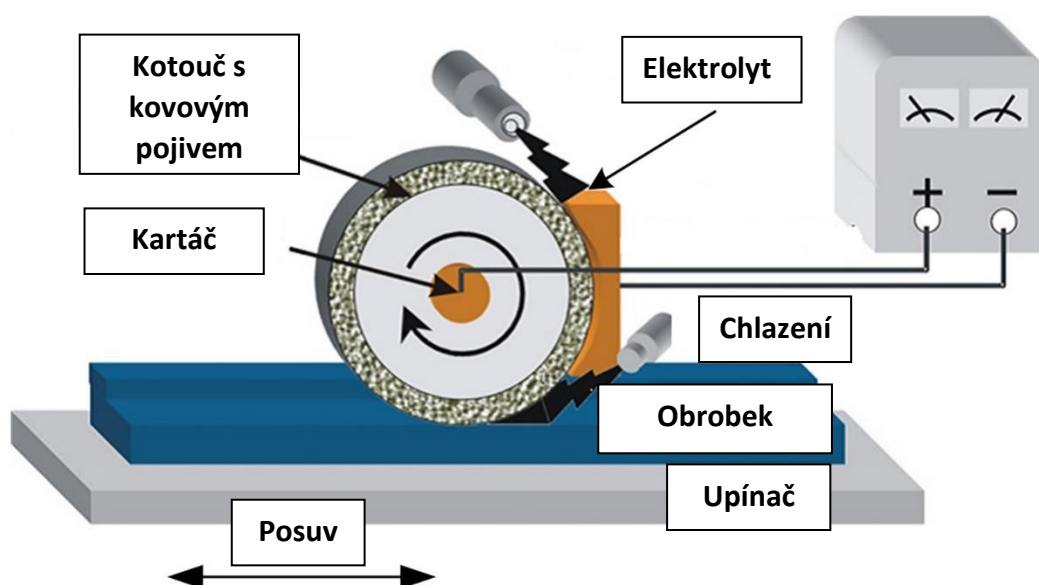
*Obr. 21: Mikroskopický snímek povrchu kotouče po orovnávaní [33]*



## 5.3 Elektrolytická metoda

Metoda je založena na principu elektrochemických procesů. Využívá se při velmi přesném obrábění tvrdých a křehkých materiálů, jako jsou například keramika a slitiny. Orovňávání brousicího kotouče s kovovým pojivem probíhá přímo na bruskách během broušení materiálu. Zatímco je jedna strana kotouče využita k broušení, druhá je orovňována. Stejně jako u klasické elektrolýzy se i zde používá stejnosměrný proud, přičemž je kotouč zapojen na kladný pól zdroje a elektroda na záporný. Elektrolyt v podobě roztoku je vháněn mezi kotouč a elektrodu, a tím je umožněno průchodu proudu. Příkladem použití této metody je elektrolytické broušení zrcadel. [31], [34]

Proces se skládá ze dvou kroků. V prvním kroku dochází k elektrolytickému odstranění části pojiva a většímu odhalení zrn. Následně se na povrchu tvoří oxidová vrstva, která se postupně zvětšuje a zabraňuje dalšímu průchodu proudu. Následkem toho se pojivo přestane odebírat a zastaví se elektrochemický proces. V dalším kroku je zahrnuto broušení, při kterém se oxidová vrstva vlivem tření opotřebí a celý proces se opakuje. Takto zůstává kotouč stále ostrý. [31]



Obr. 22: Princip elektrolytického orovnění [35]

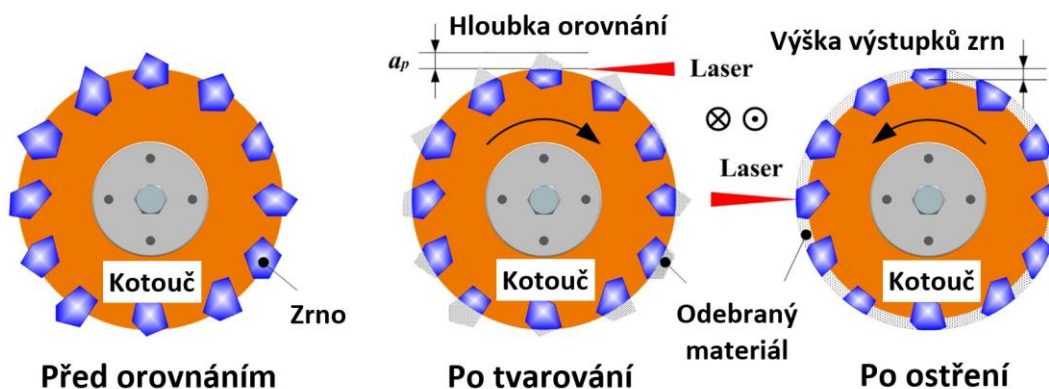


## 5.4 Laserová metoda

Tento postup využívá k tvarování a orovnávaní kotoučů laserový paprsek o vysokém výkonu. Principem metody je tavení a odpařování kovového pojiva. Odvedení roztaveného pojiva z povrchu kotouče je zprostředkováno pomocí proudu vzduchu přiváděného tryskou, který též slouží k ochraně zrn a pojiva proti tepelnému poškození. [31]

Z hlediska místa působení paprsku vůči kotouči se způsob rozlišuje na tangenciální a radiální. Při tangenciálním dopadání paprsku a jeho současném pohybu v axiálním směru kotouče dochází k odstranění zrn společně s pojivem a je tak dosaženo požadovaného profilu. Výška výstupků zrn se však nezvyšuje, naopak dochází k jejímu snížení. Z tohoto důvodu lze tangenciálním paprskem kotouče pouze profilovat. [35]

Při radiálním dopadu paprsku a jeho současném pohybu ve směru osy kotouče se odstraňuje pouze pojivo bez brusných zrn. Tím dochází k odkrytí zrn a následnému ostření kotouče. [35]



Obr. 23: Orvnávání kotoučů pomocí laseru [32]

Výkon a délka pulzů laseru má zásadní vliv na výslednou kvalitu orvnání. Vysokým výkonem laseru lze dosáhnout většího úběru materiálu, ale na druhou stranu může docházet k poškození zrn a ztrátě jejich tvrdosti. Tato metoda se ovšem v běžné průmyslové praxi k orvnávání kotoučů nepoužívá, jelikož je stále ve fázi výzkumu a vývoje. [35]

## 5.5 Porovnání metod

Konvenčním způsobem lze ohrnovávat kotouče bez ohledu na materiál jejich pojiva a je efektivní především při ohrnovávání kotoučů s keramickým pojivem. V případě elektroerozivní a elektrolytické metody musí být pojivo z elektricky vodivého materiálu.

Konvenční způsob ohrnovávání je umožněn v podobě vřetena s ohrnovacím kotoučem přímo na brusce, ale většinou se provádí samostatně na ohrnovacím stroji, což je časově náročné. Oproti tomu elektroerozivní a elektrolytická ohrnovací zařízení lze implementovat na brusku, kdy je možné následné ohrnovávání složitých tvarů během procesu broušení.

Při konvekčním způsobu dochází k mechanickému kontaktu kotouče s ohrnovacím nástrojem a tím k velkému a nestejnomyernému opotřebení ohrnovacího kotouče, což má za následek menší přesnost ohrnování. Elektroerozivní a elektrolytická metoda je bezkontaktní a mechanické síly nevznikají, tudíž lze dosahovat větší přesnosti a kvality ohrnování.

Pro správnou funkci elektroerozivní a elektrolytické metody je potřeba stálého přívodu kapalin. Při konvenčním způsobu ohrnovávání není kapalina vysloveně potřeba, ale je vhodné její využití z důvodu odvodu vznikajícího tepla třením.

Konvenční metoda ohrnovávání je z hlediska finanční náročnosti méně nákladná než metoda elektroerozivní a elektrolytická. Využívají se buďto nástroje z běžně dostupných brousicích materiálů, nebo diamantové nástroje, které mají dlouhou životnost.

Elektrolytická metoda je v mnoha ohledech tedy stejná, jako elektroerozivní, ale používá se pouze ve specifických aplikacích vyžadujících vysokou kvalitu povrchu.

Laserovou metodou lze na základě dostupných studií dosahovat nejvyšších přesností a efektivity, ale z finančního hlediska je v porovnání s ostatními metodami nákladná. V současné době je ovšem stále ve fázi vývoje a výzkumů.

## 6 Závěr

Tématem této rešeršní bakalářské práce bylo zmapování problematiky týkající se tvarového orovnávaní a ostření brusných kotoučů z nejtvrděších materiálů, kterými jsou kubický nitrid bóru a diamant.

V úvodní části práce jsem se věnoval materiálům používaných k výrobě brousicích nástrojů. Větší pozornost je věnována právě diamantu a kubickému nitridu bóru, jelikož jejich fyzikální a chemické vlastnosti mají zásadní vliv na použití z nich vyrobených nástrojů. Předními vlastnostmi těchto materiálů jsou tvrdost, vysoká tepelná odolnost, tepelná stabilita a otěruvzdornost. Z tohoto důvodu jsou používány pro velmi náročné a specifické aplikace napříč průmyslovým spektrem. Tyto materiály jsou vzájemně nezastupitelné zejména kvůli reaktivitě diamantu s železem. Dále jsou popsány brousicí nástroje a jejich charakteristické vlastnosti, kterými jsou pojiva, sloh, tvrdost zrnitost a koncentrace. Též je zmíněno označování kotoučů a jejich základní tvary.

V druhé polovině práce jsou popsány jednotlivé výrobní metody nástrojů ze supertvrдых materiálů v závislosti na použitém druhu pojiva. Následně jsem se věnoval jednotlivým možnostem a postupům orovnávaní brusných kotoučů z kubického nitridu bóru a diamantu. V současné době jsou mechanické a elektroerozivní metody nejpoužívanější z důvodu jejich nákladů a flexibility. Též jsou uvedeny příklady moderních technologií pro tyto účely. Zároveň jsem provedl porovnání těchto metod. Došel jsem k závěru, že pro tvarově složité kotouče s kovovým pojivem je vhodnější metoda elektroerozivní. Pro kotouče s pryskyřičným a keramickým pojivem tato metoda použít nelze, a proto se používá konvenčních metod.

V současné době jsou prováděny výzkumy pro elektrolytickou a laserovou metodu. Je snaha o různou kombinaci jednotlivých metod, která by do budoucna vedla k ještě přesnějším výsledkům, menšímu opotřebování nástrojů, časové a finanční úspoře.

## 7 Seznam použité literatury a zdrojů

- [1] ROWE, W. B. *Principles of modern grinding technology*. Second edition. Amsterdam: William Andrew, 2014. ISBN 03-232-4271-5.
- [2] HOLEŠOVSKÝ, František. *Progres technologie II (Přednáška III)* [online]. Praha: ČVUT v Praze, 2014 [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <http://utopm.fsid.cvut.cz/podklady/STO/Progres%20Technologie%20II.ppt>
- [3] *What are Diamond/CBN wheels (super abrasive wheels)?* [online]. A.L.M.T. Corp. [cit.2020-04-27]. Dostupné z: [https://www.allied-material.co.jp/en/products/diamond/knowledge/about\\_diamond\\_cbn-wheel.html](https://www.allied-material.co.jp/en/products/diamond/knowledge/about_diamond_cbn-wheel.html)
- [4] MASLOV, Jevgenij Nikiforovič. *Teorie broušení kovů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1979, 246 s.
- [5] ŠTAJNOCHR, Lubomír. *Broušení nástrojů*. Praha: Grada Publishing, spol. s.r.o., 2000. Profi & hobby. ISBN 80-7169-809-1.
- [6] *Přírodní brusiva* [online]. Bevedo.cz, © 2016 [cit. 2020-04-27]. Dostupné z: <https://www.bevedo.cz/napoveda/clanky/prirodni-brusiva/>
- [7] HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. 1.vyd. Praha: MM Publishing, s.r.o., 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [8] KOUŘIL, Karel., VANĚK, Vladimír. *Vystružovací nástroje s břity z CBN. MM Průmyslové spektrum* [online]. 2007,12,49. [cit. 2020-05-04]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vystruzovaci-nastroje-s-brity-z-cbn.html>
- [9] *Brousící nástroje: Pojiva. ELUC: Strojírenství* [online]. [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://eluc.krolomoucky.cz/verejne/lekce/1253>
- [10] *Brousící nástroje: Charakteristika brousících nástrojů. ELUC: Strojírenství* [online]. [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1251>
- [11] *Brousící nástroje: Tvrdost brusných kotoučů. ELUC: Strojírenství* [online]. [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1255>
- [12] *Brousící nástroje: Zrnitost. ELUC: Strojírenství* [online]. [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1254>
- [13] *Základní rozdělení brusných keramických kotoučů a použití*. [online]. TumliKOVO, © 2010 [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/zakladni-rozdeleni-brusnych-kotoucu-k-ostreni-nastroju/>

- [14] *Zrnitost, pojiva, koncentrace, rychlost* [online]. Dia-Praha s.r.o, © 2014 [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: <http://www.diapraha.cz/zrnitost-pojiva-koncentrace-rychlost>
- [15] PFERD [online]. *Diamantové a CBN nástroje*. ©2019 [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: <https://www.abefekt.cz/wp-content/uploads/2019/05/05-catalogue-5-tm23-150dpi-cs.pdf>
- [16] Urdiamant, s.r.o. [online]. *Broušící kotouče z diamantu a kubického nitridu boru*. © 2012. [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: [https://www.urdiamant.cz/wp-content/uploads/Katalogy\\_a\\_kat\\_listy/Brouseni/Urdiamant\\_Grindin\\_Wheels\\_2012.pdf](https://www.urdiamant.cz/wp-content/uploads/Katalogy_a_kat_listy/Brouseni/Urdiamant_Grindin_Wheels_2012.pdf)
- [17] Zrnitost diamantového a CBN prášku. In: *Syntetické diamantové a CBN prášky* [online]. Best - Business,a.s., ©2020. [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: [http://www.bestb.cz/bm\\_diamant\\_cbn.php](http://www.bestb.cz/bm_diamant_cbn.php)
- [18] *Koncentrace brusiva* [online]. DIAMA CZ s.r.o., ©2005 [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: [http://www.diama.cz/koncentrace\\_brusiva.html](http://www.diama.cz/koncentrace_brusiva.html)
- [19] DIAMOND CONTACT, s.r.o. [online]. *Broušící kotouče z diamantu a CBN*. ©2017. [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: <http://www.diamondcontact.cz/Katalogy/Kat-DC-A-CZ-2018-v6-Web.pdf>
- [20] LINKE, Barbara. *Manufacturing and sustainability of bonding systems for grinding tools. Production Engineering* [online]. 2016, 10(3), 265-276 [cit. 2020-05-18]. DOI: 10.1007/s11740-016-0668-5. ISSN 0944-6524. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11740-016-0668-5>
- [21] BIANCHI, Eduardo Carlos, Paulo Roberto de AGUIAR, Rodrigo Daun MONICI, Luiz DARÉ NETO a Leonardo Roberto da SILVA. *Materials Research* [online]. 2003, 6(2), 239-246 [cit. 2020-05-18]. DOI: 10.1590/S1516-14392003000200020. ISSN 1516-1439. Dostupné z: [https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1516-14392003000200020](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392003000200020)
- [22] *What are Metal Bond Grinding Wheels and What Benefits Do They Offer?* [online]. Continental Diamond Tool Corporation, ©2019 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://www.cdtusa.net/blog/metal-bond-grinding-wheel-benefits>
- [23] Broušící kotouče ze supertvrdých řezných materiálů. *MM Průmyslové spektrum*. [online].2001,7,40. [cit. 2020-05-28]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/brousici-kotouce-ze-supertvrдых-reznych-materialu.html>
- [24] *Aktuální trendy přesného tvarového broušení a orovňávání*. [online]. INFOCUBE s.r.o., © 2019 [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: <https://infocube.cz/cs/aktualni-trendy-presneho-tvaroveho-brouseni-a-orovnavani/>

- [25] GAINNEY, Mike. Sharp Dresser. In: *Cutting Tool Engineering* [online]. CTE Publications Inc, 2009 [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <https://www.ctemag.com/news/articles/sharp-dresser>
- [26] DR. KAISER DIAMANTWERKZEUGE GmbH & Co. KG [online]. *Dressing of Grinding Wheels*. ©2012. [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: [https://www.drkaiser.com/fileadmin/user\\_upload/drkaiser\\_de/documents/EN/DR-KAISER-Dressing-of-Grinding-Wheels.pdf](https://www.drkaiser.com/fileadmin/user_upload/drkaiser_de/documents/EN/DR-KAISER-Dressing-of-Grinding-Wheels.pdf)
- [27] DR. KAISER DIAMANTWERKZEUGE GmbH & Co. KG [online]. *Dressing Spindle Systems*. ©2012. [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: [https://www.drkaiser.com/fileadmin/user\\_upload/drkaiser\\_de/documents/EN/DR-KAISER-Dressing-Spindle-Systems.pdf](https://www.drkaiser.com/fileadmin/user_upload/drkaiser_de/documents/EN/DR-KAISER-Dressing-Spindle-Systems.pdf)
- [28] DIA-Praha s.r.o [online]. *Diamantové nástroje a brusivo*. ©2016. [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: [http://www.diapraha.cz/uploads/assets/katalogy/dia-praha\\_katalog\\_web.pdf](http://www.diapraha.cz/uploads/assets/katalogy/dia-praha_katalog_web.pdf)
- [29] *Opravy kotoučů (renovace, tvarování)*. [online]. Dia-Praha, © 2014 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <http://www.diapraha.cz/opravy-kotoucu-renovace-tvarovani>
- [30] Cleveland Lineartechnik GmbH [online]. *GAPU 5/6/CNC*. ©2012 [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: [https://www.cleveland.de/files/cto\\_layout/img/PDF\\_Downloads/2019/Cleveland-Prospekt-Gapu-Gesamt.pdf](https://www.cleveland.de/files/cto_layout/img/PDF_Downloads/2019/Cleveland-Prospekt-Gapu-Gesamt.pdf)
- [31] SRIVASTAVA, UJJAWAL MAYANK. Review of dressing and truing operations for grinding wheels. *International Journal of Engineering Science and Technology* [online] 2013, 5.1, 8-19 [cit. 2020-07-05]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/40ab/e1d9b863708127cb7b7028916a7a9e53a64e.pdf>
- [32] Mitsubishi Electric Europe B.V. [online]. *Wire EDM dressing of CBN and diamond grinding wheels*. © 2019 [cit. 2020-07-08]. Dostupné z: <https://www.mitsubishi-edm.de/en/edm-dress-functions.html#abrichtwerkzeug>
- [33] *STUDER WireDress®* [online]. Fritz Studer AG, © 2019 [cit. 2020-07-10]. Dostupné z: <https://www.studer.com/en/cylindrical-grinding-machines/software-options/wiredressr/>
- [34] *What is Electrolytic In-process Dressing (ELID) Mirror-Surface Grinding?* [online]. J-ELID, ©2019 [cit. 2020-07-10]. Dostupné z: [http://www.shg.ne.jp/archive/index\\_e.htm](http://www.shg.ne.jp/archive/index_e.htm)

- [35] DENG, Hui a Zhou XU. Dressing methods of superabrasive grinding wheels: A review. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2019, 45, 46-69 [cit. 2020-07-15]. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.06.020. ISSN 15266125. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612519301835>
- [36] Flexibilní a přesné orovnávaní brusných kotoučů pomocí CNC řízení. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2005, 10, 42 [cit. 2020-07-21]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/flexibilni-a-presne-orovnavani-brusnych-kotoucu-pomoci-cnc-rizeni.html>
- [37] *DRESSING OF GRINDING WHEELS* [online]. Ilyich Abrasive Company, ©2014. [cit. 2020-07-21]. Dostupné z: <https://cbnwheels.net/reference-Information/dressing-of-grinding-wheels/>
- [38] Kirner Schleifmaschinen GmbH & Co. KG. [online] *K430 CNC*. ©2014. [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: [https://www.kirner-schleifmaschinen.de/wp-content/uploads/2018/08/K430CNC\\_Projekt\\_DinA4\\_E-2.pdf](https://www.kirner-schleifmaschinen.de/wp-content/uploads/2018/08/K430CNC_Projekt_DinA4_E-2.pdf)
- [39] *FC-700(W/EX)* [online]. FARMAN MACHINERY INDUSTRIAL CO., LTD., ©2017. [cit. 2020-07-28]. Dostupné z: [http://www.farman.com.tw/products.php?func=p\\_detail&p\\_id=5&pc\\_parent=2](http://www.farman.com.tw/products.php?func=p_detail&p_id=5&pc_parent=2)

## 8 Seznam obrázků

Obr. 1: Porovnání tvrdosti brusiva [3].....	9
Obr. 2: Porovnání tepelné vodivosti brusiva [2] .....	10
Obr. 3: Závislost koeficientu tření na druhu zrna a rychlosti kotouče [2].....	11
Obr. 4: Tvar krystalů přírodního diamantu [4] .....	12
Obr. 5: Přeměna hexagonální krystalické mřížky nitridu bóru na kubickou [7].....	13
Obr. 6: Příklad značení brousících kotoučů URDIAMANT [16].....	20
Obr. 7: Výrobní proces nástrojů s pryskyřičnou vazbou [20] .....	23
Obr. 8: Lisování kotoučů s pryskyřičným pojivem [20] .....	24
Obr. 9: Výrobní proces nástrojů s keramickou vazbou [20].....	25
Obr. 10: Výroba nástrojů se slinutými kovovými pojivy [20] .....	26
Obr. 11: CNC bruska vybavená orovnávacím zařízením [25] .....	29
Obr. 12: Profilové diamantové kladky [26] .....	30
Obr. 13: Diamantová orovnávací destička [28].....	31
Obr. 14: Orovnávací zařízení s pohonem (vlevo) a s odstředivým bržděním (vpravo) [37]...	32
Obr. 15: Vřeteno pro rotační orovnávače [27] .....	33
Obr. 16: Kinematické schéma orovnávacích strojů [39] .....	33
Obr. 17: Orovnávací stroj GAPI-5 CNC od firmy Cleveland Lineartechnik GmbH [30] .....	34
Obr. 18: Elektroerozivní drátové orovnávací zařízení od firmy Mitsubishi Electric [32] .....	36
Obr. 19: Ukázka možného komplexního tvaru kotouče [32] .....	37
Obr. 20: Implementace elektroerozivního zařízení WireDress na brusce [33].....	38
Obr. 21: Mikroskopický snímek povrchu kotouče po orovnání [33].....	38
Obr. 22: Princip elektrolytického orovnání [35].....	39
Obr. 23: Orovnávání kotoučů pomocí laseru [32].....	40



## 9 Seznam tabulek

Tab. 1: Druhy pojiv brousicích nástrojů [13] .....	15
Tab. 2: Označování slohu brousicích nástrojů [5] .....	17
Tab. 3: Tvrdost brousicích nástrojů [5] .....	18
Tab. 4: Vliv zrnitosti diamantu a KNB na drsnost povrchu [16] .....	18
Tab. 5: Převodní tabulka norem [17] .....	19
Tab. 6: Vlastnosti a využití koncentrací [18] .....	20
Tab. 7: Vybrané základní tvary nosného tělesa [19] .....	21
Tab. 8: Umístění brusné vrstvy na nosném tělese [19].....	22
Tab. 9: Vybrané základní profily brusných vrstev [19] .....	22
Tab. 10: Varianty rotačních diamantových orovnávačů [26] .....	32