

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2023

**ROMAN
DUŠEK**



ČVUT
ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

**ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A
METROLOGIE**

Nové broušící materiály

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

AUTOR: Roman Dušek

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Libor Beránek, Ph.D.

STUDIJNÍ PROGRAM: B 2343 Výroba a ekonomika ve strojírenství

STUDIJNÍ OBOR: 2303R014 Technologie, materiály a ekonomika strojírenství

Praha 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Dušek** Jméno: **Roman** Osobní číslo: **495809**
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 brousicí materiály

Název bakalářské práce anglicky:

New grinding tool materials

Pokyny pro vypracování:

Základní metody broušení.
Materiály využívané pro technologii broušení.
Opatření a ostření kotouče.
Ekonomický rozbor využití klasických a moderních nástrojových materiálů.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Libor Beránek, Ph.D. ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **03.04.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

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

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
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

Tímto prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Libora Beránka Ph.D., a to pouze pomocí podkladů uvedených v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne:

.....

Podpis autora

Poděkování

Tímto děkuji vedoucímu mé bakalářské práce, Ing. Liboru Beránkovi, Ph.D., za pomoc, cenné rady, konzultace a vstřícnost v průběhu tvorby bakalářské práce. Dále děkuji Bc. Radovanu Simandlovi za spolupráci a konzultace v rámci vypracování praktické části v podniku Mahr, spol. s r.o.

Anotace

Tato bakalářská práce se v první části zabývá prvky charakterizující systém broušení a broušícími materiály, především těmi novými. Dále se práce zabývá integritou povrchu, principy opotřebení broušících kotoučů a řeznými kapalinami.

Druhá část práce je prováděna v podniku Mahr, spol. s r.o. a je zaměřená na zavedení nových broušících kotoučů využívajících materiál Cubitron II při výrobě vodících pouzder a porovnání změn ve výrobním procesu vzniklých v důsledku zavedení nového kotouče. Tyto změny jsou zhodnoceny z hlediska jejich vlivu na efektivnost výrobního procesu a v neposlední řadě je provedena ekonomická analýza jednotlivých variant.

Název diplomové práce: Nové broušící materiály

Autor práce: Roman Dušek

Vedoucí práce: Ing. Libor Beránek, Ph.D.

Akademický rok: 2022/2023

Vysoká škola: ČVUT v Praze, Fakulta strojní

Ústav: 12134 – Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Vedoucí ústavu: Ing. Libor Beránek, Ph.D.

Rozsah práce: 92 stránek, 30 tabulek, 35 obrázků

Klíčová slova: broušení, broušící materiály, Cubitron II, korund, efektivnost broušícího procesu, Paretova analýza

Annotation

This bachelor thesis focuses in the first part on the basic elements characterising the grinding system and on grinding materials, especially new grinding materials. The bachelor thesis also focuses on surface integrity, types of grinding wheel wear and grinding fluids.

Second part of thesis is carried out in company Mahr, spol. s r.o. and it is focused on implementation of new grinding wheels that use Cubitron II material in manufacturing of guide bush and comparing changes in the production process caused by implementation of new grinding wheel. These changes are evaluated in terms of their impact on efficiency of the production process, and last but not least, an economic analysis of individual variants is made.

Title of the final thesis:	New grinding materials
Author:	Roman Dušek
Supervisor:	Ing. Libor Beránek, Ph.D.
Academic year:	2022/2023
University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	12134 – Department of Machining, Process Planning and Metrology
Head of department:	Ing. Libor Beránek, Ph.D.
Extent:	92 pages, 30 tables, 35 pictures
Keywords:	grinding, grinding materials, Cubitron II, corundum, grinding process efficiency, Pareto analysis

Obsah

1. ÚVOD A CÍL PRÁCE	12
2. CHARAKTERISTIKY PROCESU BROUŠENÍ	13
2.1 Velikost a geometrie zrna.....	15
2.2 Tvorba třísky	16
2.2.1 Princip tvorby třísky u houževnatých materiálů	17
2.2.2 Princip tvorby třísky u křehkých materiálů.....	18
2.3 Tloušťka třísky	19
2.4 Kinematika broušení	20
2.5 Řezné síly	20
2.6 Efektivnost procesu.....	22
2.7 Termodynamické jevy.....	24
3. INTEGRITA POVRCHU	28
3.1 Mikrogeometrie povrchu	29
3.2 Zpevněná vrstva	31
3.3 Strukturní a fázové změny.....	31
3.4 Zbytková napětí.....	32
4. METODY BROUŠENÍ.....	35
4.1 Obvodové broušení s axiálním posuvem.....	37
4.2 Hlubkové obvodové broušení.....	37
4.3 Radiální obvodové broušení vnějších ploch.....	37
5. NÁSTROJOVÉ MATERIÁLY	38
5.1 Konvenční materiály	38
5.1.1 Umělý korund	38
5.1.2 Karbid křemíku	40
5.2 Supertvrdé materiály	41

5.2.1	Diamant	41
5.2.2	Kubický nitrid boru	42
5.3	Nové materiály	43
5.3.1	Sol-Gel materiály	44
5.3.2	Abral.....	46
5.3.3	N-cBN.....	46
5.4	Pojiva.....	47
5.4.1	Keramické	47
5.4.2	Organické	48
5.4.3	Kovové.....	48
5.5	Značení broušicích kotoučů	49
6.	OPOTŘEBENÍ A OSTŘENÍ KOTOUČE.....	52
6.1	Mechanismy opotřebení broušicích kotoučů	52
6.2	Druhy opotřebení abrazivních zrn	53
6.3	Orovnávání kotouče	54
6.3.1	Druhy orovnávačů	56
7.	ŘEZNÉ KAPALINY A JEJICH POŽADOVANÉ VLASTNOSTI	57
7.1	Rozdělení	58
8.	VOLBA VÝROBNÍCH PŘEDSTAVITELŮ TECHNOLOGIE BROUŠENÍ VE VYBRANÉM PODNIKU.....	60
8.1	Paretova analýza 100Cr6	61
8.2	Paretova analýza X90CrMoV18	62
9.	CHARAKTERISTIKA STÁVAJÍCÍHO SYSTÉMU BROUŠENÍ	63
9.1	Popis broušených výrobků	63
9.2	Broušicí kotouč	67
9.3	Orovnávání kotouče	68
9.4	Kinematika a řezné síly.....	69

9.5	Stroj	71
9.6	Prostředí a řezná kapalina	72
10.	NASAZENÍ NOVÝCH BROUSICÍCH MATERIÁLŮ A ZMĚNY SYSTÉMU BROUŠENÍ	73
10.1	Nový brousicí kotouč.....	73
10.2	Změny v parametrech orovnávaní.....	74
10.3	Kinematika a řezné síly.....	74
11.	EFEKTIVNOST BROUSICÍHO PROCESU.....	75
11.1	Efektivnost při broušení ložiskové oceli.....	76
11.2	Efektivnost při broušení nerezové oceli.....	77
11.3	Zhodnocení efektivnosti	78
12.	EKONOMICKÁ ANALÝZA	80
12.1	Stanovení nákladů při broušení ložiskové oceli	80
12.2	Stanovení nákladů při broušení nerezové oceli	82
12.3	Životnost kotouče	84
13.	ZÁVĚR.....	85
	Bibliografie	87
	Seznam tabulek	89
	Seznam obrázků	91

Seznam použité symboliky a zkratek

A_{c1}	Austenitizační teplota
BEP	Break even point (bod zvratu)
BK	Brousicí kotouč
CBN	Kubický nitrid boru
CVD	Chemical vapor deposition
FEPA	Federation of European Producers of Abrasives
HRC	Tvrдость dle Rockwella
HRS	Hodinová režijní sazba
IT	Stupeň přesnosti
l_e	vyhodnocovací délka
l_r	základní délka
l_{sc}	délka sekce
MKD	Monokrystalický diamant
PKD	Polykrystalický diamant
Ra	průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti
Rmax	maximální výška profilu drsnosti na l_e
Rmr (c)	materiálový poměr profilu drsnosti v určité hladině řezu
Rsm	průměrná šířka profilů drsnosti
Rvt	největší hloubka prohlubně (pit)
Rz	maximální výška profilu drsnosti
spol. s r.o.	Společnost s ručením omezeným

1. ÚVOD A CÍL PRÁCE

S rostoucími požadavky na vlastnosti výrobků dochází také ke zvyšování požadavků na přesnost. Jedním ze způsobů dokončovacího obrábění používaného k dosažení těchto požadavků je broušení. Zároveň je trendem snaha o vývoj nových broušicích materiálů, které by umožnily zefektivnění procesu broušení a snazší dosažení požadovaných vlastností textury povrchu a rozměrových a geometrických tolerancí.

Bakalářská práce se zabývá problematikou procesu broušení a novými broušicími materiály. Práce je rozdělená na dvě části, část teoretickou a část praktickou.

První část práce se věnuje procesu broušení jako takovému, uvádí jeho charakteristiky jako jsou principy tvorby třísky, kinematika broušení, řezné síly, parametry efektivnosti broušicího procesu a termodynamické jevy. Dále je v této části úvod do integrity povrchu a stručné rozdělení jednotlivých metod broušení. Následuje rozdělení a popis broušicích materiálů, nejprve konvenčních a supertvrдых a následně materiálů nových, progresivních. Tato kapitola se zabývá také pojivy a značením broušicích kotoučů. V teoretické části jsou také zmíněny principy opotřebení broušicích kotoučů, jejich ostření a v závěru také řezné kapaliny, jejich požadované vlastnosti a rozdělení.

Druhá část práce je prováděna ve spolupráci s podnikem Mahr, spol s r.o., kdy v této části práce byl sledován a hodnocen vliv zavedení nových broušicích materiálů na procesu broušení vodících pouzder.

Cílem této části práce je provedení analýzy současného stavu broušicího procesu, charakteristika současného stavu broušicího procesu z hlediska používaného broušicího kotouče, parametrů kinematiky a řezných sil, orovnávacího procesu a především efektivnosti. Následuje zhodnocení změn v systému broušení a jejich vliv na výsledné parametry efektivnosti po zavedení nových broušicích kotoučů, využívajících progresivní abrazivní materiály.

Dalším cílem je provedení ekonomické rozvahy pro jednotlivé druhy broušicích kotoučů z hlediska výrobních nákladů a délky životnosti broušicích kotoučů za účelem zhodnocení vhodnosti investice do nových broušicích kotoučů.

2. CHARAKTERISTIKY PROCESU BROUŠENÍ

Broušení se řadí mezi abrazivní metody obrábění, které jsou charakterizovány použitím nástrojů s nedefinovanou geometrií břitu. [1]

Technologie broušení je při obrábění strojírenských součástí aplikována především tam, kde jsou kladeny vysoké požadavky na přesnost rozměrů a tvaru, kvalitu povrchu a zároveň je žádoucí vysoká produktivita a možnost obrábět i velmi tvrdé materiály, pro které jsou jiné obráběcí metody z důvodu jejich tvrdosti nevhodné. [2]

Mezi hlavní charakteristické znaky technologie broušení patří:

- Nepravidelné rozložení a nepravidelný geometrický tvar zrn broušícího kotouče vedoucí k nepravidelnému úběru třísky jednotlivými zrny brusiva.
- Různé úhly čela zrna brusiva.
- Takzvané „samoostření“ broušícího kotouče, které spočívá ve vylamování otupených zrn nebo jejich částí z broušícího kotouče v důsledku slabého upevnění zrna v pojivu. Jejich funkci poté přebírají zrna neotupená.
- Velmi malá jmenovitá plocha řezu (řádově 10^{-3} mm²).
- Velké měrné řezné síly (řádově desítky tisíc MPa) z důvodu malé jmenovité plochy řezu.
- Krátká doba záběru zrn brusiva s obrobkem v důsledku vysoké řezné rychlosti (30–100 ms⁻¹).
- Vznik velkého množství tepla, které může vytvářet značná zbytková napětí, které mohou negativně ovlivnit vlastnosti a životnost součástí.
- Ztráta řezivosti broušících kotoučů způsobená otupováním ostří jednotlivých zrn brusiva a zároveň zanášení pórů třískami. Řezivost nástroje je možné obnovit za použití orovnávače. [1; 3]

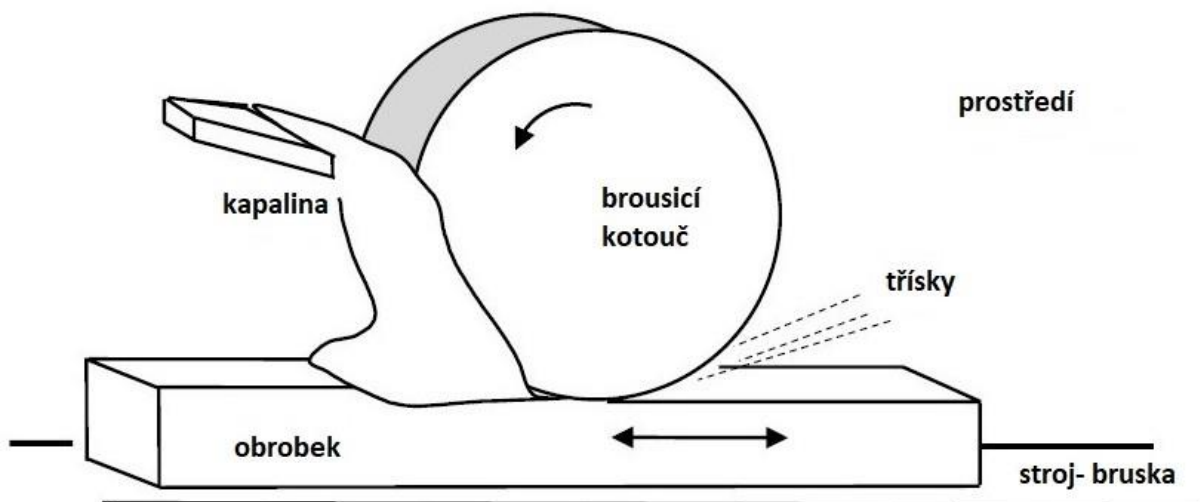
Broušení je dokončovací operace, při které dochází k odřezávání velmi malých třísek mnohobřítým nástrojem tvořeným zrny brusiva, které jsou spojeny

pojivem. Proces broušení a jeho efektivita je definován a ovlivněn několika parametry. [4]

Lze definovat systém, který je tvořený 6 základními prvky, uvedenými na Obr. 1. Níže uvedené prvky je nutno brát v potaz a nastavit tak, aby došlo k optimalizaci a zefektivnění systému a tím i celého broušicího procesu. [2; 5]

Charakteristiky prvků tvořící systém broušení jsou:

1. Obrobek a jeho vlastnosti (tvar, materiál, tvrdost, tuhost, tepelné a chemické vlastnosti).
2. Broušicí kotouč a jeho vlastnosti (struktura, tvrdost, rychlost, tuhost, tepelné a chemické vlastnosti, velikost brusného zrna a pojivo).
3. Kinematika (pohyby a rychlosti pohybů).
4. Procesní kapalina a její vlastnosti (průtok, rychlost, tlak, fyzikální, chemické a tepelné vlastnosti).
5. Stroj a jeho vlastnosti (typ stroje, řídicí systém, přesnost, tuhost, teplotní stabilita, vibrace)
6. Prostředí a jeho vlastnosti (atmosféra, fyzikální a chemické vlastnosti) [2; 5]



Obr. 1: Základní prvky systému broušení (upraveno dle [2])

2.1 Velikost a geometrie zrna

Velikost a tvar brousicího zrna silně ovlivňuje sílu zrna, jeho brousicí vlastnosti, ale také samotnou výrobu brousicího kotouče. Ačkoliv každé zrno je jiné, tak díky velkému množství brousicích zrn na kotouči lze poměrně dobře odhadnout průměrné vlastnosti většiny zrn, a tedy i výsledné vlastnosti kotouče. [2; 6]

Tvar a velikost jsou propojeny především u zrn nepravidelného tvaru, tj. u zrn, která nejsou sférická či krychlová. Obecně lze říct, že zrna kulatějšího tvaru budou houževnatější než zrna hranatější. Přesně definovat zrna těchto je poměrně náročné, je tedy zkoumáno několik parametrů, jako například velký a malý průměr zrna, konvexnost či ostrost. [6; 7]

Konvexnost je charakteristika, která souvisí s pevností zrna a jeho abrazivním potenciálem. Konvexnost je určena pomocí teoretické elastické membrány natažené přes průmět zrna, kde je zkoumána plocha mezi membránou a povrchem zrna, viz. Obr. 2. Nepravidelnost zrna tedy ovlivňuje stupeň konvexnosti zrna. [2; 6]

Konvexnost C je definována rovnicí:

$$C = \frac{A_f + A_p}{A_p} \quad (2.1)$$

kde: A_p je promítnutá plocha zrna

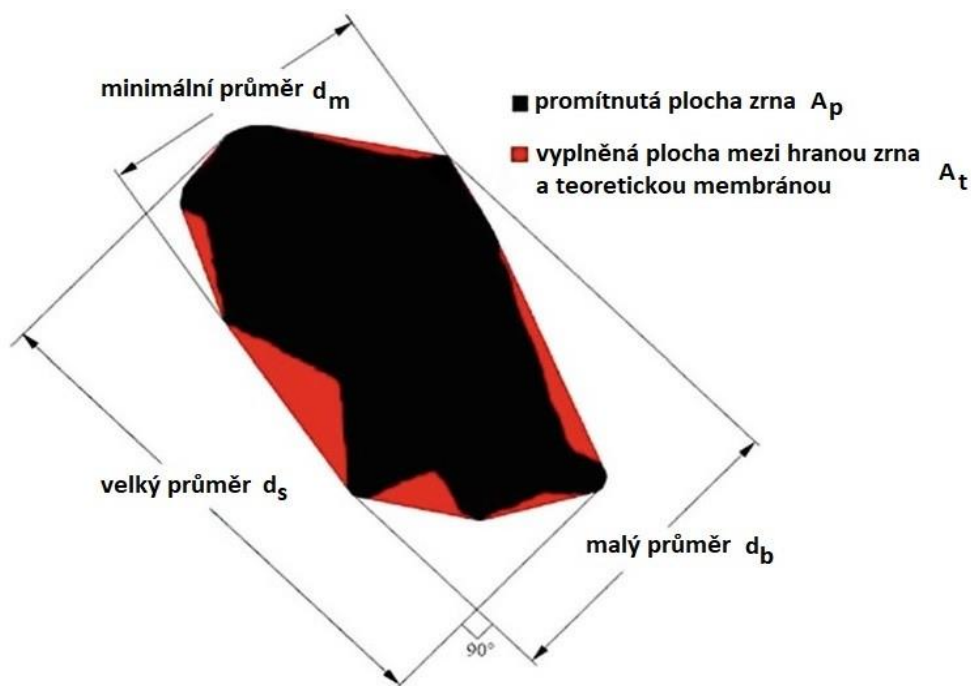
A_f je plocha mezi hranou zrna a teoretickou elastickou membránou zrna

Konvexnost je charakteristika, která je poměrně jednoduše zjistitelná, a zároveň je díky ní možné poměrně dobře předpovědět opotřebení kotouče a potřebné řezné síly. [6]

Dalším faktorem ovlivňující vlastnosti brousicího kotouče a tím pádem i následné vlastnosti obrobeného povrchu je velikost zrna. Ta se nazývá zrnitost a je označena číslem, které je určeno pomocí velikosti oka síta, kterým zrno propadne při třídění. Číslo označuje počet ok síta na jeden palec. [8]

Čím vyšší je požadavek na jakost obrobeného povrchu, tím jemnější zrno se používá. Zároveň platí, že pro materiál měkčí a houževnatější se používá hrubší

zrno než pro materiál tvrdý a křehký. Větší zrno se také volí pro větší úběr materiálu. [8; 9]



Obr. 2: Konvexnost (upraveno dle [6])

Velikost a tvar zrna lze ovlivnit a získat tak brousící zrno s definovanou geometrií tvaru a lepšími vlastnostmi, díky čemuž lze zefektivnit celý brousící proces.

Tab. 1: Zrnitost [10]

Zrnitost dle FEPA	Slovní název
4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 14, 16, 20, 22, 24	Hrubá
30, 36, 40, 46, 54, 60	Střední
70, 80, 90, 100, 120, 150, 180, 220	Jemná
230, 240, 280, 320, 360, 400, 500, 600, 800, 1 000, 1 200, 1 500, 2 000	Velmi jemná

2.2 Tvorba třísky

Proces tvorby třísky je ovlivněn topografií povrchu brousícího kotouče, změnou velikosti a geometrie brousících zrn, proměnlivou hloubkou odřezávaného materiálu a ohřevem materiálu obrobku v místě broušení.

Z důvodu různé geometrie zrn a nepravidelného rozmístění je odebíraná tříška nepravidelná. [11; 9]

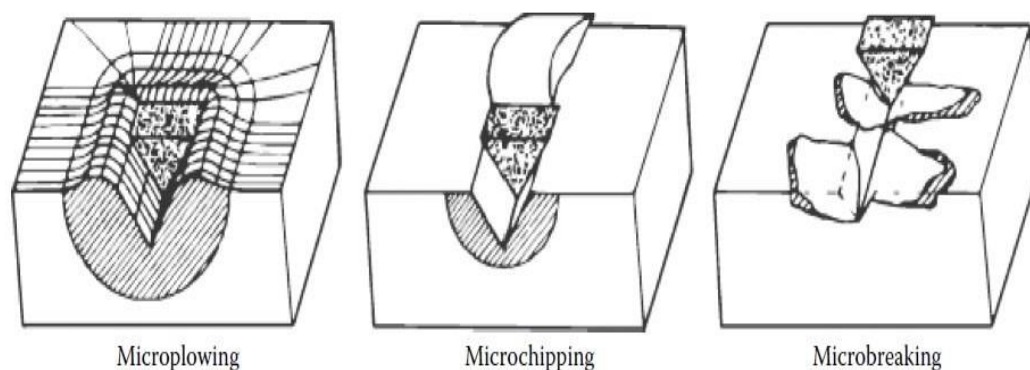
Lze rozlišit tři různé mechanismy odebírání materiálu: „*microplowing, microchipping, microbreaking*“. [2]

Microplowing je mechanismus, kdy dochází k souvislé plastické či elastoplastické deformaci materiálu podél dráhy řezného zrna v materiálu se zanedbatelnou ztrátou materiálu. [2]

Druhým mechanismem odebírání materiálu je microchipping, během kterého dochází ke vzniku třísky. Objem odebíraného materiálu závisí na hloubce řezu a dráze broušícího zrna v odebíraném materiálu. [2; 12]

Tyto mechanismy tvorby třísky se objevují během broušení houževnatých materiálů a závisí na konkrétních prvcích systému broušení, zejména pak na parametrech broušícího procesu a geometrii broušícího nástroje. [2; 12]

Třetím mechanismem, který se vyskytuje především u broušení křehkých materiálů, je microbreaking, kdy množství odebíraného materiálu neodpovídá velikosti a dráze zrna v obráběném materiálu, jelikož dochází k vylamování materiálu. [2]

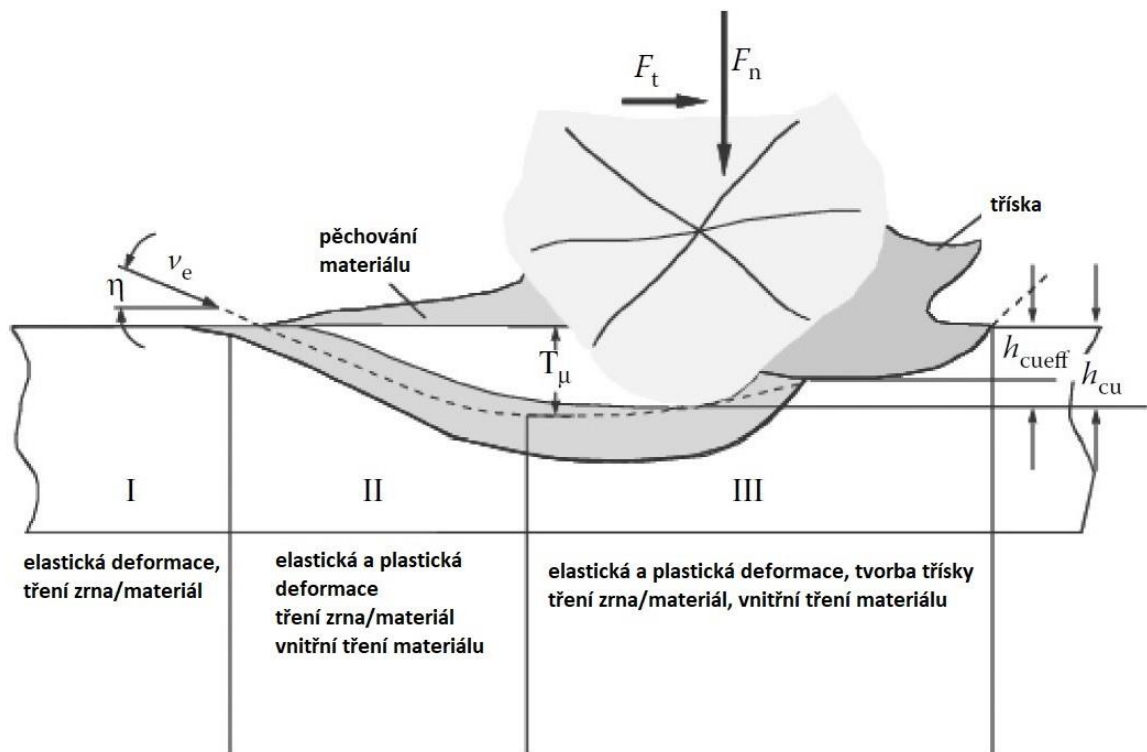


Obr. 3: Mechanismy odebírání materiálu [2]

2.2.1 Princip tvorby třísky u houževnatých materiálů

Proces tvorby třísky u houževnatých materiálů je tvořen třemi fázemi, které lze vidět na Obr. 4. Během první fáze dochází k pružné deformaci povrchu v důsledku tření broušícího zrna o povrch obrobku. Druhá fáze je přechodná, kdy ještě nedochází k odebírání třísky, přesto však dochází k plastické deformaci,

kteřá má za následek tvorbu drážek a pēchování materiálu podél tēchto drážek. Tato fáze je závislá tvaru zrna a hloubce řezu. Během třetí fáze již dochází k tvoření třísky. [2; 12]



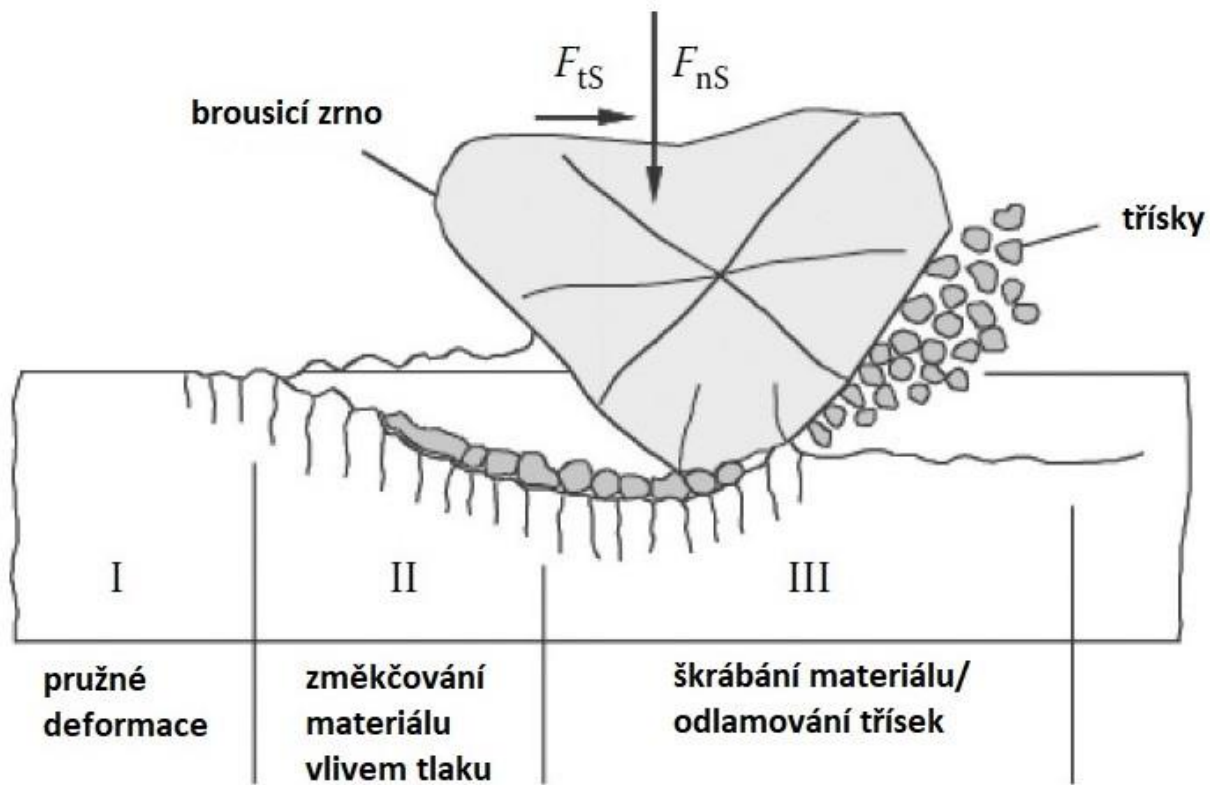
Obr. 4: Mechanismus tvorby třísky u houževnatých materiálů (upraveno dle [2])

2.2.2 Princip tvorby třísky u křehkých materiálů

Princip tvorby třísky u křehkých materiálu se lehce liší od principu u houževnatých materiálů. I přes malou houževnatost obráběných materiálů dochází společně s křehkým vylamováním k elastoplastickým deformacím. Odebírání materiálu probíhá za vzniku mikrotrhlin. Předpokládá se, že pod určitou hodnotu tloušťky třísky je energie vzniklá z napětí nedostatečná pro vznik lomu a dochází k plastické deformaci materiálu.

Jednotlivé fáze tvorby třísky u křehkých materiálů lze vidět na Obr. 5. Během první fáze dochází k pružným deformacím, podobně jako u materiálů houževnatých. Během druhé fáze již však narozdíl od houževnatých materiálů nedochází k pēchování materiálu, nýbrž k změkčování materiálu vlivem tlaku

zrna na obráběný materiál. Během třetí fáze dochází ke vzniku trhlin a odlamování třísek, které odchází z materiálu. [2]



Obr. 5: Mechanismus tvorby třísky u křehkých materiálů (upraveno dle [2])

2.3 Tloušťka třísky

Jelikož je přesné určení tloušťky třísky při broušení z důvodu úběru materiálu jednotlivými zrny složitá, používá se u broušení teoretická hodnota ekvivalentní tloušťky broušení h_{eq} . Při výpočtu této hodnoty se vychází z předpokladu kontinuity materiálu, kdy na jedné straně materiál vstupuje do oblasti řezání a na druhé straně z ní vystupuje.

Pro vnější radiální broušení platí vztah:

$$h_{eq} = \frac{v_w}{60 \cdot v_c} \cdot a_e \text{ [mm]} \quad (2.2)$$

kde:

a_e – radiální záběr [mm]

v_c – řezná rychlost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

v_w – obvodová rychlost obrobku [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]

Při znalosti hodnoty h_{eq} lze vypočítat energetické a dynamické parametry procesu broušení.

2.4 Kinematika broušení

Hlavní a vedlejší pohyby a rychlosti pohybů při broušení jsou určeny kinematikou broušení. Hlavní, respektive řezný pohyb vykonává nástroj rotačním pohybem. Vedlejší přímočarý nebo rotační pohyb vykonává obrobek. Výslednice pohybu brusného kotouče a obrobku tedy poté určuje výsledný pohyb. [9]

Řezná rychlost v_c :

Řeznou rychlost je možné vyjádřit následujícím vztahem:

$$v_c = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{60 \cdot 10^3} [m \cdot s^{-1}] \quad (2.3)$$

kde:

d_s – průměr broušícího kotouče [mm]

n_s – frekvence otáčení broušícího kotouče [ot.min⁻¹]

Řezná rychlost v_c se volí 30-35 m.s⁻¹ pro běžné broušení, při rychlostním broušení řezná rychlost se dosahuje rychlostí 80-100 m.s⁻¹.

Obvodová rychlost v_w :

Obvodová rychlost obrobku v_w je vyjádřena následujícím vztahem:

$$v_w = \frac{\pi \cdot d_w \cdot n_w}{10^3} [m \cdot min^{-1}] \quad (2.4)$$

kde:

d_w – průměr obrobku [mm]

n_w – frekvence otáčení obrobku [ot.min⁻¹]

Obvodová rychlost v_w je podstatně (60 - 100krát) menší než rychlost řezná v_c . Obvodová rychlost ovlivňuje:

1. rychlost deformace a odběr třísky
2. velikost řezné síly
3. drsnost a kvalitu obrobené plochy
4. opotřebení broušícího kotouče

2.5 Řezné síly

Během procesu broušení vznikají neustále se měnící dynamické jevy, které jsou ovlivněny obráběným materiálem, způsobem broušení, řeznými

podmínkami, zrnitostí brusiva, druhem a tvrdostí pojiva a strukturou broušícího kotouče. [9]

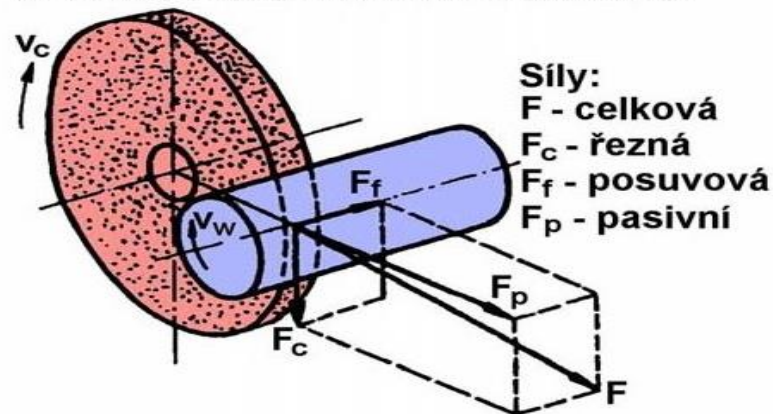
Celková řezná síla F , působící v obecném směru mezi broušícím kotoučem a obrobkem, se při broušení rozkládá do tří směrů, na sebe vzájemně kolmých. Rozkládá se na řeznou sílu F_c , která leží ve směru řezné rychlosti, pasivní sílu F_p , která je kolmá k broušené ploše, a posuvovou sílu F_f , která působí ve směru podélného posuvu. [1; 9]

Zpravidla platí, že síla pasivní je největší a síla posuvová je nejmenší. Zároveň také platí že síla pasivní je zhruba 1,2krát až 3krát větší než síla řezná.

Řeznou sílu F_c je možné určit několika způsoby:

- Experimentálně získaná rovnice při rotačním broušení s příčným posuvem
- Pomocí měrné řezné síly
- Nepřímým způsobem pomocí naměřeného řezného příkonu P_c brusného vřeteníku [1]

Obvodové axiální broušení do kulata



Obr. 6: Rozložení sil při vnějším obvodovém broušení [9]

a) Experimentální rovnice:

$$F_c = C_m \cdot v_w^{0,6} \cdot f_a^{0,6} \cdot a_e^{0,5} [N] \quad (2.5)$$

kde:

C_m – konstanta charakterizující broušený obrobek

v_w – obvodová rychlost obrobku [$m \cdot min^{-1}$]

f_a – axiální posuv stolu brusky na jednu otáčku obrobku [mm]

a_e – radiální záběr [mm] [1; 9]

b) Pomocí měrné síly k_c :

$$F_c = k_c \cdot A_D [N] \quad (2.6)$$

kde:

A_D – jmenovitá plocha řezu [mm^2]

k_c – měrná řezná síla [MPa]

hodnoty měrné řezné síly $k_c = 10\,000$ až $35\,000$ MPa pro oceli a $k_c = 4\,000$ až $12\,000$ MPa pro litiny. Větší hodnoty platí pro jemné broušení a broušení na čisto.

Jmenovitou plochu řezu A_D lze vypočítat z následující rovnice:

$$A_D = \frac{v_w}{60 \cdot v_c} \cdot a_e \cdot f_a [mm^2] \quad (2.7)$$

kde:

v_w – obvodová rychlost obrobku [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]

v_c – řezná rychlost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

a_e – radiální záběr [mm]

f_a – axiální posuv stolu brusky na jednu otáčku obrobku [mm] [9]

c) Nepřímým způsobem pomocí naměřeného řezného příkonu P_c :

$$F_c = \frac{10^3 \cdot P_c}{v_c} [N] \quad (2.8)$$

kde:

P_c – řezný příkon [kW]

v_c – řezná rychlost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

2.6 Efektivnost procesu

Efektivnost broušícího procesu lze vyjádřit několika různými charakteristikami. [1]

Rychlost opotřebení broušícího kotouče Q_s :

$$Q_s = \frac{V_s}{t} [mm^3 \cdot s^{-1}] \quad (2.9)$$

kde:

V_s – objemové opotřebení broušícího kotouče [mm^3]

t – čas broušení [s] [1]

$$V_S = \pi \cdot d_{S1} \cdot \Delta r_s \cdot b_D \text{ [mm}^3\text{]} \quad (2.10)$$

kde:

b_D – šířka broušícího kotouče [mm]

d_{S1} – vstupní průměr broušícího kotouče [mm]

Δr_s – tloušťka opotřebení broušícího kotouče [mm] [1]

Měrná energie broušení e_c :

Hodnota měrné energie broušení e_c znázorňuje efektivitu broušení z hlediska účinnosti energetické stránky procesu. Menší hodnota e_c znamená lepší řezivost broušícího kotouče a tím pádem i efektivnější proces. [1]

$$e_c = \frac{F_c \cdot v_c}{Q_w} \text{ [J} \cdot \text{mm}^{-3}\text{]} \quad (2.11)$$

kde:

F_c – řezná síla [N]

v_c – řezná rychlost [m.s⁻¹]

Q_w – objemový výkon [mm³.s⁻¹]

Objemový výkon Q_w :

Jedná se o úběr materiálu za jednu sekundu. Větší hodnota Q_w znamená lepší řezivost broušícího kotouče.

$$Q_w = \frac{\pi \cdot v_f \cdot d_w}{60} \text{ [mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}\text{]} \quad (2.12)$$

kde:

v_f – rychlost přířuvu BK [mm.min⁻¹]

d_w – průměr obrobku [mm]

Brusný poměr G:

Brusný poměr G lze určit z objemu odebraného materiálu, který připadá na jednotku spotřebovaného zrna.

$$G = \frac{V_m}{V_s} [-] \quad (2.13)$$

kde:

V_m – objem odebraného materiálu [mm³]

V_s – objem opotřebení BK [mm³]

Součinitel účinnosti broušení η :

$$\eta = \frac{G}{e_c} \quad (2.14)$$

kde:

G – brusný poměr [-]

e_c – měrná energie broušení [J.mm⁻³]

2.7 Termodynamické jevy

Během procesu broušení vznikají v systému broušení vysoké teploty, které mohou vést ke strukturním změnám v materiálu a poškození povrchu obráběné součásti. [4; 5]

Hlavním zdrojem tepla během broušení je tření brousícího zrna o povrch broušeného materiálu. Množství vzniklého tepla závisí na všech parametrech systému broušení: obrobku a jeho vlastnostech, vlastnostech BK, prostředí, vlastnostech řezné kapaliny atd. [4]

Množství tepla vzniklého při broušení lze vyjádřit dle rovnice (2.15):

$$Q = F_c \cdot v_c [J \cdot s^{-1}] \quad (2.15)$$

Během broušení dochází k rozdělení tepla. Teplo přechází čtyřmi směry, a tj. do obrobku, do brousícího kotouče, do řezné kapaliny a do třísek viz Obr. 7. Platí tedy:

$$Q = Q_o + Q_k + Q_t + Q_{ch} [J \cdot s^{-1}] \quad (2.16)$$

kde:

Q_o – teplo přecházející do obrobku [J.s⁻¹]

Q_k – teplo přecházející do kotouče [$J \cdot s^{-1}$]

Q_t – teplo odcházející třískami [$J \cdot s^{-1}$]

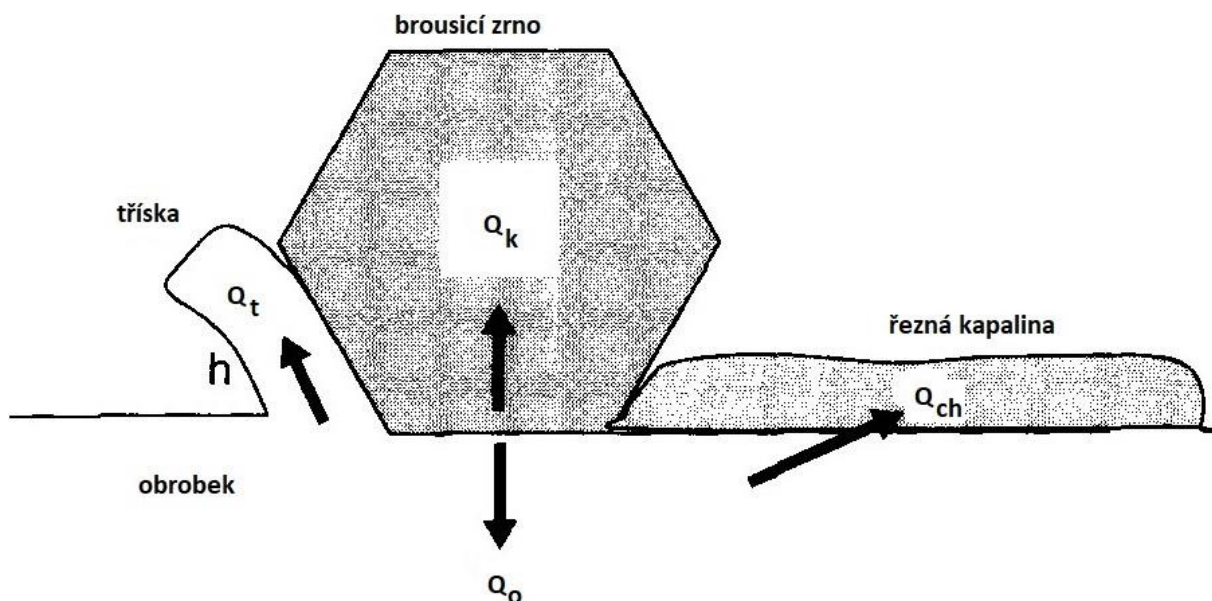
Q_{ch} – teplo odcházející řeznou kapalinou [$J \cdot s^{-1}$] [1; 5]

Největší podíl vzniklého tepla tvoří teplo přecházející do obrobku, a to až 80 % celkového vzniklého tepla při broušení.

Při broušení v systému vznikají různé teploty, které dosahují různých teplot a mají různý dopad jak na nástroj, tak na samotný obrobek.

Okamžitá teplota

Jedná se o teplotu, která vzniká v místě záběru brusiva. Jelikož jednotlivé brousící zrno je v kontaktu s obrobkem po velice krátkou dobu (cca. $1 \mu s$), okamžitá teplota dosahuje vysokých hodnot pouze po velmi krátkou dobu. Tyto vyšší teploty zvyšují plastičnost kovu a tím usnadňují odebrávání třísek. [4; 5]



Obr. 7: Rozdělení vzniklého tepla při broušení (upraveno dle [5])

Jednotlivé brousící zrno je v kontaktu s obrobkem delší dobu než konkrétní bod na obrobku. Zrno je běžně v kontaktu s obrobkem $100 \mu s$, brousící zrna jsou tedy vystaveny vyšším teplotám až 100x déle než bod na obrobku. Brousící zrna mohou dosahovat až teplot, které by u obráběného materiálu vedly k tavení. [5]

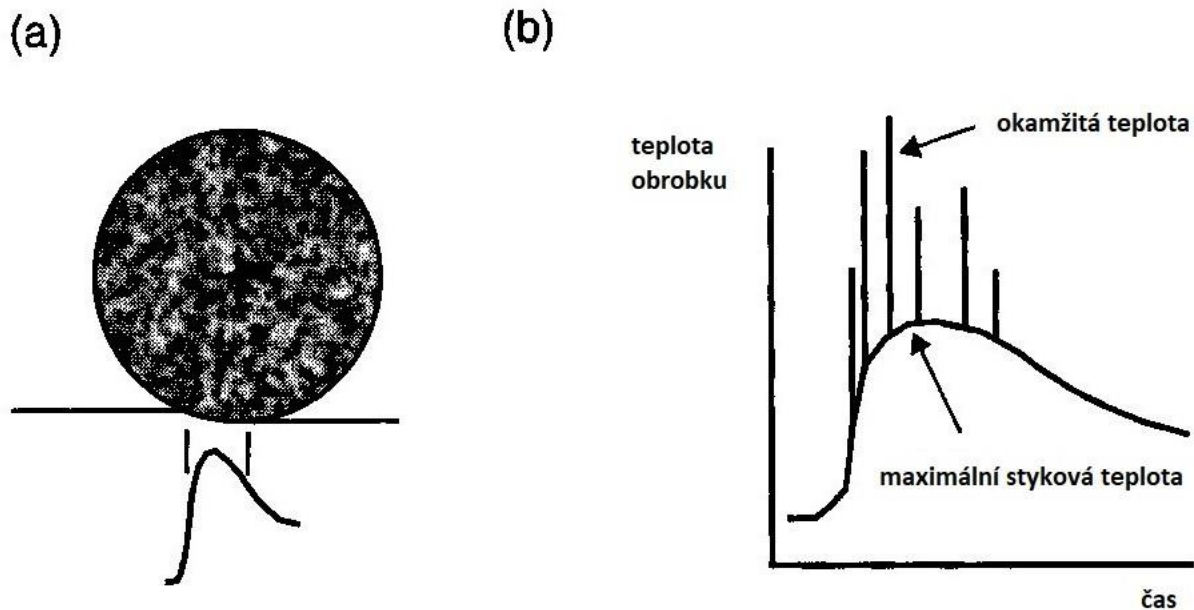
Styková teplota

Jelikož dochází k mnoha záběrům broušícího zrna, dochází v důsledku zvýšených okamžitých teplot k postupnému zahřívání celého obrobku. Z toho důvodu se rozlišuje teplota okamžitá a styková. [5]

Styková teplota v místě broušení je menší než teplota okamžitá, jelikož dochází k přestupu tepla z místa broušení do obrobku. K tomuto přestupu dochází v důsledku rozdílu teploty zahřáté okrajové vrstvy a nižší teploty ostatních částí obrobku. Tento přestup je také ovlivněn vlastnostmi broušícího kotouče (tepelná vodivost pojiva a broušících zrn), vlastnostmi řezné kapaliny či rozměry obrobku. [4]

Styková teplota působí po dobu až několika desítek ms, což způsobuje, že její vliv zasahuje až do hloubky 1 mm a může vést ke strukturálním změnám podpovrchových vrstev. [13; 14]

Průběh okamžité a stykové teploty je patrný z Obr. 8.



Obr. 8: Teploty obrobku: a) stykové teploty a b) okamžité teploty v místech dotyku zrn (upraveno dle [5])

Střední teplota

Jedná se o ustálenou teplotu na povrchu broušeného obrobku, která způsobuje změny rozměrů obrobku. [4]

Možnosti ovlivnění termodynamických jevů

Vzniklou teplotu lze zmenšit vhodným upravením činitelů, které budou mít za následek snížení intenzity zdrojů tepla a zároveň jeho lepší odvádění. Obecně lze tyto způsoby rozdělit na způsob technologický a konstrukční.

Do způsobu technologického spadá výběr optimálního způsobu broušení, vhodně zvolené řezné podmínky (hloubka řezu, řezná rychlost), typ broušícího kotouče (ostrost a geometrie zrna, tepelná vodivost) nebo volba řezné kapaliny. Způsob konstrukční obsahuje vhodnou konstrukci broušících kotoučů pro dané podmínky obrábění, vhodné zařízení a přívod řezné kapaliny.

3. INTEGRITA POVRCHU

Pojem integrita povrchu zahrnuje komplexní charakteristiku povrchu a povrchových vrstev, které jsou nejvíce exponovanými částmi součásti. Tento pojem není přesně definovanou technologickou či fyzikální veličinou ale souborem vlastností povrchu a povrchových vrstev. Tyto vlastnosti jsou důsledkem technologických procesů a ovlivňují součást několika způsoby, v závislosti na druhu jejich vlivu, viz. Tab. 2. [13; 14]

Tab. 2: Vliv a účinek na povrchovou vrstvu [14]

Vliv	Účinek na povrchovou vrstvu	
Mechanický	Plastická deformace Přelozky, převalený a vytrhaný povrch Změny tvrdosti Trhliny - makro a mikroskopické Zbytková napětí Změna odolnosti proti únavě	
Metalurgický	Fázové transformace Velikost, tvar a orientace zm Velikost precipitátů a jejich rozložení Cizí vměstky Dvojčatění Rekrytalizace	
Chemický	Mezikrystalická napadení (IGA) Mezikrystalická koroze (IGC) Mezikrystalická oxidace (IGO) Kontaminace Zkřehnutí Důlková nebo selektivní koroze Koroze a koroze pod napětím	
Tepelný	Tepelně ovlivněná zóna Natavení povrchových vrstev Přeskupení materiálu	
Elektrický	Změna elektrické vodivosti Změna magnetických vlastností	

Vlastnosti charakterizující integritu povrchu po obrábění, které jsou považovány za nejvýznamnější a nejčastěji sledované jsou:

- mikrogeometrie obrobeného povrchu
- zpevněná vrstva
- strukturní, fázové a chemické změny
- zbytková napětí

Integrita povrchu je hodnocena pomocí několika souborů dat, které jsou rozděleny na úrovně dle obsáhlosti zkoumaných charakteristik. Systém úrovní souborů dat je rozdělen do tří úrovní:

- Minimální soubor dat (Minimum Data Set – MDS)
- Standardní soubor dat (Standard Data Set – SDS)
- Úplný soubor dat (Extended Data Set – EDS) [14]

3.1 Mikrogeometrie povrchu

Mikrogeometrie povrchu je závislá na tvaru břitu nástroje a jeho pohybu vůči obrobku. Jedná se o prostorovou charakteristiku, která má v různých směrech odlišné hodnoty, proto se vyhodnocuje v rovině ve zvoleném úseku a hovoříme o profilu povrchu. [13; 14]

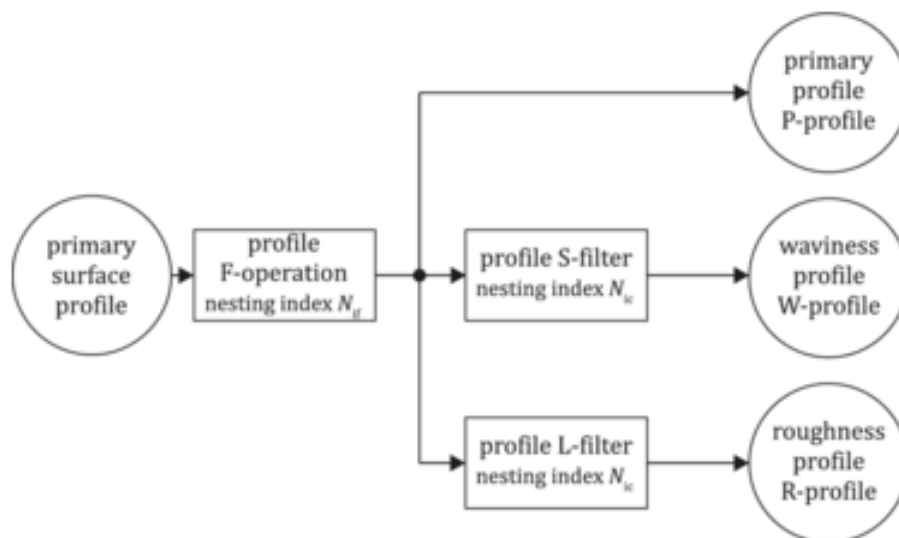
Norma ČSN EN ISO 4287 byla nedávno nahrazenou normou ČSN EN ISO 21920-1, 2 a 3.

Tato norma přináší několik změn, kdy tou hlavní změnou je sjednocení postupu měření pro všechny typy profilů, odpadá tedy nutnost operátora vyhodnotit, zda se jedná o profil periodický či aperiodický.

Ze získaného reálného povrchu jsou po aplikaci filtrů definovaných normou získány následující profily:

- Základní profil (P-profil)
- Profil drsnosti (R-profil)
- Profil vlnitosti (W-profil)

Postup získání těchto profilů a použité filtry jsou uvedeny v Obr. 9 na další straně. [15]



Obr. 9: Postup získání P-profilu, W-profilu a R-profilu [15]

Další změnou, kterou tato norma přinesla se týká základní a vyhodnocované délky. Parametry již nejsou vyhodnocovány na základní délce l_r a poté zprůměrovány, nýbrž jsou vyhodnocovány pro vyhodnocovací délku l_e . Výjimkou jsou například parametry R_{pt} , R_{vt} a R_z , které jsou definovány na délce sekce l_{sc} . [15]

Norma definuje několik parametrů, které popisují profil povrchu. Parametry, které se řadí mezi ty významnější, jsou:

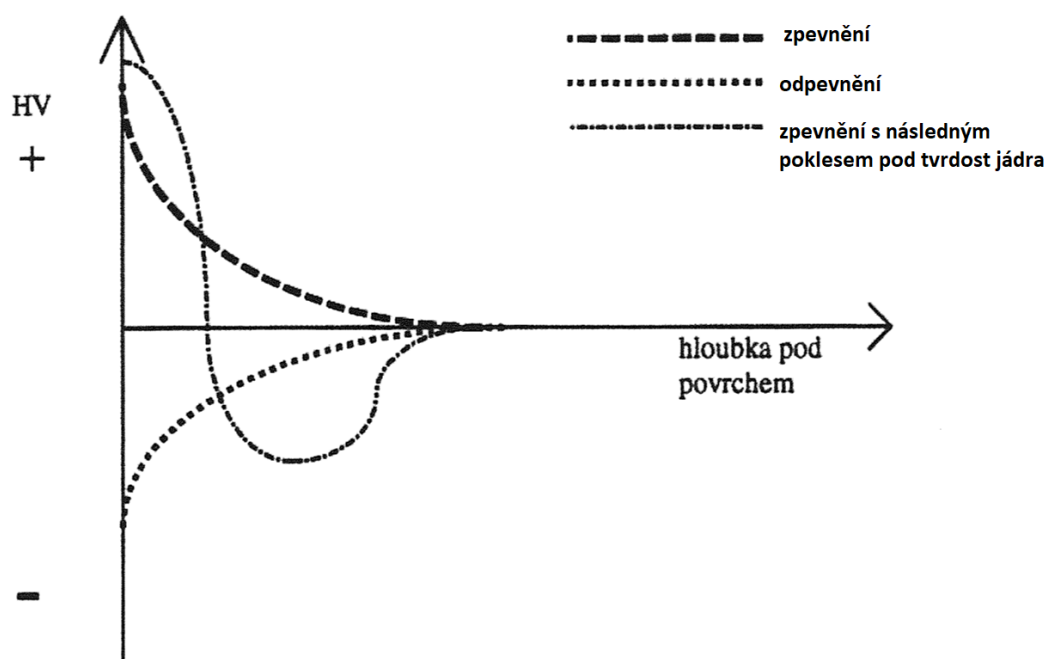
- R_z – maximální výška drsnosti (součet výšky nejvyššího vrcholu profilu (peak) a hloubky největší prohlubně (pit) profilu v rámci jednotlivé sekce l_{sc})
- R_{max} – maximální výška drsnosti uvnitř celkové vyhodnocovací dráhy l_e
- R_a – průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti
- R_{sm} – průměrná šířka prvků profilu drsnosti
- $R_{mr}(c)$ - materiálový poměr profilu drsnosti v určité hladině řezu (c)

Funkčnost plochy nelze efektivně definovat pomocí pouze jednoho konkrétního parametru, je potřeba volit kombinaci parametrů v závislosti jejich vhodnosti pro konkrétní aplikaci. [13; 14; 15]

3.2 Zpevněná vrstva

Tepelné, mechanické a chemické vlivy, které doprovázejí proces obrábění, v závislosti na jejich intenzitě určují velikost změn mechanických vlastností nově vytvořené povrchové vrstvy. Nejčastěji posuzovanou charakteristikou je změna tvrdosti, respektive průběh mikrotvrdosti v závislosti na hloubce pod povrchem, jelikož se většinou jedná o změny ve velmi tenkých vrstvách. [13; 14]

V praxi lze odlišit tři typické průběhy mikrotvrdosti (Obr. 10), jejichž existence je podmíněna výchozím materiálem obrobku a jeho původní strukturou, druhem ovlivnění a výslednou strukturou povrchové vrstvy. Tyto průběhy se rozdělují na zpevnění, odpevnění a zpevnění s následným poklesem pod tvrdost jádra, které je výsledkem tzv. sekundárního zakalení způsobeného např. broušením nebo laserem. [13; 14]



Obr. 10: Charakteristické průběhy mikrotvrdosti [14]

3.3 Strukturní a fázové změny

Teploty vznikající během procesu broušení dosahují nebo převyšují teploty fázových přeměn oceli. Ohřev je velmi rychlý, většinou 10^5 až 10^6 °C.s⁻¹, ovšem má velice krátkou dobu působení (10^{-1} až 10^{-3} s) a zároveň vrstva poměrně rychle chladne. [13; 14]

Strukturní změny v povrchové vrstvě lze obtížně generalizovat, jelikož se liší v závislosti na konkrétním materiálu. Různé materiály jsou z hlediska náchylnosti ke strukturním změnám různě stabilní. U některých materiálů může docházet k transformaci indukované plastickou deformací, kdy ke změně struktury dochází za nižších teplot, než je obvyklé, ovšem v součinnosti se stupněm plastické deformace. [13; 14]

Nejcitlivějšími na strukturní změny v povrchových vrstvách důsledkem broušení jsou zušlechťené oceli s martenzitickou strukturou (např. nástrojové a ložiskové). Nesprávným broušením lze způsobit vznik dvou základních typů podpovrchových struktur [13; 14]:

- Vysokopopuštěný martenzit
 - vznikají opaly (žluté až hnědomodré náběhy)
 - tloušťka vrstvy a pokles tvrdosti jsou funkcí času a velikosti stykové teploty
- Martenziticko-austenitická vrstva
 - styková teplota broušení překročí A_{C1} po kritickou dobu
 - opaly jsou sytě modré barvy
 - vzniká austenit

Vznik těchto změn je způsoben nevhodně zvoleným režimem broušení. Řezné podmínky ovlivňují stykovou teplotu a stupeň deformace v místě kontaktu broušicích zrn s obrobkem, a zároveň i dobu působení těchto faktorů. Dalšími faktory ovlivňující vznik strukturních změn jsou vlastnosti broušicího kotouče a řezná kapalina, pomocí které lze výrazně omezit tepelné zatížení povrchu. [13; 14]

3.4 Zbytková napětí

Zbytková napětí výrazně ovlivňují životnost dynamicky namáhaných součástí. Nelze obecně definovat ideální průběh zbytkových napětí, jelikož pro různé aplikace mají příznivý a nežádoucí účinek. [14]

Z hlediska vzniku lze rozlišit zbytková napětí na časová, která po odstranění příčin a teplotní stabilizaci zanikají, a trvalá, kdy dojde k překročení meze kluzu. Po odstranění zatížení a vyrovnání teplot v součásti zůstávají.

Druhy zbytkových napětí

Rozlišují se tři druhy zbytkových napětí podle objemu, v němž dosahují vnitřní napětí rovnováhy.

- Zbytková napětí I. druhu

Jsou důsledkem nekompatibility mezi makroskopickými oblastmi. Z hlediska směru a velikosti jsou považovány za konstantní. Porušením silové rovnováhy dojde ke změně makroskopických objemů.

- Zbytková napětí II. druhu

Napětí je uvažováno jako konstantní v podstatně menších objemech, až o velikosti jednotlivých krystalů. Porušení silové a momentové rovnováhy nemusí vést ke změnám makroskopických rozměrů.

- Zbytková napětí III. druhu

Tato napětí jsou považována za nehomogenní i v rozsahu několika meziatomových vzdáleností. Porušením silové a momentové rovnováhy nikdy nedochází ke změnám makroskopických rozměrů. [14]

Mechanismy vzniku zbytkových napětí

Vznik zbytkových napětí po broušení je velmi složitým procesem. Obecně lze říct, že příčinou všech mechanismů vzniků zbytkových napětí jsou plastická deformace a zvýšená teplota. Mechanismy vzniku zbytkových napětí lze rozdělit následovně: [14]

a) Nerovnoměrná plastická deformace

Dochází k plastické deformaci povrchové vrstvy, zatímco materiál jádra je namáhán pouze elasticky a zůstává tak bez větších změn. Zpravidla nedochází k výraznému ohřevu. Deformovaná povrchová vrstva se snaží zaujmout větší rozměr (plasticky natáhnout), čemuž však brání jádro vzorku. [14]

b) Nerovnoměrný ohřev či ochlazení

Jak ohřev, tak ochlazení způsobují nerovnoměrné natahování a smršťování vrstev. Povrchová vrstva se při zahřátí snaží protáhnout, ovšem na jádro účinek rozdílu teplot nepůsobí a deformace povrchové vrstvy je tak brzděna a dochází ke vzniku napětí v povrchové vrstvě. [14]

c) Nerovnoměrná fázová transformace

Dochází k přeměně stávajících strukturních složek v povrchové vrstvě nebo k vylučování nových. Tyto přeměny jsou způsobeny silovými a tepelnými účinky. V případě neuvažování těchto účinků vznikají zbytková napětí v důsledku různých měrných objemů jednotlivých struktur. [14]

d) Absorpce prvků do povrchové vrstvy

Jedná se o difúzní proces, který je podpořen zvýšenou teplotou. Změna chemického složení zároveň napomáhá strukturním změnám povrchové vrstvy. Absorpce prvků a reakce v místě kontaktu obráběného materiálu a prostředí mohou vést ke vzniku nových vrstev a povlaků, které se chemicky značně liší od základního materiálu. [13; 14]

4. METODY BROUŠENÍ

Existuje mnoho metod broušení, které jsou vhodné pro různé aplikace a které je možné rozdělit podle několika různých kritérií. Toto rozdělení je uvedeno níže, na Obr. 11.

Podle typu obrobeného povrchu

- broušení rovinné (broušený povrch je rovinný)
- broušení do kulata (broušený povrch je válcový)
- broušení tvarové (broušený povrch je složitější)
 - pomocí profilových kotoučů
 - kopírovací

Podle aktivní části brousícího kotouče

- obvodové broušení
- čelní broušení

Podle vzájemné polohy obrobku a kotouče

- vnější broušení
- vnitřní broušení

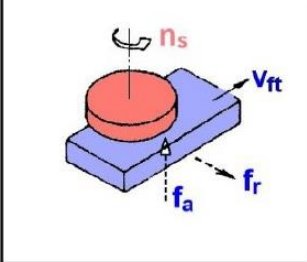
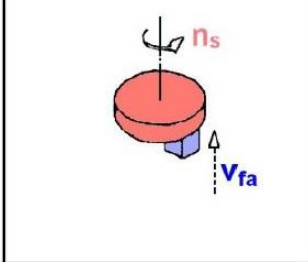
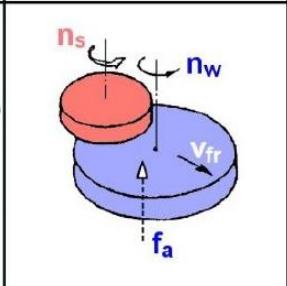
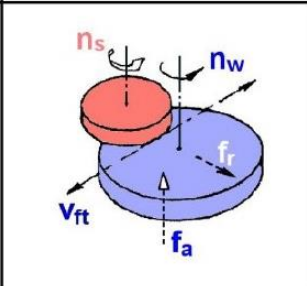
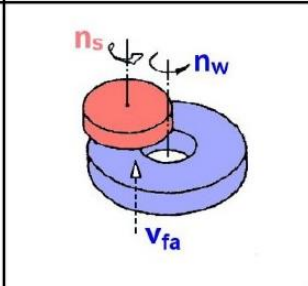
Podle směru hlavního posuvu stolu vzhledem ke kotouči

- axiální
- radiální
- tangenciální

Podle vzájemného vztahu tangenciálních rychlostí BK a obrobku

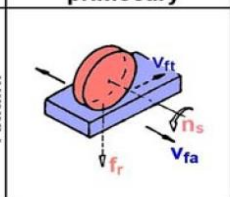
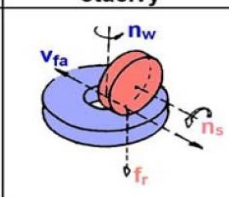
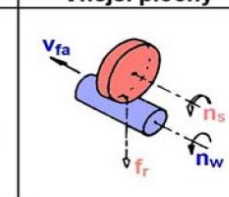
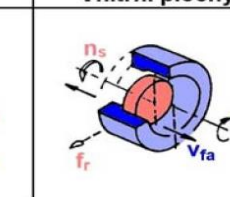
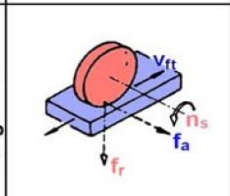
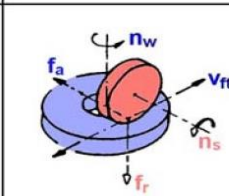
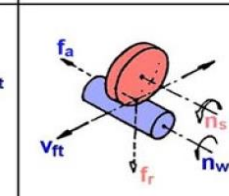
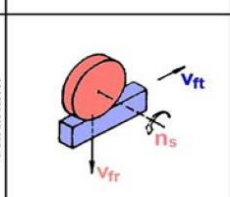
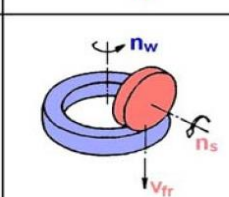
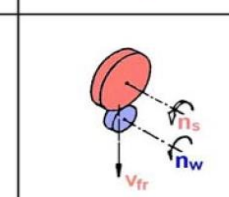
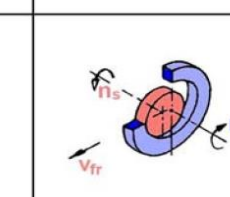
- souběžné
- protiběžné

Obr. 11: Rozdělení metod broušení [1]

		Radiální	Tangenciální	Axiální
Pohyb stolu	přímočarý			
	otáčivý			

n_s - frekvence otáčení brousícího kotouče, n_w - frekvence otáčení obrobku,
 v_{fa} - axiální rychlost posuvu stolu, v_{ft} - tangenciální rychlost posuvu stolu,
 v_{fr} - radiální rychlost posuvu stolu,
 f_a - axiální posuv stolu, f_r - radiální posuv stolu

Obr. 13: Metody čelního broušení [9]

		Rovinné broušení - pohyb stolu		Broušení do kulata	
		přímočarý	otáčivý	Vnější plochy	Vnitřní plochy
Pohyb stolu	Axiální				
	Tangenciální				
	Radiální				

n_s - frekvence otáčení brousícího kotouče, n_w - frekvence otáčení obrobku,
 v_{fa} - axiální rychlost posuvu stolu, v_{ft} - tangenciální rychlost posuvu stolu,
 v_{fr} - radiální rychlost posuvu stolu,
 f_a - axiální posuv stolu, f_r - radiální posuv stolu

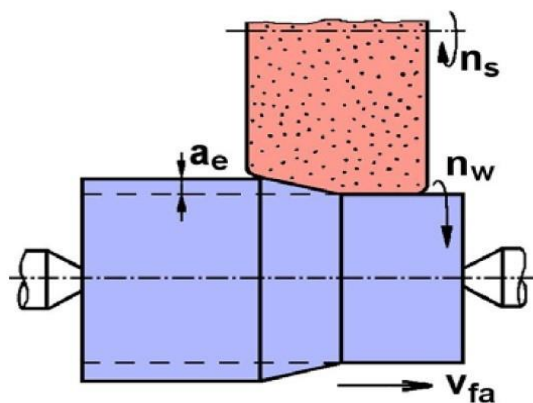
Obr. 12: Metody obvodového broušení [9]

4.1 Obvodové broušení s axiálním posuvem

Broušení s axiálním (podélným) posuvem se používá především při broušení dlouhých součástí válcového nebo kuželového tvaru. Obrobek se otáčí mezi hroty a zároveň koná posuvový pohyb rovnoběžný s osou obrobku. Případně obrobek koná pouze otáčivý pohyb a posuvový pohyb podél osy obrobku koná nástroj. [1; 9]

4.2 Hlubkové obvodové broušení

Jedná se o jednu z nejproduktivnějších metod broušení. Výhodou této metody je, malé množství brousících zrn odstraní větší část materiálu a ostatní zrna brousí na čisto vyjiskřováním. Výkon broušení je oproti axiálnímu broušení o 25 % až 75 % vyšší. Z důvodu zlepšení podmínek hrubovacích zrn je na brousícím kotouči vytvořeno kuželové zkosení. V případě velkých přídavek je možné kotouč vytvarovat stupňovitě. [1; 9]



Obr. 14: Hlubkové broušení [9]

4.3 Radiální obvodové broušení vnějších ploch

Radiální (zapichovací) broušení je podmíněno tuhým obrobkem, zpravidla maximální délky 350 mm. Obrobek je obvykle upnut mezi hroty a hlavní řezný pohyb koná brousící kotouč. Ačkoliv výkon je až o 80 % vyšší než u broušení axiálního, řezná i obvodová rychlost je srovnatelná. Při této metodě je možné brousit několik ploch najednou. [9]

5. NÁSTROJOVÉ MATERIÁLY

Průběh a výstup brousicího procesu jsou významně ovlivněny vlastnostmi brousicího nástroje. Brousicí nástroje mohou mít několik podob, může se jednat o brousicí plátna a papír, brousicí pasty a lešticí pasty, nebo brousicí kotouče a segmenty. Nejčastěji používanými nástroji jsou brousicí kotouče. [1]

Brousicí kotouče jsou tvořeny brousicími zrny, které tvoří řeznou část kotouče, pojivem, které spojuje brousicí zrna v požadovaný tvar, a póry, které umožňují odchod odebíraného materiálu z místa řezu. [5]

Nástrojové materiály lze rozdělit podle způsobu výroby na přírodní a syntetické. Přírodní materiály však nejsou běžně používány v brousicích kotoučích. Syntetické materiály lze rozdělit na konvenční, supertvrdé a nové materiály. [5]

5.1 Konvenční materiály

Mezi konvenční materiály brousicích zrn patří umělý korund (Al_2O_3 , oxid hlinitý) a karbid křemíku (SiC , karborundum). [3]

5.1.1 Umělý korund

Výroba umělého korundu probíhá v Higginsově obloukové peci. Výchozím materiálem pro všechny druhy umělého korundu je bauxit. [6]

Během výroby umělého hnědého korundu následuje kalcinace (vysokoteplotní proces s omezeným přísunem kyslíku, kdy dochází k odstranění nečistot). Kalcinovaný bauxit se poté v obloukové peci zahřívá na teploty nad $2\,000\text{ °C}$ a poté je pomalu ochlazován. [2; 6]

Pro výrobu ostatních druhů umělého korundu se používá tzv. Bayerův proces, kdy dochází k zahřání bauxitu v hydroxidu sodném za teplot $150\text{--}200\text{ °C}$. Nečistoty ve formě vzniklého červeného kalu jsou odstraněny a hydroxid hlinitý následně prochází procesem kalcinace a zahřátím v obloukové peci a pomalým ochlazením. Pro získání různých druhů umělého korundu je možné použít legury. Nejčastěji používané legury jsou chrom, titan, zirkon a vanad. [2; 6]

Umělý korund hnědý

Hnědý korund má tvrdost dle Knoopu 2090, obsahuje 2-4 % TiO_2 , a je středně drobivý/samoostřicí (dochází k lomu zrna a v tom stejném zrně dochází k vzniku nových ostrých hran). Vyšší obsah TiO_2 zvyšuje houževnatost, ovšem snižuje tvrdost. Hnědý korund se používá na hrubovací práce, broušení nízce legovaných ocelí a kovových materiálů střední a vysoké pevnosti. [2; 6]

Polokřehký korund

Polokřehký korund obsahuje 1-2 % TiO_2 . Oproti hnědému korundu je méně houževnatý a drobivý/samoostřicí. Používá se pro broušení nízce legovaných ocelí, kovových materiálů střední a vysoké pevnosti a na hrubovací práce. [1; 2]

Umělý korund bílý

Bílý korund je podstatně tvrdší než hnědý korund. Obsahuje sodium β -aluminum nečistoty. Používá se pro broušení rychlořezných, kalených a nerezových ocelí. [1; 2; 6]

Monokrystalický korund

Jedná se o nejtvrdší a nejkřehčí druh korundu. Neobsahuje žádné sodium β -aluminum nečistoty. Používá se při broušení vysoce legovaných ocelí, které jsou citlivé na teplo, či při broušení titanových slitin (58-64 HRC). [1; 2]

Umělý korund růžový

Růžový korund je legovaný oxidem chromu v množství $<0,5$ %. Má podobnou tvrdost jako bílý korund, ovšem díky chromu je houževnatější. Používá se pro broušení vysoce legovaných ocelí velké pevnosti před kalením. [1; 2; 6]

Umělý korund červený

Červený korund má obsah oxidu chromu 2-3 %. Díky tomu je houževnatější než růžový korund a zároveň je podobně tvrdý. Používá se k broušení nástrojových, rychlořezných, nerezových a kalených ocelí. [1; 2; 6]

Slinutý korund

Jemná zrna korundu válcovitého tvaru jsou slinována. Pórovitost struktury je dána stupněm slinování. Výsledná zrna mají velmi dobrou houževnatost. Používá se pro dokončovací operace, obtahování ostří, honování. [1; 6]

Zirkonový korund

Oxid zirkoničitý se přidává během Bayerova procesu za účelem získání zrna s vysokou houževnatostí. V kombinaci s umělým korundem vzniká tvrdé, extrémně houževnaté zrno. Vlastnosti zirkonového korundu závisí na poměru umělého korundu a oxidu zirkoničitého. S vyšším obsahem oxidu zirkoničitého narůstá houževnatost zrna.

Nejčastěji používané poměry jsou:

- 75 % Al₂O₃, 25 % ZrO₂
- 60 % Al₂O₃, 40 % ZrO₂
- 65 % Al₂O₃, 30 % ZrO₂, 5 % TiO₂

Používá se pro hrubovací práce a hrubování odlitků. [1; 2]

5.1.2 Karbid křemíku

Jedná se o sloučeninu křemíku s uhlíkem (SiC). Karbid křemíku je nejtvrďší z konvenčních brousicích materiálů, ovšem má nižší rázovou houževnatost oproti umělému korundu. Zároveň při teplotách nad 750 °C vykazuje reaktivitu u kovů s afinitou k uhlíku, jako například železo a nikl. Z toho důvodu se používá převážně pro broušení neželezných materiálů. [2; 5]

Karbid křemíku je vyráběn v Achesonově peci. Princip výroby spočívá v chemické reakci křemičitého písku a petrolkoxsu při teplotách okolo 2 400 °C. Reakce je popsána následující rovnicí:



Po vychladnutí je karbid křemíku vyjmut z pece ve velkých kusech, roztříděn podle barvy na zelený a černý, nadrcen a roztříděn podle velikosti zrna. [2; 6]

Karbid křemíku zelený

Zelený karbid křemíku má obsah SiC >98,5 %. Tvrdość zeleného karbidu křemíku dle Knoopu je 2840. Oproti černému karbidu křemíku má hranatější zrna a je drobivější/má lepší samoostřicí vlastnosti. Zelený karbid křemíku se používá k broušení slinutých karbidů, keramických hmot, titanu či skla. [2; 6]

Karbid křemíku černý

Černý karbid křemíku má obsah Sic 95-98 % a tvrdość dle Knoopu je 2680. Oproti zelenému karbidu křemíku je odolnější. Černý karbid křemíku je používán pro broušení šedých litin, temperovaných litin, mosazi či hliníku. [2; 6]

5.2 Supertvrde materiály

Mezi supertvrde abrazivní materiály se řadí diamant a kubický nitrid boru (CBN). Oproti konvenčním materiálům se vyznačují značně vyšší tvrdością. Vynikají vysokou tepelnou vodivostí, ostroćí hran a pravidelností zrn. Supertvrde materiály jsou podstatně dražší než materiály konvenční, ovšem životnost brousicích kotoučů je lepší než u materiálů konvenčních a zároveň mají lepší tvarovou stálost. [2; 12; 16]

5.2.1 Diamant

Diamant je nejtvrdší materiál s tvrdością dle Knoopu 5 000 až 10 000. Diamant je anizotropní, jeho tvrdość se tedy liší v závislosti na směru. Největší tvrdość je na stěně dvanáctistěnu (110), poté na stěněch osmistěnu (111) a nejnižší na stěně krychle (100). [2; 4]

Je dostupný v přírodní i syntetické formě. Přírodní forma diamantu je využívána především pro orovnávače, zatímco syntetická forma je používána pro brousicí kotouče. [16]

Syntetický diamant vzniká za pomoci katalyzátoru (chrom, nikl, železo atd.) z materiálu s obsahem uhlíku (nejčastěji grafit). Za vysokého tlaku a teploty dochází k tavení katalyzátoru a změně struktury atomů uhlíku z hexagonální, která je typická pro grafit, na krychlovou. Dle požadovaných vlastností je možné ovlivnit výslednou strukturu diamantových zrn během výroby. [2; 4]

Diamantu je schopnost udržet si vysokou tvrdost i při rostoucích teplotách. Ovšem má stálou tepelnou stabilitu do 650 °C ve vzduchu, což je teplota, které je během broušení běžně dosahováno. Při překročení této teploty diamant shoří, což je jedna z jeho nevýhod. [2; 5]

Další nevýhodou diamantových brusných zrn je afinita k železu. Chemická reakce atomů uhlíku s železem způsobuje zrychlené opotřebení abrazivních zrn. Tato reakce je navíc urychlena zvýšenými teplotami. Toto chemicko-termické opotřebení je důvod, proč je diamant nevhodný pro broušení ocelí a niklových slitin. Zároveň je diamant citlivý vůči teplotním šokům. [2; 5]

Diamantová brousící zrna jsou ve formě prášku spojena pojivem a nanášeny na pracovní část brousícího kotouče. Lze dosáhnout zlepšení vlastností zrn jejich pokovením mědí a niklem. To zlepšuje odvod tepla, chemické a mechanické vlastnosti, či stabilitu zrna v pojivu. Používaná pojiva pro diamantové brousící nástroje jsou kovová a pryskyřičná. Diamantové brousící kotouče jsou používány podobně jako kotouče z CBN pro broušení tvrdých a velmi tvrdých materiálů, superslitin, keramických materiálů a pro svoji velmi dobrou tvarovou stálost jsou používány v odvětvích s většími požadavky na přesnost, jako například letectví, medicínské. [1; 16]

5.2.2 Kubický nitrid boru

Kubický nitrid boru je po diamantu druhým nejtvrdším materiálem s tvrdostí dle Knoopu asi 4 500, což je zhruba o polovinu menší než u diamantových brousících zrn a zhruba 2x tvrdší než u konvenčních brousících materiálů. [2]

Kubický nitrid boru je dostupný pouze v syntetické formě. Hexagonální modifikace nitridu boritého má podobnou strukturu jako grafit. Kubický nitrid boru potom vzniká podobně jako syntetický diamant, za pomoci katalyzátoru (hořčík, vápník, nitrid lithný atd.) a vysokých tlaků a teplot. Strukturu zrn lze ovlivnit podobně jako u diamantu pomocí upravování tlaku/teploty během procesu. [2; 17]

Kubický nitrid boru není afinní k železu, tudíž ho lze použít k broušení ocelí i niklových slitin. CNB si udržuje vysokou tvrdost i při vysokých teplotách. Tepelná vodivost je při pokojové teplotě až $1\,300\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, což je o polovinu méně než

u diamantu, ovšem stále podstatně více než u konvenčních druhů brusiv. Jeho výhodou oproti diamantu je vyšší chemická a tepelná stabilita. Je stabilní až do 1 500 °C ve vakuu a do 1 400 °C ve vzduchu, díky vrstvě oxidu boritého, která brání oxidaci. [2]

Tato oxidická vrstva ovšem reaguje s vodou, což způsobuje rychlejší opotřebení kotouče při používání řezných kapalin s obsahem vody než při používání řezných olejů. I přesto jsou však kotouče s CBN používány s vodou mísitelnými řeznými kapalinami, kde je velký poměr olejové složky, což zpomaluje reakci. [5; 12]

Kubický nitrid boru se používá především pro přesné broušení kalených nástrojových a rychlořezných ocelí, tvrdých a těžkoobrobitelných materiálů a pro ostření řezných nástrojů. [1; 5]

5.3 Nové materiály

Třetí skupinou broušicích materiálů jsou materiály nové, inovované. Inovované materiály vznikly jako důsledek snahy o vyvinutí abrazivních materiálů, které by vlastnostmi předčily konvenční broušicí materiály se zachováním co nejnižších nákladů. [12; 18]

Jedním z možných způsobů, jak tohoto dosáhnout, byla snaha o zjemnění struktury zrna. Krystalická struktura broušicích zrn konvenčních materiálů jsou tvořena pouze několika krystaly. V případě vzniku lomu v zrně dojde k vylomení větší části daného zrna, což znamená větší opotřebení kotouče a neefektivní použití zrna. V případě zjemnění struktury a zmenšení krystalů v struktuře zrna, dochází k vylamování menších částí, což vede k vytvoření sekundárních řezných hran a zlepšení samoostřicí schopnosti kotouče a zároveň snižuje opotřebení. [2; 18]

Dalším způsobem je snaha o ovlivnění tvaru zrna. Hlavní výhody tvarovaného zrna jsou, že zrno může být upraveno pro potřebu konkrétního obráběného materiálu, což může zlepšit tvorbu třísky, obzvláště u křehkých materiálů, kde může docházet ke vzniku trhlin. Další výhodou je, že lze lépe předvídat výsledek broušicího procesu, jelikož dochází k odstranění jedné z hlavních charakteristik procesu broušení, a tou je nepravidelné rozložení a nepravidelný geometrický

tvár brousicích zrn, která způsobuje nepravidelné odebrání třísky. Výslednou mikrogeometrii povrchu tak lze lépe předpovídat. [7; 18]

Další směr výzkumu inovovaných abrazivních materiálů je snaha o syntézu materiálu, který by se tvrdostí blížil, či dokonce přesahoval tvrdost diamantu. Vývojem bylo dosaženo materiálu Al-Mg-Be, který má tvrdost srovnatelnou s CBN a dále poté materiálu Al-C-N, který se tvrdostí přibližuje diamantu. Materiály, které by se dále mohly přiblížit či překonat diamant, lze najít v systémech C_3N_4 , BC_2N a B_4C . Teorie vychází z předpokladu, že tvrdost souvisí s objemovým modulem pružnosti. To by znamenalo, že kubický C_3N_4 s objemovým modulem pružnosti 496 GPa (diamant má 443 GPa), by mohl potenciálně být tvrdší než diamant. Materiály BC_2N a BC_4N , u kterých již byla provedena syntéza a změřena jejich tvrdost prokázaly tvrdost 62, respektive 68 GPa, což je podstatně více než tvrdost zrn CBN. [18; 19]

5.3.1 Sol-Gel materiály

Skupina abrazivních materiálů sol-gel, někdy také označovaná jako „keramické“ abrazivní materiály. Tato skupina byla vyvinuta z originálního zrna Al_2O_3 , ovšem oproti konvenčním zrnům se liší způsobem výroby. Princip výroby spočívá ve smíchání submikronového prášku boehmitu s vodou, vhodným disperzantem a dopování látkami, které umožňují přípravu materiálů s různými vlastnostmi. Vzniká gel, který je následně tvarován dle požadavků, dehydratován a slinován. Zrna se vyznačují vyšší tvrdostí, pevností a pravidelností oproti běžným korundovým zrnům. Mezi jejich další výhodou patří submikronová mikrostruktura, která výrazně zlepšuje míru opotřebení kotouče a samoostřicí vlastnosti, jelikož velikost vylomené části zrna bude podstatně menší a zároveň stále vznikají nové řezné hrany, což má za účinek malé brousicí síly a sníženou měrnou energii. [6; 18; 19]

Do této skupiny se řadí několik materiálů, které se liší především tvarem zrna.

SG (Seeded Gel)

Jedná se o brousicí zrna s velikostí krystalů asi 0,2 μm . Zrna jsou členitá, kulovitěho tvaru a při opotřebování se téměř nedeformují. Mají samoostřicí

schopnost, kdy během opotřebení dochází ke vzniku sekundárních řezných hran. Používá se v kombinaci s konvenčními korundovými zrny, aby bylo zabráněno vzniku příliš velkých brousicích sil. Umožňují prodloužit životnost brousicích kotoučů až desetinásobně. [2; 18]

Mezi nejčastěji používané směsi se řadí 5SG (obsahuje 50 % SG zrn), 3SG (30 % SG zrn) a 1SG (10 % SG zrn). [18]

TG

Kontrolou a tvarováním SG zrna bylo vytvořeno TG zrno, které je červíkovitého tvaru s poměrem stran 4:1 pro zrno TG1 a 8:1 pro zrno TG2. Tato zrna jsou velmi houževnatá a umožňují konstrukci kotoučů s velkou porozitou, což usnadňuje přístup chladicí kapaliny a výrazně tím zlepšují chladicí vlastnosti kotouče. Jsou tak vhodné například pro broušení Inconelu či jiných superslitin. [6; 18]

DG

Tento materiál vznikl dalším vývojem nového tvaru zrn SG. Jedná se o zrno, u kterého při zatížení vzniká konchoidální lom, který má za následek zvýšení množství řezných hran. [18]

Cubitron

Cubitron je materiál s vlastnostmi podobnými materiálu SG, ovšem je během přípravy dopován jinými látkami (oxid hořečnatý, yttrium, lanthan, neodým). Jedná se opět o materiál se submikronovou mikrostrukturou, zrna jsou členitá, oproti SG zrnu má lepší samoostřicí schopnosti. [2; 18]

Cubitron II

Jedná se o precizně tvarované zrno s přesně definovaným geometrickým tvarem. Jednotlivá zrna jsou tvořena stejně velkými trojúhelníky. Během broušení dochází k odlamování hrotů trojúhelníkových zrn a vzniku nových ostrých hran.



Obr. 16: Trojúhelníková zrna Cubitronu II [21]



Obr. 15: Zrna DG [22]

Mechanismus tvorby třísky je jiný než u ostatních abrazivních zrn, jelikož nedochází nejdříve k elastické a plastické deformaci a přechování materiálu, ale dochází k tvorbě třísky od samého počátku kontaktu hrotu zrna s obrobkem. To zároveň vede ke snížení zahřívání obrobku, jelikož teplo odchází v třísce. Obě tyto výhody také znamenají snížení zbytkových tahových napětí, které jsou z hlediska životnosti nežádoucí. [18; 20]

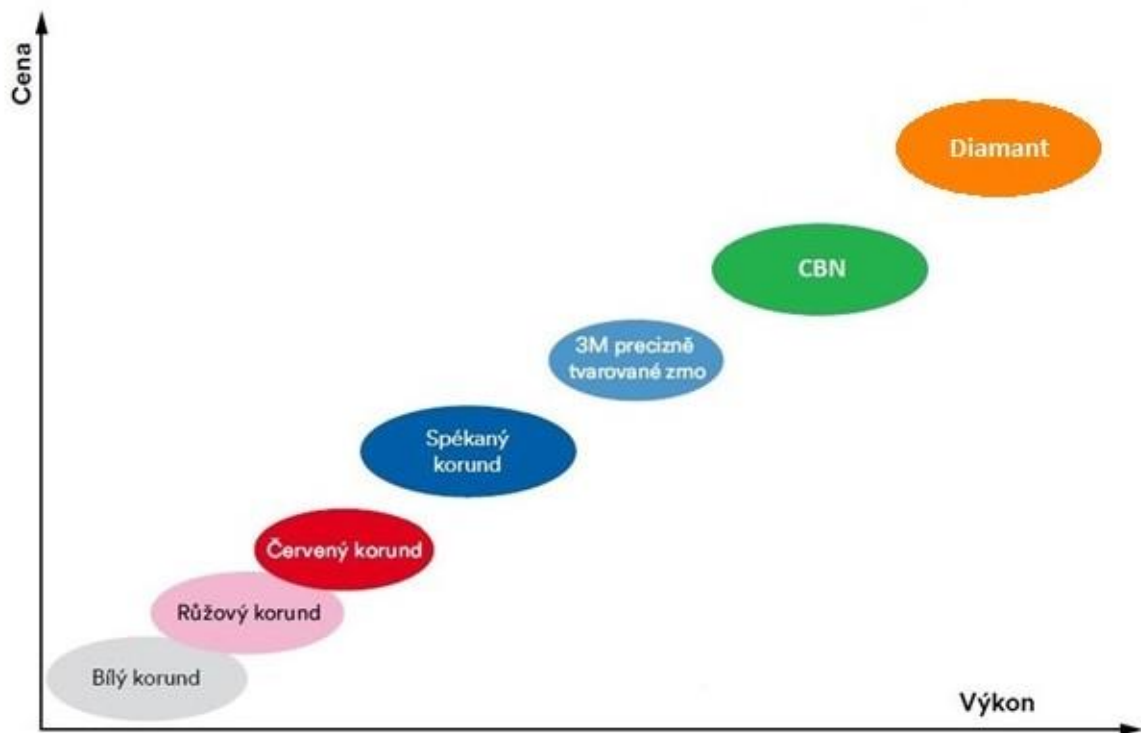
5.3.2 Abral

Abral je zrno legované kyslíkem a dusíkem. Výroba spočívá v kofúzi Al_2O_3 a AION a následném pomalém tuhnutí. Nabízí lepší tvrdost za vysokých teplot než Al_2O_3 . Zároveň má samoostřicí vlastnosti podobné keramickým materiálům. [2; 6]

5.3.3 N-cBN

N-cBN je mikrokrytalické zrno, které je někdy označované jako „SG CBN zrn“. Jedná se o houževnaté hranaté zrno, u kterého dochází k opotřebení pomocí

vylamování malých kousků. Stejně jako u SG zrn při použití dochází ke generování vyšších řezných sil, proto je používán v pevnějším pojivu. [2; 18]



Obr. 17: Porovnání brusných zrn z hlediska ceny a výkonu [20]

5.4 Pojiva

Pojivo vytváří můstky mezi abrasivními zrny a významně svými vlastnostmi ovlivňuje samoostřicí schopnost nástroje. Pro optimální výkon je žádoucí, aby brusné zrno v pojivu tak dlouho, dokud zrno má nebo dokáže tvořit řezné hrany. Pokud opotřebované zrno drží v pojivu příliš dlouho, nástroj ztrácí účinnost. Pokud však dochází k vylamování příliš brzy, zbytečně se snižuje životnost nástroje. Existuje několik druhů pojiv podle použitého brousícího materiálu a požadovaných vlastností. Pojiva lze rozdělit do tří hlavních skupin: keramická, organická a kovová. [1; 5; 16]

5.4.1 Keramické

Keramická pojiva jsou používána u kotoučů s univerzálním využitím. Jsou křehká a citlivá vůči nárazům a bočnímu tlaku. Kotouče pojené keramickými

pojivy se vypalují cca při 1 000 °C. Lze je používat s řeznou kapalinou a pokud jsou vhodně skladována tak jejich vlastnosti se nezhoršují. Jsou pevnější než pojiva organická, ovšem měkčí než kovová pojiva. Jejich výhodou je snadné tvarování a orovnávaní. [3; 5]

5.4.2 Organické

Skupina organických pojiv obsahuje pojivo pryžové a pryskyřičné. Kotouče s organickým pojivem se vytvrzují při teplotách okolo 200 °C. Tato pojiva jsou více elastická než ostatní. Všechny kotouče pojené organickými pojivy s časem degradují, lze je proto skladovat pouze po omezenou dobu. Zároveň se více opotřebovávají při vyšších teplotách. [5]

Pryžové pojivo je nejodolnější z organických pojiv. Používají se pro kotouče vystavené mimořádnému mechanickému namáhání, dále jako tenké řezací kotouče a obzvláště elastické nástroje pro čištění a leštění. [1; 8]

Pryskyřičné pojivo patří mezi nejpoužívanější pojiva. Jsou méně citlivé na náhlou změnu teploty, nárazy a údery než kotouče pojené keramickým pojivem. Je možné ho použít pro broušení za sucha i s chlazením. Do této skupiny pojiv spadá pojivo bakelitové a pojivo na bázi polyimidu. Pojivo na bázi polyimidu je 5x až 10x houževnatější než pojivo bakelitové a je schopné odolávat vysokým teplotám déle, ovšem tato pojiva jsou podstatně dražší. [8; 20]

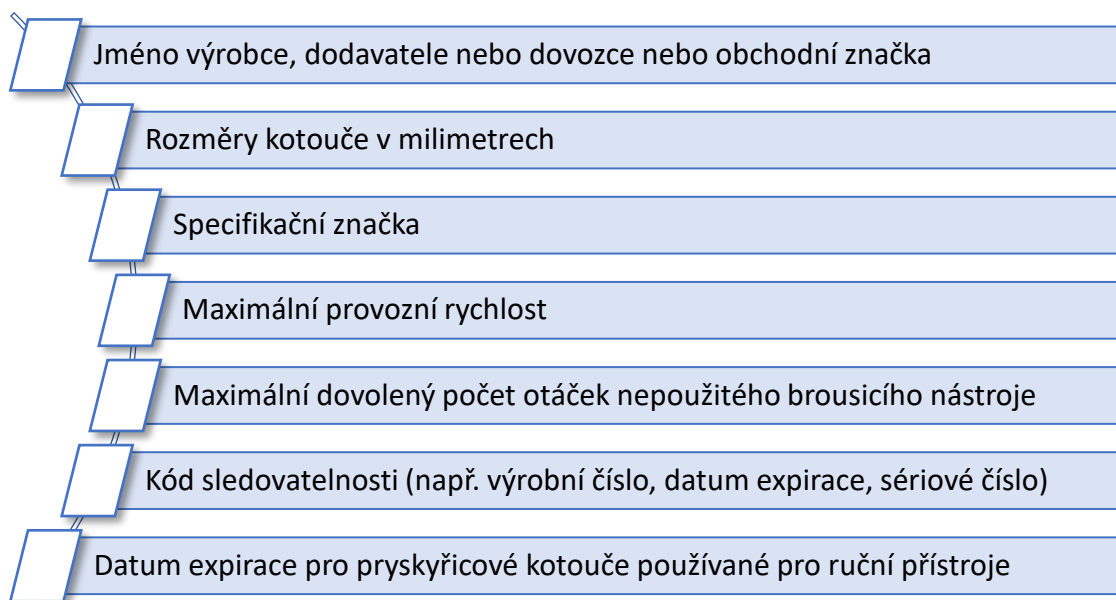
Šelakové pojivo nejhůře snáší vysoké teploty a používá se pro aplikace, kde je prioritou kvalita výsledného povrchu. [8]

5.4.3 Kovové

Kovové pojivo se používá především u supertvrdých broušicích kotoučů. Kovové pojivo je odolnější vůči teplotě a nárazům než pojiva keramická a organická. Abrazivní zrna jsou usazena buď galvanickým pokovením nebo spékáním. Při galvanickém pokovení dochází k nanesení jedné vrstvy zrn na kovové těleso. Tyto pojiva se vyznačují nejlepší tvárovou stálostí a nejvyšší odolností vůči opotřebení a používají se pro broušení povrchů s vysokou požadovanou přesností. [12; 16]

5.5 Značení brousicích kotoučů

Dle normy ČSN ISO 525 musí být všechny brousicí kotouče označeny nezbytnými údaji (Obr. 18) pro správnou identifikaci a zajištění správného zacházení, skladování, montáže a používání. Zároveň může být přidáno další volitelné označení, jako je například číslo typu kotouče dle normy. [10]



Obr. 18: Minimální požadované údaje pro označení brousicích kotoučů [10]

Hlavním údajem, který určuje oblast a vhodnost použití brousicího kotouče je specifikační značka. Údaje specifikační značky lze rozdělit na povinné a volitelné.

Povinné

- Druh hlavního brusiva
- Velikost zrna hlavního brusiva
- Stupeň tvrdosti
- Druh pojiva

Volitelné

- Směs druhů brusiva
- Směs velikostí zrn brusiva
- Struktura nebo pórovitost
- Speciální kód výrobce

Obr. 19: Rozdělení údajů specifikační značky [10]

Druh hlavního brusiva

Základní druh brusiva musí být označen normalizovaným písmenným kódem, kdy speciální druhy brusiva mohou být označeny vlastním kódem výrobce.

Tab. 3: Značení základních druhů brusiva u konvenčních BK [10]

Označení	Druh brusiva
A	Oxid hlinitý
C	Karbid křemíku
Z	Směs oxidu hlinitého a oxidu zirkoničitého

Velikost zrna hlavního brusiva

Pro označování zrnitosti brusiva se používá normalizovaný číselný kód.

Tab. 4: Označení zrnitosti broušicích kotoučů [10]

Zrnitost dle FEPA	Slovní název
4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 14, 16, 20, 22, 24	Hrubá
30, 36, 40, 46, 54, 60	Střední
70, 80, 90, 100, 120, 150, 180, 220	Jemná
230, 240, 280, 320, 360, 400, 500, 600, 800, 1 000, 1 200, 1 500, 2 000	Velmi jemná

Stupeň tvrdosti

Stupeň tvrdosti značí odolnost proti vylomení zrn během broušení. S rostoucí tvrdostí obráběného materiálu klesá stupeň tvrdosti broušicího kotouče.

Tab. 5: Značení stupně tvrdosti broušicích kotoučů [10]

Označení	Slovní název
A, B, C, D	Extrémně měkký
E, F, G,	Velmi měkký
H, I, J, K	Měkký
L, M, N, O	Střední
P, Q, R, S	Tvrký
T, U, V, W	Velmi tvrdý
X, Y, Z	Extrémně tvrdý

Druh pojiva

Pro označení typu pojiva je používán normalizovaný písmenný kód, specifikovaný v Tab. 6. [10]

Tab. 6: Typy pojiva konvenčních brousicích kotoučů [10]

Označení	Druh pojiva
B	Syntetické pryskyřice
BF	Zesílené pojivo ze syntetické pryskyřice
V	Keramické pojivo
PL	Termoplastická pojiva
R	Pryžové pojivo
RF	Zesílené pryžové pojivo

Mezi volitelné údaje se řadí:

Směs druhů brusiva

Pro označení směsi stejného druhu brusiva se používá volitelný kód, určený výrobcem.

Směs velikostí zrn brusiva

Pro označení směsi velikosti zrn se používá volitelný kód, určený výrobcem.

Struktura nebo pórovitost

Struktura nebo pórovitost jsou definovány pomocí normalizovaného číselného kódu. Vyšší číslo udává větší pórovitost (více „otevřenou“ strukturu).

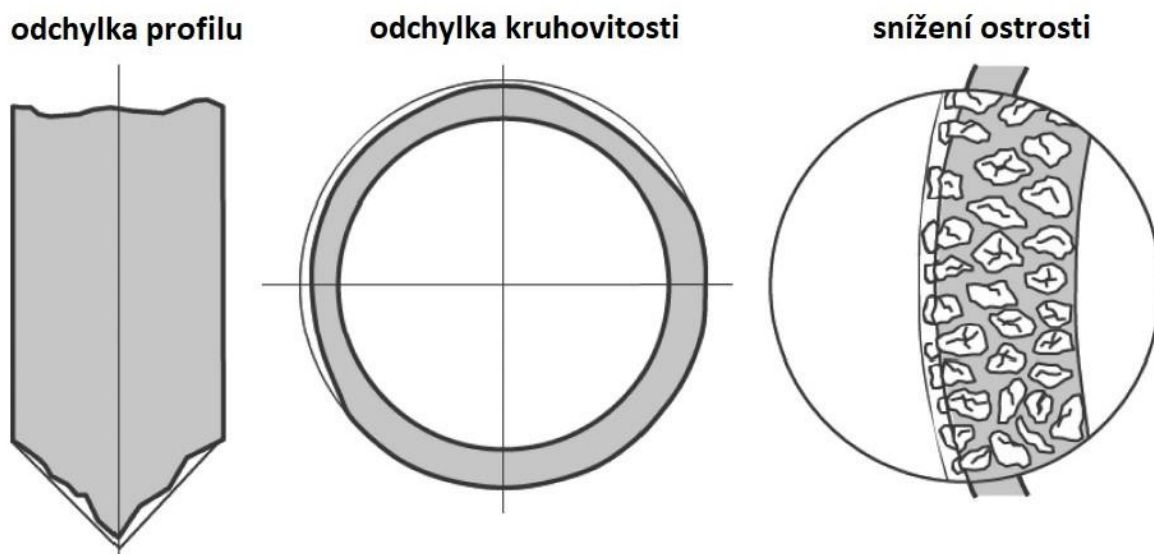
Speciální kód výrobce

Pro označení specifických vlastností brousicích kotoučů (impregnace, zesílený střed), otvory atd.) se používá speciální kód výrobce. [10]

6. OPOTŘEBENÍ A OSTŘENÍ KOTOUČE

V důsledku působení sil a teplot v rámci procesu broušení dochází k opotřebení brousícího kotouče. Opotřebení BK vede ke změně vlastností procesu broušení, což může vést k zhoršení kvality výrobku. [2]

Z hlediska způsobu opotřebení je možné definovat 3 typy opotřebení (Obr. 20): odchylka profilu, odchylka kruhovitosti a snížení ostrosti. [2]



Obr. 20: 3 typy opotřebení BK (upraveno dle [2])

Odchylka profilu vede k vadám tvaru výsledného výrobku, odchylka kruhovitosti může způsobit vibrace z důvodu, což vede k poškození obrobku zanecháním stop po chvění nástroje (chatter marks). Snížení ostrosti kotouče má za důsledek nárůst řezných sil a teplot, což může vést k poškození obrobku.

6.1 Mechanismy opotřebení brousících kotoučů

Opotřebení kotouče vzniká v důsledku ztráty materiálu brousícího kotouče, což je způsobeno kontaktem brousícího kotouče s obrobkem, případně s orovnávačem během procesu orovnávaní BK. Vznik opotřebení lze rozdělit na následující mechanismy: [2]

Abrazivní opotřebení

K abrazivnímu opotřebení dochází z důvodu opotřebování a vylamování brousících zrn během procesu broušení. To vede ke změně povrchu brousícího

kotouče. Faktorem, který může toto opotřebení ovlivnit jsou již vylomená zrna, proto je potřeba zajistit jejich odvedení z místa řezu pomocí řezné kapaliny. [2]

Adhezivní opotřebení

Adhezivní opotřebení je způsobeno vznikem vazeb mezi obráběným materiálem a abrazivním materiálem, kdy vlivem vysokých teplot může docházet k mikrosvařování částic jednoho materiálu na druhý. Tento proces opotřebení je často spojen s difuzním opotřeběním. [2]

Tribochemické opotřebení

Tribochemické opotřebení je důsledkem chemických reakcí brousicího kotouče s obrobkem, případně s prostředím (řezná kapalina, atmosféra). Tento druh opotřebení způsobuje změny ve vrstvě na rozhraní mezi brousicím kotoučem a kapalinou (nazýváno „boundary layer“), které vedou k reakci s abrazivním zrnem a dochází tak k jeho poškození. Faktory ovlivňující tento druh opotřebení jsou chemická afinita mezi brousicím kotoučem a podmínkami prostředí (teplota, tlak, chemické složení). [2]

Narušení povrchu

Narušení povrchu je způsobeno strukturními změnami, únavou, trhlinami a vylamováním jednotlivých zrn, které jsou způsobeny působením mechanických a tepelných vlivů. [2]

Difuzní opotřebení

Proces difuzního opotřebení je podmíněn potřebnou aktivační energií a dostatečným chemickým potenciálem aktivních prvků broušení. Za vysokých teplot dochází k difuzi jednotlivých atomů zrn. Difuze se dělí na mezikrystalickou, která probíhá po hranicích zrn a transkrystalickou, která probíhá v zrnech. [2]

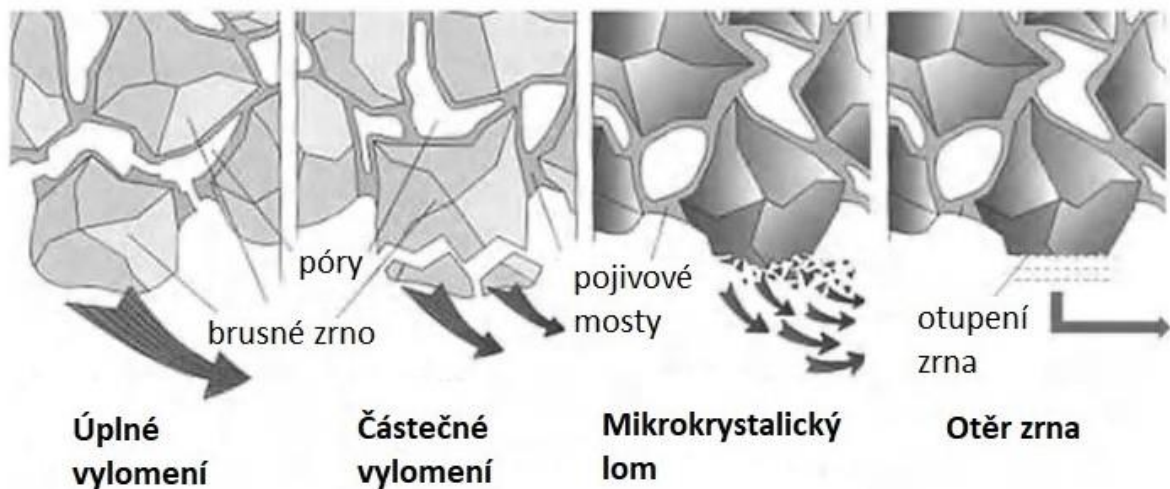
6.2 Druhy opotřebení abrazivních zrn

Výše zmíněné mechanismy a jejich kombinace způsobují opotřebení abrazivních zrn. Proces opotřebení zrn je ovlivněn především řeznými

podmínkami, kinematikou procesu a dále chlazení a mazáním. Tyto parametry ovlivňují tepelné a mechanické opotřebení zrn. Dalšími parametry ovlivňující opotřebení zrn jsou vlastnosti pojiva a brousicích zrn.

Opotřebení abrazivních zrn lze rozdělit následovně:

- Otupení zrn
- Mikrokrytalický lom
- Částečné vylomení zrn
- Úplné vylomení zrn



Obr. 21: Mechanismy opotřebení brusného zrna (upraveno dle [6])

6.3 Orovnávání kotouče

Orovnávání kotouče je proces, během kterého orovnávač vniká do brousicího kotouče a odstraňuje určitou vrstvu. Tento proces je prováděn za účelem udržení požadovaného tvaru BK, odstranění nečistot zanesených do pórů a zajištění požadované řezivosti kotouče.

Orovnávání má zásadní vliv na vlastnosti brousicího kotouče a správně zvolený proces orovnávacího má tedy významný vliv na samotný brousicí proces a výsledný výrobek.

Orovnávání kotouče je prováděno po zhotovení určitého počtu výrobků, potom zpravidla před novou výrobní dávkou a také před prvním použitím kotouče. I úplně nový kotouč má určitou odchylku profilu a kruhovitosti způsobenou výrobním procesem, proto je orovnávací proces stěžejní pro

dosažení přesného tvaru brousicího kotouče, aby bylo možné dosáhnout požadovaných výsledků brousicího procesu. [2]

Pro proces orovnávaní jsou důležité následující parametry:

a_d – přísuv orovnávače [mm] (nejčastěji 0,005 – 0,02 mm)

b_d – šířka orovnávače [mm]

n_s – otáčky brousicího kotouče [$\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$]

v_d – rychlost posuvu orovnávače [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]

$$U_d = \frac{b_d \cdot n_s}{v_d} [-] \quad (6.1)$$

Tyto parametry určují stupeň překrytí U_d , který určuje počet překrytí jednoho bodu brousicího kotouče šířkou orovnávače. Větší stupeň překrytí znamená nižší drsnost kotouče a nižší dosažitelnou drsnost výrobku. [21]

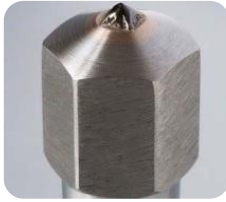
Přibližné hodnoty stupně překrytí se pohybují následovně:

Tab. 7: Stupně překrytí pro různé druhy broušení [21]

Stupeň překrytí	Druh broušení
2 až 3	Hrubovací broušení
3 až 4	Standardní broušení
4 až 6	Jemné broušení
6 až 20	Super-finish broušení

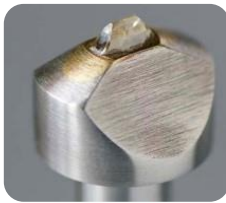
6.3.1 Druhy orovnávačů

Existuje několik druhů orovnávačů, které jsou používány v závislosti na požadovaných vlastnostech.



Jednokamenné nebroušené orovnávače

- Využívají přírodní špičku krystalu diamantu
- Vysoká přesnost a řezivost orovnění
- Určeny pro rovinné orovnávaní



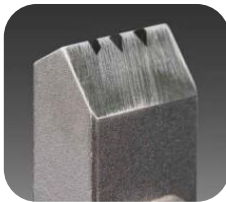
Jednokamenné broušené orovnávače

- Využívají nabroušený přírodní diamant
- Nejlepší řezivost a vysoká přesnost
- Určeny pro tvarové orovnávaní



Vícezrnne orovnávače

- Využívají více malých krystalů
- Velmi rychlé orovnění, vysoká řezivost a menší náklady
- Určeny pro rovinné orovnávaní



MKD a CVD orovnávací destičky

- Využívají synteticky vyráběný diamant
- Vysoká opakovatelnost orovnávaní
- Používány ve formě destiček s různým počtem diamantových hranolů



PKD a CVD orovnávače

- Trojúhelníkové destičky s horní plochou pokrytou syntetickým diamantem
- Stejný princip jako u vyměnitelných břitových destiček při obrábění
- Určeny pro tvarové orovnávaní



Rotační orovnávače

- Využívají velké množství krystalů diamantu po obvodu
- Nástroje pro rotační orovnávaní BK
- Určeny pro rovinné i tvarové orovnávaní

Obr. 22: Druhy orovnávačů [23]

7. ŘEZNÉ KAPALINY A JEJICH POŽADOVANÉ VLASTNOSTI

Řezná kapalina a její vlastnosti (průtok, rychlost, tlak, fyzikální, chemické a tepelné vlastnosti) jsou jeden z prvků tvořící systém broušení. Volba vhodné řezné kapaliny vychází z několika kritérií. Je nutné brát v potaz materiál nástroje, obráběný materiál, použitý stroj i objem výroby. [2]

Hlavními požadovanými vlastnostmi řezných kapalin jsou:

Chladicí účinek

- Schopnost řezné kapaliny odvádět teplo z místa řezu. Tato schopnost je ovlivněna smáčecí schopností kapalin, tepelné vodivosti, měrném teple a výparném teple a rychlosti vypařování za daných teplot.

Mazací účinek

- Schopnost kapaliny vytvořit vrstvu, která snižuje tření mezi obrobkem a nástrojem. To vede ke snížení řezných sil, zmenšení spotřeby energie a zlepšení jakosti povrchu. Tato schopnost závisí na viskozitě kapaliny.

Čisticí účinek

- Schopnost kapaliny odstraňovat třísky z místa řezu a vyplavovat zanesené póry BK.

Obr. 23: Hlavní požadované vlastnosti procesních kapalin [1]

Mezi další požadované vlastnosti řezných kapalin se řadí:

Provozní stálost

Schopnost řezné kapaliny odolávat stárnutí a tím pádem i degradaci funkčních vlastností (rozklad, zhoršení mazacího účinku, ztráta ochranných schopností, hniloba). [1]

Ochranný účinek

Jedná se především o schopnost řezné kapaliny chránit proti vzniku koroze.

[1]

Zdravotní nezávadnost

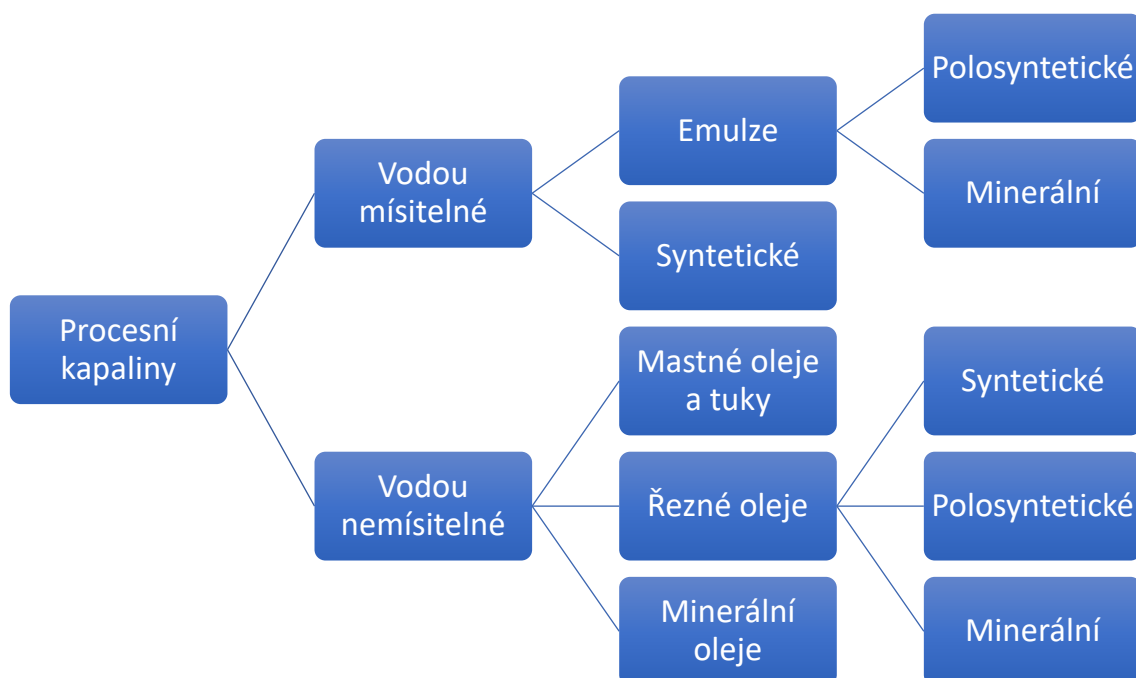
Řezná kapalina nesmí být jedovatá, obsahovat látky dráždící sliznici, nesmí být zdraví škodlivá a příliš zapáchat. [1]

Přiměřené náklady

Náklady se stanovují především v souvislosti se spotřebou řezné kapaliny a jejím vlivu na kvalitu procesu obrábění a výrobku a nákladů na likvidaci. [1]

7.1 Rozdělení

Řezné kapaliny lze rozdělit dle účinku, případně dle původu. Dle účinku se kapaliny dělí na chladicí (s chladicím účinkem) a řezné (spíše s mazacím účinkem). Dle původu se kapaliny dělí na vodou mísitelné a vodou nemísitelné. [2]



Obr. 24: Rozdělení procesních kapalin [2]

Mezi běžně používané z procesní kapaliny z výše uvedených patří především:

Emulzní kapaliny

Jedná se o nejběžněji používané procesní kapaliny při broušení železných materiálů. Emulzní kapaliny jsou tvořeny soustavou dvou kapalin, které jsou navzájem nerozpustné a jedna z nich je ve formě mikroskopických kapek rozptýlena v té druhé (obvykle olej ve vodě). Spojují přednosti chladicích účinků vody a mazacích účinků olejů. Mají pH 8 až 9 a poskytují tak i ochranu proti korozi u slitin železa. [12]

Řezné oleje

Řezné oleje nabízí velmi dobré mazací účinky, které výrazně zlepšují úběr materiálu. Oproti emulzím jsou chemicky stabilnější a nepotřebují tak častou výměnu, ovšem mají horší chladicí vlastnosti. Jsou využívány především u CBN kotoučů, které při chlazení emulzí rychleji degradují. [12]

Syntetické kapaliny

Syntetické kapaliny neobsahují minerální oleje, ale jejich složkou jsou glykoly, které jsou rozpuštěné ve vodě, mají dobrý chladicí, mazací i ochranný účinek a jejich výhodou je velká provozní stálost. [1; 12]

8. VOLBA VÝROBNÍCH PŘEDSTAVITELŮ TECHNOLOGIE BROUŠENÍ VE VYBRANÉM PODNIKU

Praktická část bakalářské práce byla realizována ve spolupráci se strojírenským podnikem Mahr, spol. s r.o. se sídlem v Proboštvě. Mahr, spol. s r.o. je dceřinou společností skupiny Carl Mahr Holding GmbH, která je aktivní více než v 60 státech světa. Mezi hlavní odvětví podnikání společnosti patří výroba a servis měřicí techniky, výroba zubových dávkovacích čerpadel a výroba kuličkových vedení. Jedná se o společnost s dlouholetou tradicí, která vznikla v roce 1861 jako rodinný podnik zabývající se výrobou měřidel pro strojírenství.

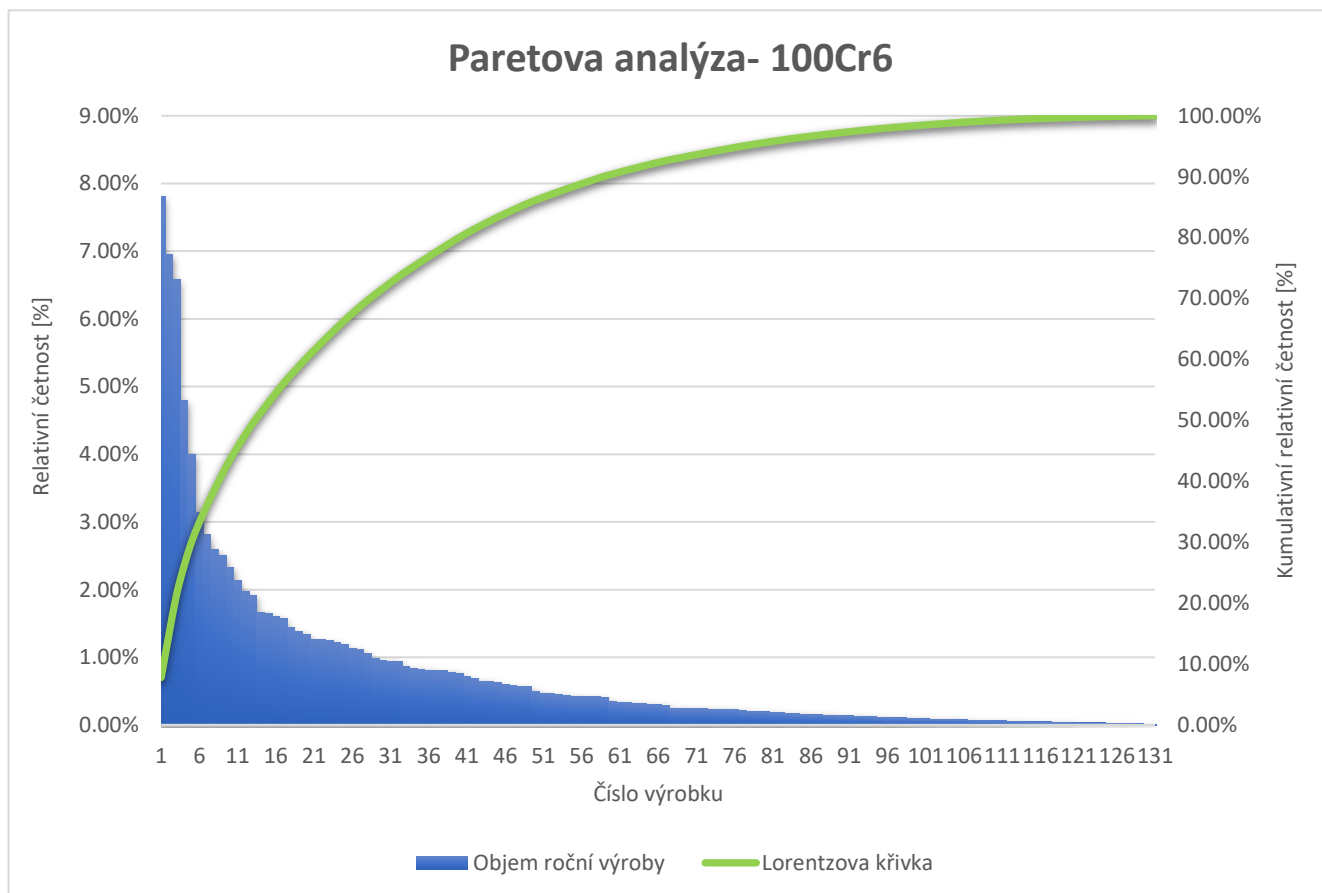
Stávající systém broušení vodicích pouzder je rozdělen do 2 částí podle použitého materiálu. Jedná se o skupinu vodicích pouzder vyráběných z ložiskové oceli a o skupinu vyráběných z nerezové oceli.

Z důvodu rozsáhlého výrobního portfolia vodicích pouzder bylo pomocí Paretovy analýzy určeno 5 představitelů z každé skupiny.

Ukazatele, podle kterých byly určeni výrobní představitelé, jsou čas obrábění a množství vyrobené v minulém roce. Pomocí nich bylo určeno, jaký objem výroby v daném roce jednotlivé výrobky představují.

8.1 Paretova analýza 100Cr6

Celé výrobní portfolio vodících pouzder z materiálu 100Cr6 obsahuje 131 výrobků. Byl sestaven graf Paretovy analýzy, ve kterém lze sledovat rozložení výroby.

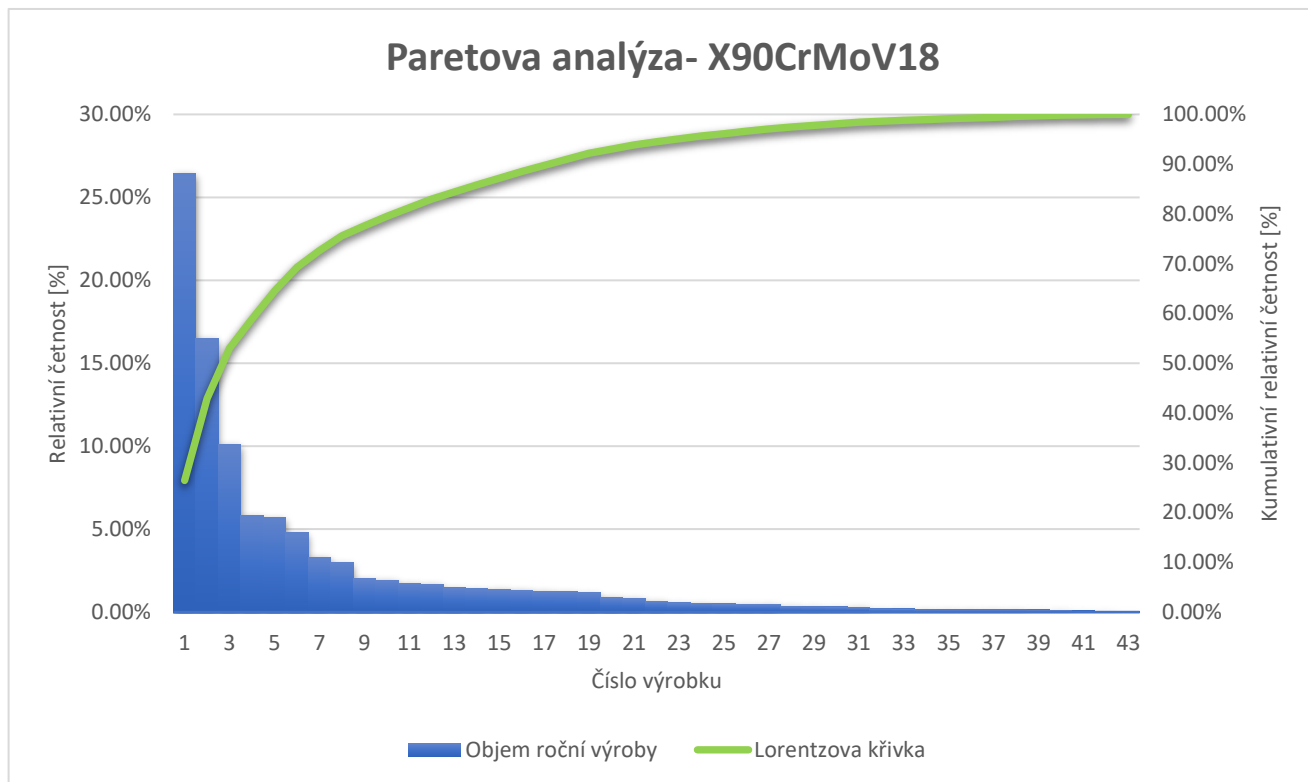


Obr. 25: Paretova analýza pro stav výroby vodících pouzder z oceli 100Cr6

Pět výrobků s největším objemem výroby bylo zvoleno jako představitelé brouscího procesu ložiskové oceli. Tyto výrobky představují celkem 30,14 % objemu výroby vodících pouzder z ložiskové oceli a pro tyto výrobky jsou zhodnoceny parametry efektivity brouscího procesu.

8.2 Paretova analýza X90CrMoV18

Výrobní portfolio vodících pouzder z nerezové oceli obsahuje 43 výrobků. Byl sestaven graf Paretovy analýzy, ve kterém lze sledovat rozložení výroby.



Obr. 26: Paretova analýza pro stav výroby vodících pouzder z oceli X90CrMoV18

Pět výrobků s největším objemem výroby bylo zvoleno jako představitelé brousicího procesu nerezové oceli. Tyto výrobky představují celkem 64,55 % objemu výroby vodících pouzder z nerezové oceli a pro tyto výrobky jsou zhodnoceny parametry efektivity brousicího procesu.

9. CHARAKTERISTIKA STÁVAJÍCÍHO SYSTÉMU BROUŠENÍ

V této kapitole bude charakterizován aktuální systém broušení a jeho prvky v podniku firmy Mahr, spol. s r.o., tak jak byly definovány v kapitole číslo 2.

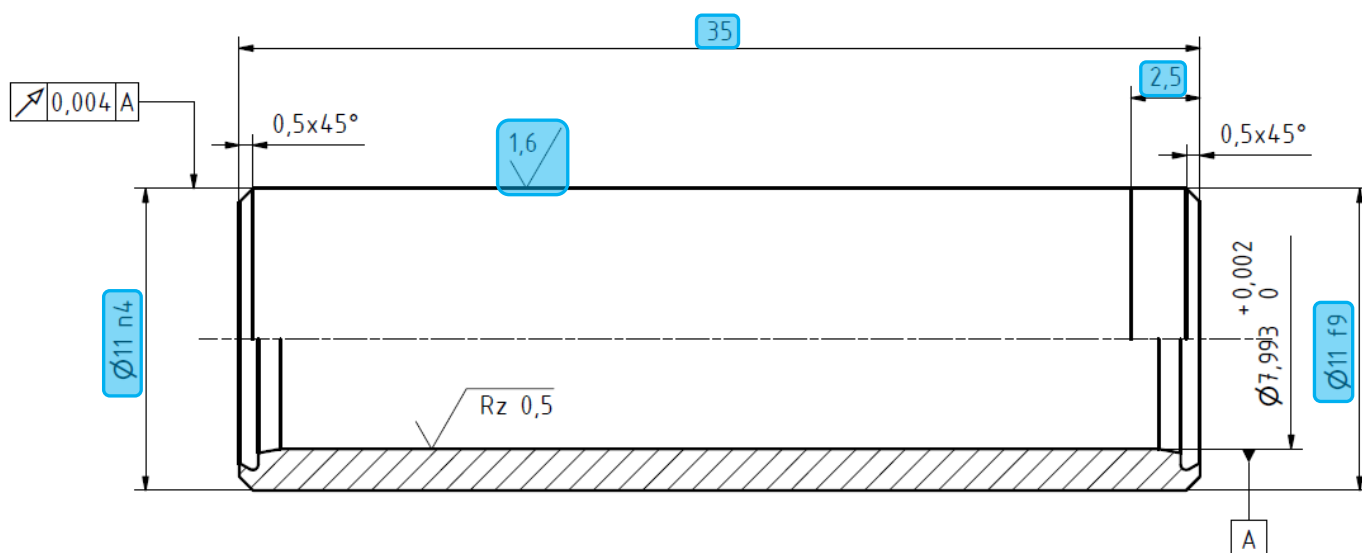
9.1 Popis broušených výrobků

Broušené dílce jsou vodící pouzdra pro kuličkové vedení. Jedná se o díly se, které se liší v požadovaných rozměrech délky, průměru a velikosti zápichu na konci pouzdra.

Pouzdra jsou broušena na požadovanou drsnost (nejčastěji Ra 1,6) a dále na požadovanou rozměrovou toleranci, který se liší u části před zápichem (nejčastěji IT4) a u zápichu (nejčastěji IT9)

Na pracoviště broušení jsou díly dodávány zhotovené na požadovanou délku obrobku a s přídávkem na průměru, který se odvíjí dle průměru vodícího pouzdra viz Tab. 8 na další straně.

Na Obr. 27 je znázorněn zjednodušený výkres vodícího pouzdra se zvýrazněnými údaji, které jsou pro operátora při procesu broušení důležité. Tyto údaje jsou zvýrazněny v světle modrém poli.



Obr. 27: Příklad vodícího pouzdra

Tab. 8: Přídavek na broušení v závislosti na průměru vodícího pouzdra

Vnější průměr vodícího pouzdra [mm]	Přídavek na broušení [mm]
6-8	0,16
10-18	0,2
20-28	0,25
30-48	0,3

Vodící pouzdra jsou zhotovována ze dvou materiálů, a to z ložiskové oceli s a z nerezové oceli.

Ložisková ocel

V případě vodících pouzder z ložiskové oceli se jedná o ocel s označením 100Cr6. Jedná se o vysoce uhlíkovou, nízkolegovanou ocel s přídavkem chromu.

Tab. 9: Chemické složení oceli 100Cr6

Chemické složení [%]							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
0,90-1,05	0,15-0,35	0,25-0,45	<0,030	<0,025	1,35-1,65	<0,30	<0,30

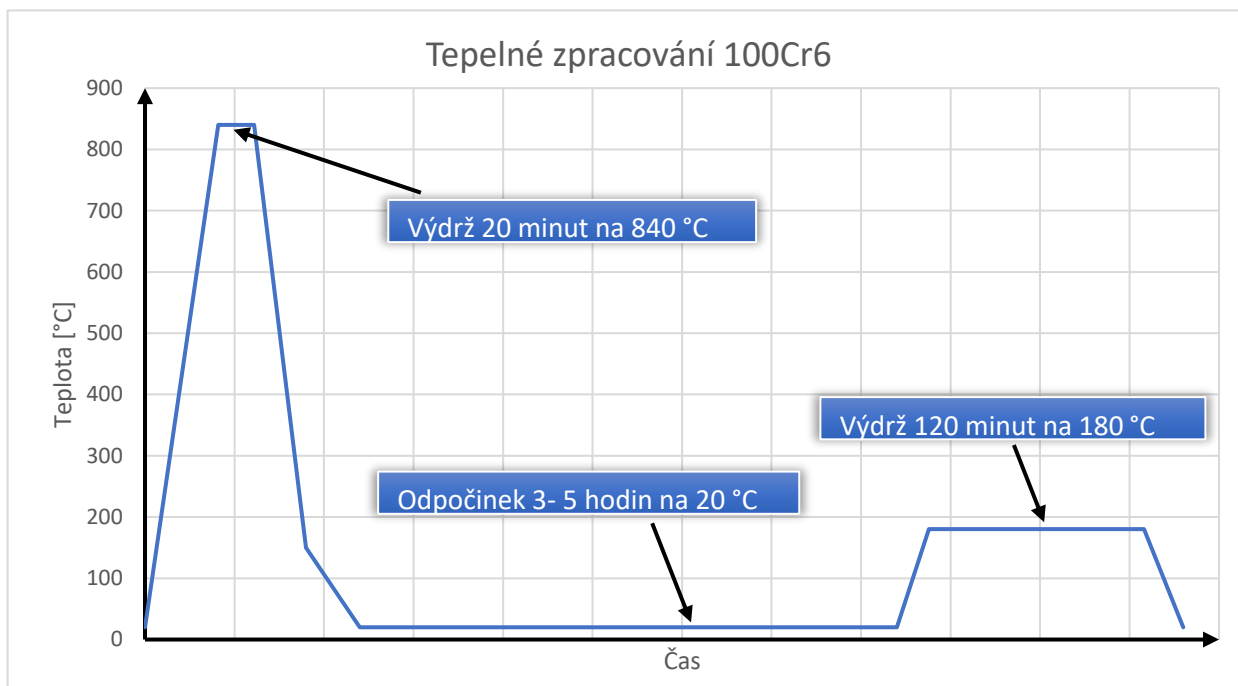
Tab. 10: Značení používané ložiskové oceli dle různých norem

ČSN	EN ISO	AISI	W.Nr.
14 109	100Cr6	52 100	1.3505

Tepelné zpracování pouzder z ložiskové oceli

Výrobky z ložiskové oceli jsou broušeny ve stavu zakaleném a popuštěném za nízké teploty. Dochází k ohřevu na 840 °C, výdrži na této teplotě a následovnému ochlazení na 150 °C s použitím kalicího média ve formě oleje.

Následuje chlazení na vzduchu až na pokojovou teplotu 20 °C a 3–5 hodin odpočinek. Posledním krokem je nízkoteplotní popuštění při teplotě 180 °C po dobu 120 minut.



Obr. 28: Tepelné zpracování vodících pouzder z ložiskové oceli

Průběh zpracování lze sledovat na Obr. 28. Výrobky mají po tepelném zpracování tvrdost v rozmezí 60–63 HRC.

Nerezová ocel

Pro vodící pouzdra z nerezové oceli je používána ocel s označením X90CrMoV18. Jedná se o martenzitickou korozivzdornou ocel se střední odolností vůči korozi.

Tab. 11: Chemické složení oceli X90CrMoV18

Chemické složení [%]							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
0,85-0,95	<0,35	<1,00	<0,040	<0,015	17,0-19,0	0,90-1,30	0,07-0,12

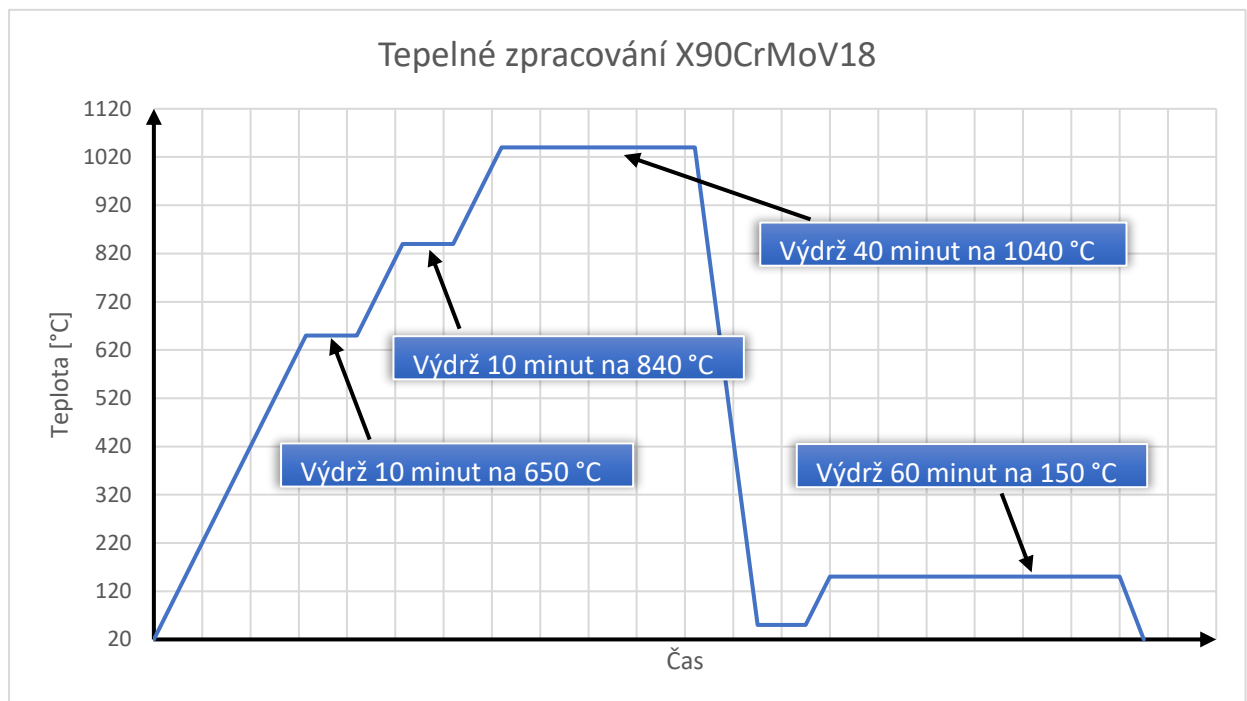
Tab. 12: Značení používané nerezové oceli dle různých norem

ČSN	EN ISO	AISI	W.Nr.
17 151	X90CrMoV18	440B	1.4112

Tepelné zpracování pouzder z nerezové oceli

Vodicí pouzdra z nerezové oceli jsou broušena ve stavu zakaleném a popuštěném za nízké teploty. Dochází k postupnému ohřevu na 1 040 °C, výdrži na této teplotě a poté ochlazení na 50 °C v kalicím médiu ve formě dusíku. Následuje nízkoteplotní popuštění při teplotě 150 °C po dobu 60 minut.

Průběh tepelného zpracování lze sledovat na Obr. 26. Výrobky po tepelném zpracování mají tvrdost v rozmezí 56–58 HRC.



Obr. 29: Tepelné zpracování vodicích pouzder z X90CrMoV18

9.2 Broušící kotouč

Kotouč používaný ve stávajícím procesu je z řady 33VB od firmy 3M™. Jedná se o kotouč z brusnými zrny z bílého korundu pojené zeleným keramickým pojivem. Jedná se o univerzální kotouč pro různá použití.

Tab. 13: Specifikace broušícího kotouče

T1-500x20x203,2 54A120 H15VPMF604W-50M/S		
Druh brusných zrn	54A	Bílý korund se zeleně vypáleným pojivem
Zrnitost	120	Jemný
Tvrдость	H	Měkký
Struktura	15	Porézní
Pojivo	VPMF604W	Keramické pojivo
Maximální obvodová rychlost	50 m.s ⁻¹	
Tvar	T1	Standardní tvar 1
Rozměry (DxTxH)	500x20x203,2	Průměr x Tloušťka x Otvor

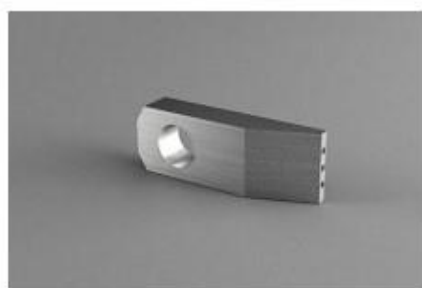


Obr. 30: Broušící kotouč řady 33VB

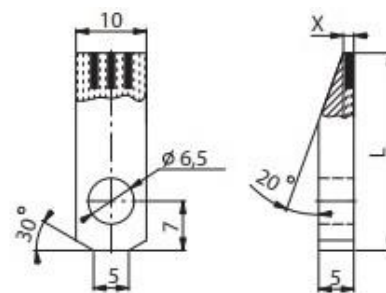
9.3 Orovnávání kotouče

K orovnění broušícího kotouče je používána MKD orovňovací destička typu B1 (L28) dodávána výrobcem DIA-Praha.

V této destičce jsou vsazeny 3 diamantová zrna o rozměrech 0,8 x 0,8 x 7,0, která jsou v destičce orientována diagonálně. Používaná destička je vyznačena ve výňatku z katalogu výrobce na Obr. 31.



TYP B1 (L28) STRANOVÝ
TYP B2 (L33) STRANOVÝ



VARIANTY OSAZENÍ MKD NEBO CVD HRANOLKY

a × b × c	Paralelní P2x	Paralelní P3x	Paralelní P4x	Diagonální D2x	Diagonální D3x	Diagonální D4x
0,4 × 0,4 × 3,0	■ ■	■ ■ ■	■ ■ ■ ■	◆ ◆	◆ ◆ ◆	◆ ◆ ◆ ◆
0,6 × 0,6 × 4,0	■ ■	■ ■ ■	■ ■ ■ ■	◆ ◆	◆ ◆ ◆	◆ ◆ ◆ ◆
0,8 × 0,8 × 4,0	■ ■	■ ■ ■	■ ■ ■ ■	◆ ◆	◆ ◆ ◆	◆ ◆ ◆ ◆
0,8 × 0,8 × 7,0	■ ■	■ ■ ■	■ ■ ■ ■	◆ ◆	◆ ◆ ◆	◆ ◆ ◆ ◆

Obr. 31: Výňatek z katalogu DIA-Praha

Parametry orovnění

Parametry orovňovacího procesu jsou následující:

Pro proces orovnění jsou důležité následující parametry:

a_d – přísuv orovňavače [mm] (nejčastěji 0,005 – 0,02 mm)

b_d – šířka orovňavače [mm]

n_s – otáčky broušícího kotouče [ot.min⁻¹]

v_d – rychlost posuvu orovňavače [mm.min⁻¹]

Tab. 14: Parametry orovňovacího procesu pro konvenční BK

Parametry orovnění	
Přísuv orovňavače a_d [mm]	0,005
Efektivní šířka orovňavače b_d [mm]	1
Otáčky broušícího kotouče n_s [ot.min ⁻¹]	1 340
Rychlost posuvu orovňavače v_d [mm.min ⁻¹]	450

Orovňovací proces je prováděn po každém kuse v případě výroby vodicích pouzder z X90CrMoV18 a po každém druhém vyrobeném kuse v případě 100Cr6.

9.4 Kinematika a řezné síly

Pro broušení je využíván cyklus G9205 Vícenásobný zápich.

Popis cyklu G9205

Tento cyklus spočívá v kombinaci radiálního obvodového broušení a následně axiálního obvodového broušení.

Nejprve je proveden potřebný počet zápichů v závislosti na šířce BK a délce broušeného dílce. Od určitého rozměru dochází k zastavení zápichové operace a dochází k rozbrušování po celé délce s určeným úběrem za účelem dosažení požadovaného povrchu.

Níže je uveden příklad zápisu NC kódu pro vícenásobný zápich a vysvětlení jeho parametrů Tab. 15.

```
G9205 X9,01 Z0 T1 R11 A0,5 B0,0015 C0,005 Q1 D0,7 E0,004 F0,002 I2 J700 W95
```

Po spuštění cyklu dojde k dojetí kotouče rychloposuvem na jmenovitý rozměr + výchozí přídavek (parametr X + A). Poté se aktivuje zapichovací rychlost (parametr D) a dochází k přísuvu kotouče na jmenovitý rozměr + polohu přepínání V/VV (parametr X + B).

Po provedení zápichů v celé délce obrobku dochází k axiálnímu obvodovému broušení s rychlostí axiálního posuvu zadanou parametrem J a s přísuvem zadaným parametrem E.

Po dosažení rozměru zadaného jmenovitým parametrem a polohou přepínání VV/VVV (parametr X + C) dojde ke změně přísuvu na nižší hodnotu zadanou parametrem F.

Po dosažení požadovaného jmenovitého rozměru je proveden požadovaný počet vyjiskřovacích průchodů (parametr I).

Tab. 15: Parametry cyklu G9205

Parametr	Popis parametru	Jednotka
X	Jmenovitý rozměr obrobku	mm
Z	Jmenovitý rozměr Z	mm
T	Označení přední hrany kotouče	-
R	Označení zadní hrany kotouče	-
A	Výchozí přídavek	mm
B	Poloha přepínání V/VV	mm
C	Poloha přepínání VV/VVV	mm
Q	Doba vyjiskření	s
D	Rychlost přířezu	mm/min
E	Hodnota přířezu VV	mm
F	Hodnota přířezu VVV	mm
I	Počet vyjiskřovacích zdvihů	-
J	Rychlost kyvadlového pohybu	mm/min
W	Jmenovitý rozměr Z, pozice 2	mm

Pohyby a rychlosti pohybů

Pohyby a rychlosti jsou definovány v kapitole Kinematika broušení.

Pro proces broušení vodících pouzder jsou parametry zvoleny následovně:

Tab. 16: Parametry kinematiky broušení

Parametr	100Cr6	X90CrMoV18
Řezná rychlost [m.s ⁻¹]	35	35
Otáčky obrobku [ot.min ⁻¹]	450–650	450-650
Rychlost přířezu [mm.min ⁻¹]	0,35	0,25
Rychlost podélného posuvu [mm.min ⁻¹]	700	700
Velikost přířezu VV/VVV [mm]	0,004/0002	0,004/0,002

Řezné síly

Pro získání řezných sil potřebných k zhodnocení několika parametrů efektivnosti byla využita metoda získání řezné síly výpočtem pomocí měrné řezné síly k_c , kdy tento koeficient byl stanoven odhadem pomocí odborné literatury se zohledněním použité technologie, hloubky řezu a vlastností materiálu.

9.5 Stroj

Pro broušení vodících pouzder je využívána univerzální CNC bruska na kulato Studer S31.

Tab. 17: Technická data brusky Studer S31

Technická data	
Vzdálenost mezi hroty	650 mm
Výška hrotů	175 mm
Maximální průměr obrobku	349 mm
Obvodová rychlost kotouče	50 ms ⁻¹
Příkon	26 kW
Otáčky broušícího vřetene	24 000-120 000 min ⁻¹
Otáčky pracovního vřetene	1-1 500 min ⁻¹
Řídicí systém	FANUC Oi-TF



Obr. 32: CNC bruska Studer S31

9.6 Prostředí a řezná kapalina

Proces broušení probíhá v prostředí tvořeném řeznou kapalinou přiváděnou do místa řezu. Momentálně využívanou kapalinou je roztok řezné kapaliny Grindex 10Co a vody.

Jedná se o syntetickou řeznou kapalinu, která má především chladicí, čistící a ochranný účinek. Tato kapalina je mísitelná s vodou a neobsahuje olejové složky. Je vhodná pro broušení litin, ocelí i slinutých karbidů. Je možné ji využívat v rozmezí koncentrace 3–7 %.

Ve firmě Mahr je používán 3,5% roztok kapaliny Grindex s vodou.

10. NASAZENÍ NOVÝCH BROUSICÍCH MATERIÁLŮ A ZMĚNY SYSTÉMU BROUŠENÍ

V této kapitole budou uvedeny změny prvků v systému broušení po zavedení moderních brousicích materiálů.

10.1 Nový brousicí kotouč

Jako nový brousicí kotouč byl zaveden kotouč 3M™ Cubitron II. Materiál Cubitron II a jeho výhody byly popsány v kapitole 5.3.1. Tento brousicí kotouč byl zaveden za účelem snížení výrobních časů, snížení nákladů a zlepšení efektivnosti výroby.

Tab. 18: Specifikace brousicího kotouče Cubitron

T1-500x32x203,2 93DA80/80 H15VPMF601W-50M/S		
Druh brusných zrn	93DA	Precizně tvarované zrna Cubitron II
Zrnitost	80/80	Střední
Tvrдость	H	Měkký
Struktura	15	Porézní
Pojivo	VPMF601W	Keramické pojivo
Maximální obvodová rychlost	50 m.s ⁻¹	
Tvar	T1	Standardní tvar 1
Rozměry (DxTxH)	500x32x203,2	Průměr x Tloušťka x Otvor



Obr. 33: Brousicí kotouč Cubitron II

10.2 Změny v parametrech orovnávaní

Po zavedení kotouče Cubitron parametry orovnávaní zůstaly stejné, změnila se však frekvence orovnávaní. Kotouč je nyní orovnávan po každém čtvrtém kusu v případě broušení ložiskové oceli a po každém, případně každém druhém kusu v případě nerezové oceli.

10.3 Kinematika a řezné síly

Pohyby a rychlosti pohybů

V souvislosti se zavedením broušícího kotouče 3M™ Cubitron II došlo ke změně parametrů kinematiky broušícího procesu. Nové parametry jsou uvedeny v Tab. 19:

Broušící kotouč Cubitron umožnil podstatně zvýšit rychlost přísuvu během zápichové operace, což umožňuje snížení výrobních časů. Parametry rychlosti podélného posuvu a velikosti přísuvu během axiálního broušení zůstaly zachovány za účelem dosažení požadované jakosti povrchu.

Tab. 19: Nové parametry kinematiky broušení

Parametr	100Cr6	X90CrMoV18
Řezná rychlost [m.s ⁻¹]	35	35
Otáčky obrobku [ot.min ⁻¹]	450–650	450-650
Rychlost přísuvu [mm.min ⁻¹]	0,7	0,55
Rychlost podélného posuvu [mm.min ⁻¹]	700	700
Velikost přísuvu VV/VVV [mm]	0,004/0002	0,004/0,002

Řezné síly

Pro stanovení řezných sil byla použita stejná metoda jako v případě předchozího procesu. Zvýšení rychlosti přísuvu mělo za následek zvýšení řezných sil. Tento nárůst by však ve skutečnosti neměl být tak markantní z důvodu lepší řezivosti kotouče Cubitron II, což by mělo vést k nižším řezným silám. Použitá metoda určení řezných sil však tuto skutečnost nebere v potaz.

11. EFEKTIVNOST BROUSICÍHO PROCESU

Efektivnost brousicího procesu je kvantifikována pomocí ukazatelů zavedených v kapitole 2.6: Efektivnost procesu.

Sledovanými charakteristikami byly:

- Q_s – Rychlost opotřebení brousicího kotouče
- e_c – Měrná energie broušení
- Q_w – Objemový výkon
- G – Brusný poměr
- η – Součinitel účinnosti broušení

Tyto ukazatele byly zpracovány pro přehlednost v samostatných kapitolách pro vodící pouzdra z ložiskové oceli 100Cr6 a zvláště pro vodící pouzdra z nerezové oceli X90CrMoV18.

Za účelem získání výsledků, které co nejlépe reflektují proces broušení v podniku, byla jako velikost vzorku, pro které byly ukazatele porovnávány, stanovena průměrná velikost výrobní dávky daných výrobků. Ty lze najít v Tab. 20, respektive Tab. 21.

Tab. 20: Průměrná velikost dávky pro vodící pouzdra 100Cr6

Číslo výrobku	1	2	3	4	5
Velikost dávky	207	252	535	180	131

Tab. 21: Průměrná velikost dávky pro vodící pouzdra X90CrMoV18

Číslo výrobku	1	2	3	4	5
Velikost dávky	207	252	535	180	131

11.1 Efektivnost při broušení ložiskové oceli

Tab. 22: Parametry efektivnosti při broušení 100Cr6 s použitím klasického kotouče

Parametr	Rychlost opotřebení	Objemový výkon	Měrná energie broušení	Brusný poměr	Součinitel účinnosti broušení
Číslo výrobku	$Q_s[\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	$Q_w[\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	$e_c[\text{J} \cdot \text{mm}^{-3}]$	G [-]	$\eta [\text{mm}^3 \cdot \text{J}^{-1}]$
1	1,360	0,767	1864	0,564	0,0003
2	0,540	5,604	1866	10,371	0,006
3	1,181	1,309	2257	1,108	0,0005
4	1,117	1,967	1877	1,763	0,0009
5	0,860	4,391	993	4,906	0,005

Tab. 23: Parametry efektivnosti při broušení 100Cr6 s kotoučem 3M™ Cubitron II

Parametr	Rychlost opotřebení	Objemový výkon	Měrná energie broušení	Brusný poměr	Součinitel účinnosti broušení
Číslo výrobku	$Q_s[\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	$Q_w[\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	$e_c[\text{J} \cdot \text{mm}^{-3}]$	G [-]	$\eta [\text{mm}^3 \cdot \text{J}^{-1}]$
1	0,965	1,088	2627	1,127	0,0004
2	0,373	7,744	2699	20,742	0,008
3	0,871	1,930	3061	2,216	0,0007
4	0,803	2,829	2610	3,525	0,0013
5	0,703	6,900	1264	9,811	0,008

11.2 Efektivnost při broušení nerezové oceli

Tab. 24: Parametry efektivnosti při broušení X90CrMoV18 s použitím klasického kotouče

Parametr	Rychlost opotřebení	Objemový výkon	Měrná energie broušení	Brusný poměr	Součinitel účinnosti broušení
Číslo výrobku	$Q_s[\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	$Q_w[\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	$e_c[\text{J} \cdot \text{mm}^{-3}]$	G [-]	$\eta [\text{mm}^3 \cdot \text{J}^{-1}]$
1	0,641	5,098	590	7,951	0,0134
2	0,626	5,322	1250	8,504	0,0068
3	0,672	5,906	916	8,789	0,0096
4	1,093	2,311	1873	2,115	0,0011
5	1,404	0,935	2917	0,666	0,0002

Tab. 25: Parametry efektivnosti při broušení X90CrMoV18 s kotoučem 3M™ Cubitron II

Parametr	Rychlost opotřebení	Objemový výkon	Měrná energie broušení	Brusný poměr	Součinitel účinnosti broušení
Číslo výrobku	$Q_s[\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	$Q_w[\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	$e_c[\text{J} \cdot \text{mm}^{-3}]$	G [-]	$\eta [\text{mm}^3 \cdot \text{J}^{-1}]$
1	0,649	7,654	865	11,794	0,0136
2	0,625	7,896	1733	12,635	0,0073
3	0,696	9,087	1304	13,058	0,01
4	1,112	3,510	2713	3,157	0,0012
5	1,668	1,667	2499	0,999	0,0004

11.3 Zhodnocení efektivity

Byly získány parametry efektivity pro průměrnou velikost dávky pro původní a nově zavedený kotouče a poté porovnány mezi sebou z hlediska efektivity.

Pro přehlednost jsou tyto parametry mezi sebou porovnány a uvedeny v tabulce níže ve formě procentuální změny oproti předchozímu stavu. Zeleně jsou vyznačeny parametry, které znamenají zlepšení, červeně naopak zhoršení.

Tab. 26: Porovnání efektivity po zavedení Cubitronu II pro 100Cr6

Číslo výrobku	Rychlost opotřebení	Objemový výkon	Měrná energie broušení	Brusný poměr	Součinitel účinnosti broušení	Čas broušení
1	-29.0 %	41.9 %	40.9 %	99.8 %	33.3 %	-29.5 %
2	-30.9 %	38.2 %	44.6 %	100.0 %	33.3 %	-27.6 %
3	-26.2 %	47.4 %	35.6 %	100.0 %	40.0 %	-32.2 %
4	-28.1 %	43.8 %	39.1 %	99.9 %	44.4 %	-30.5 %
5	-18.3 %	57.1 %	27.3 %	100.0 %	60.0 %	-36.4 %
∅	-26.5 %	45.7 %	37.5 %	99.9 %	42.2 %	-31.2 %

Z této tabulky je patrné, že rychlost opotřebení klesla v průměru o 26,5 %, zatímco objemový výkon vzrostl o 45,7 %, což znamená brusný poměr G téměř o 100% lepší oproti předchozímu kotouči. Měrná energie broušení sice v průměru vzrostla o 37,5 %, ovšem součinitel účinnosti vzrostl v průměru o 42,2 % a čas broušení byl snížen v průměru o 31,2 %.

Tab. 27: Porovnání efektivnosti po zavedení Cubitronu II pro X90CrMoV18

Číslo výrobku	Rychlost opotřebení	Objemový výkon	Měrná energie broušení	Brusný poměr	Součinitel účinnosti broušení	Čas broušení
1	1.2 %	50.1 %	46.6 %	48.3 %	1.5 %	-33.4 %
2	-0.2 %	48.4 %	38.6 %	48.6 %	7.4 %	-32.6 %
3	3.6 %	53.9 %	42.4 %	48.6 %	4.2 %	-35.0 %
4	1.7 %	51.9 %	44.8 %	49.3 %	9.1 %	-34.2 %
5	18.8 %	78.3 %	-14.3 %	50.0 %	100.0 %	-43.9 %
∅	5.0 %	56.5 %	31.6 %	48.9 %	24.4 %	-35.8 %

U broušení X90CrMoV18 lze u Cubitronu II pozorovat zhoršení v průměru o 5,0 % z hlediska rychlosti opotřebení, ovšem objemový výkon vzrostl o 56,5 % a brusný poměr je lepší o 48,9 %. Měrná energie broušení je, podobně jako u 100Cr6, vyšší při využití Cubitronu II. Došlo také ke zlepšení součinitele účinnosti broušení a výraznému zlepšení času broušení.

V obou případech používání Cubitronu II lze sledovat výrazné zlepšení brusného poměru a snížení výrobních časů.

Měrná energie broušení je v obou případech vyšší, ovšem metoda, kterou byly odhadnuty řezné síly nedokáže vzít v potaz definovanou geometrii zrna Cubitron II, která by měla pozitivně ovlivňovat velikost řezných sil. Pro získání přesnějších výsledků by bylo vhodné využít přímé měření sil, ovšem získávání dat probíhalo souběžně s běžnou výrobou v podniku a přímé měření by bylo obtížně realizovatelné.

12. EKONOMICKÁ ANALÝZA

Jelikož kotouče se výrazně liší pořizovací cenou, byla provedena také ekonomická analýza za účelem stanovení nákladů v případě obou kotoučů a posouzení výhodnost kotoučů vzhledem k objemu výroby.

Tato analýza vycházela z interních dat prodaných kusů, výrobních časů a hodinové sazby z minulých let.

Byl stanoven průměrný čas na výrobek a určeny průměrné výrobní náklady na jeden výrobek. To pak bylo společně s pořizovací cenou BK promítnuto do celkových a průměrných nákladů.

Dále bylo provedeno srovnání kotoučů z hlediska životnosti.

12.1 Stanovení nákladů při broušení ložiskové oceli

Tab. 28: Porovnání výrobních nákladů při broušení 100Cr6

Porovnání nákladů na výrobu		
Parametry	Konvenční kotouč	Cubitron II
Počet vyrobených kusů za rok	31 604	31 604
Pořizovací cena kotouče	7 239 Kč	15 596 Kč
Průměrný výrobní čas jednoho kusu v minutách	3,7	2,2
Průměrný čas v hodinách	0,062	0,036
HRS	626 Kč	626 Kč
Náklady na 1 vyrobený díl	38,5 Kč	22,6 Kč

Tyto hodnoty byly poté použity pro stanovení celkových a průměrných nákladů a stanovení případného bodu zratu nákladů (množství, při kterém se náklady rovnají, dále pouze BEP).

Pro stanovení celkových nákladů a průměrných nákladů byly použity následující rovnice:

$$CN = FN + VN \cdot q \quad (12.1)$$

$$PN = \frac{CN}{q} = \frac{FN}{q} + VN \quad (12.2)$$

kde:

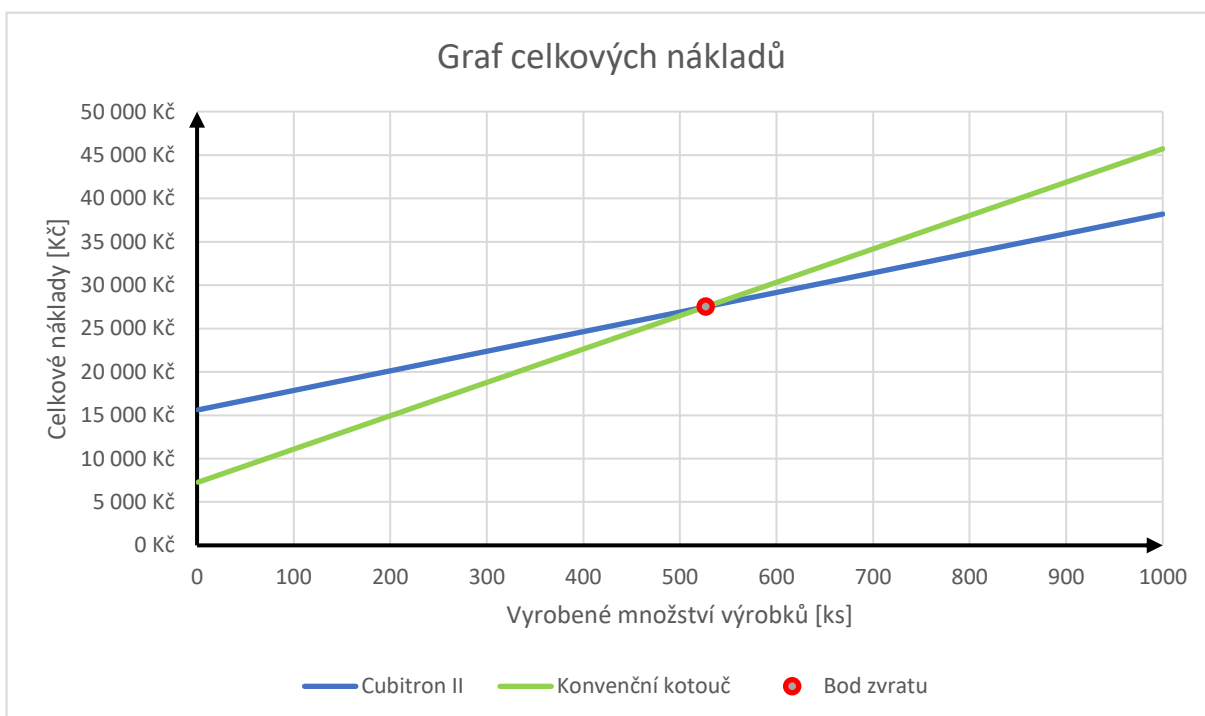
CN – celkové náklady [Kč]

FN – fixní náklady [Kč] (v tomto případě pořizovací cena kotouče)

VN – variabilní náklady [Kč]

q – množství

Na základě těchto dat byl sestaven graf celkových nákladů, ve kterém je vyznačen BEP.



Obr. 34: Graf celkových nákladů při broušení 100Cr6

BEP byl pro výrobu 100Cr6 určen v počtu 527 kusů. Znamená to, že potřebný objem výroby vodících pouzder činí 527 kusů, poté budou celkové náklady na výrobu nižší s použitím kotouče Cubitron II než v případě kotouče konvenčního.

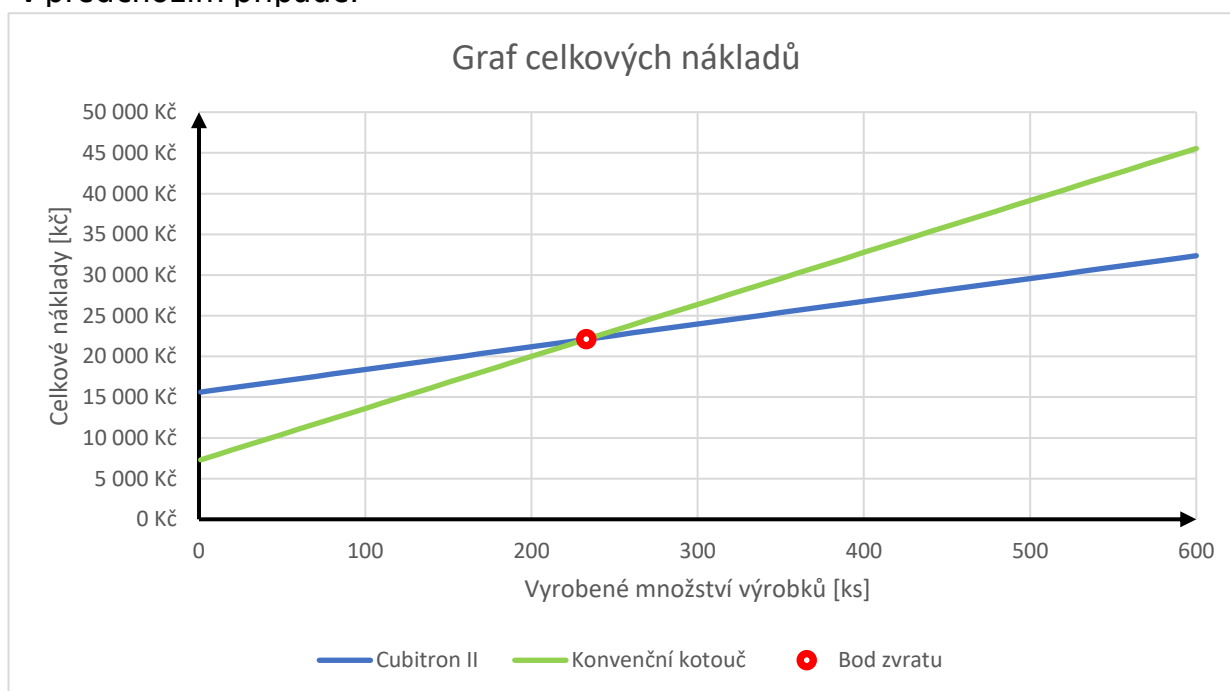
Průměrné náklady v případě 527 kusů činí 52,19 Kč v případě Cubitronu II a 52,21Kč v případě konvenčního kotouče.

12.2 Stanovení nákladů při broušení nerezové oceli

Tab. 29: Porovnání výrobních nákladů při broušení X90CrMoV18

Porovnání nákladů na výrobu		
	Konvenční kotouč	Cubitron II
Počet vyrobených kusů za rok	6 432	6 432
Požizovací cena kotouče	7 239 Kč	15 596 Kč
Průměrný výrobní čas jednoho kusu v minutách	6,1	2,7
Průměrný čas v hodinách	0,102	0,045
HRS	626 Kč	626 Kč
Náklady na 1 vyrobený díl	63,9 Kč	28,0 Kč

Celkové náklady, průměrné náklady a BEP byly stanoveny stejně jako v předchozím případě.



Obr. 35: Graf celkových nákladů při broušení X90CrMoV18

BEP byl pro výrobu X90CrMoV18 určen v počtu 233 kusů. Znamená to, že potřebný objem výroby vodicích pouzder činí 233 kusů, poté budou celkové náklady na výrobu nižší s použitím kotouče Cubitron II než v případě kotouče konvenčního.

Průměrné náklady v případě 233 kusů činí v obou případech 94,9 Kč, pro větší počet kusů jsou průměrné náklady kotouče Cubitron II nižší než u konvenčních.

12.3 Životnost kotouče

Druhá úvaha v rámci srovnání ekonomické výhodnosti kotoučů byla provedena se zohledněním teoretické a reálné životnosti kotoučů. Podle minimálního použitelného průměru kotouče byl určen maximální možný počet orovnáání. Z nastavení procesu orovnáání byl určen počet vyrobených kusů na jedno orovnáání, z dat z minulých let byl pomocí průměrného počtu dávek a počtu vyrobených kusů stanoven počet orovnáání za rok (bylo uvažovááno orovnáání před každou dávkou). Pomocí těchto dat byla určena teoretická životnost kotouče a ta byla porovnáána se skutečnou životností kotouče v podniku.

Tab. 30: Porovnáání parametrů životnosti pro jednotlivé BK

	Konvenční kotouč		Cubitron II	
	100Cr6	X90CrMoV18	100Cr6	X90CrMoV18
Počet orovnáání	40 000		40 000	
Vyrobenaých ks na 1 orovnáání	2	1	4	1-2
Počet ks za rok	31 604	6 432	31 604	6 432
Počet dávek za rok	460	191	460	191
Počet orovnáání za rok	22 885		12 840	
Teoretická životnost v ks	66 482		118 492	
Skutečná životnost	9 509		9 509	
Cena kotouče	7 239 Kč		15 596 Kč	
Teoretické náklady na 1 ks	0,11 Kč		0,13 Kč	
Skutečné náklady na 1 ks	0,76 Kč		1,64 Kč	

13. ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývala tématem broušení a nových brousících materiálů. Práce v teoretické části obsahuje charakteristiku procesu broušení a jeho jednotlivých prvků, především pak rozdělení a popisem brousících materiálů konvenčních, supertvrdých a progresivních. Dále práce obsahuje úvod do integrity povrchu, jednotlivé metody broušení, principy opotřebení a ostření brousících kotoučů a rozdělení požadované vlastnosti řezných kapalin.

Progresivní brousící materiály vznikly jako důsledek snahy o vyvinutí materiálu, který by předčil konvenční materiály z hlediska výkonu se zachováním co nejnižší ceny. Tyto materiály se vyznačují poměrně vysokou tvrdostí oproti konvenčním materiálům a dále především možností ovlivnění mikrostruktury zrn, případně možností ovlivnění tvaru brousícího zrna. Řadí se mezi ně brousící materiály SG, TG a DG, vyvinuté firmou Norton spadající pod skupinu Saint-Gobain. Mezi další progresivní materiály se řadí také Cubitron a Cubitron II vyvinuté americkou firmou 3M (Minnesota Mining and Manufacturing Company). Do skupiny nových brousících materiálů se řadí také brousící zrna, jejichž vlastnosti jsou ovlivněny legováním. Mezi tyto materiály se řadí například brousící zrno Abral.

Praktická část probíhala ve vybraném podniku Mahr, spol. s r.o. a hlavním cílem bylo provedení analýzy systému broušení a porovnání z hlediska z efektivnosti před zavedením a po zavedení brousících kotoučů Cubitron II.

V rámci volby výrobních představitelů byla využita Paretova analýza, pomocí které bylo určeno 10 představitelů (5 pro vodící pouzdra z ložiskové oceli a 5 pro vodící pouzdra z nerezové oceli), pro které byly určeny a porovnány parametry efektivnosti s využitím jednotlivých druhů brousících kotoučů.

Zavedení kotouče Cubitron II mělo za následek zvýšení objemového výkonu o 45,7 % u ložiskové oceli a o 56,5 % u nerezové oceli, což vedlo ke snížení výrobních časů v průměru o 31,2 % u ložiskové oceli a o 35,8 % u nerezové oceli.

V rámci ekonomické analýzy byl porovnán vliv zavedení kotouče Cubitron II na průměrné náklady s přihlédnutím k časové náročnosti výrobku, hodinové režijní sazbě, životnosti a pořizovací ceně BK. Pro broušení ložiskové oceli byly náklady na 1 díl vycházející z hodinové režijní sazby pracoviště a času výroby,

stanoveny na 38,5 Kč pro konvenční kotouč a na 22,6 Kč pro Cubitron II. Pro nerezovou ocel byly náklady na 1 díl vycházející z hodinové režijní sazby pracoviště a času výroby stanoveny na 63,9 Kč pro konvenční kotouč a na 28 Kč pro Cubitron II. Náklady na nástroj, tedy broušící kotouč, vycházející ze skutečné životnosti kotouče jsou 0,76 Kč na jeden vyrobený díl pro konvenční kotouč a 1,64 Kč pro Cubitron II.

Podstatná část nákladů na vyrobený kus je tedy tvořena hodinovou režijní sazbou pracoviště a nasazení broušících materiálů umožňuje snižování výrobních nákladů díky výraznému snížení výrobních časů. Dalším efektem je navýšení volné výrobní kapacity, která může být využita pro zvýšení produkce, či zařazení dalších produktů do výrobního programu společnosti.

Nasazení nových broušících materiálů otevírá prostor pro systematickou optimalizaci technologie broušení z hlediska produktivity za účelem dalšího snížení výrobních časů a nákladů s nimi spojenými.

Bibliografie

- [1] KOČMAN, Karel a Univerzita INŽENÝRSTVÍ. *Technologické procesy obrábění*. Vyd. 1. Brno: CERM, 2011, . ISBN 978-80-7204-722-2.
- [2] MARINESCU, Ioan, Mike HITCHINER, Eckart UHLMANN, W. ROWE a Ichiro INASAKI. *Handbook of Machining with Grinding Wheels*. Second Edition. Boca Raton: CRC Press, 2016. ISBN 978-0-367-86870-3.
- [3] HUMÁR, Anton. *TECHNOLOGIE I: TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 3. část*. Vysoké učení technické v Brně - Fakulta strojírenského inženýrství - Ústav strojírenské technologie, 2005.
- [4] MASLOV, J. N. *Teorie broušení kovů*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství techn. lit., 1979.
- [5] ROWE, W. Brian. *Principles of modern grinding technology*. 2nd ed. Amsterdam: William Andrew, 2014. ISBN 978-0-323-24271-4.
- [6] JACKSON, Mark a Michael HITCHINER. *High Performance Grinding and Advanced Cutting Tools* [online]. New York, NY: Springer New York, 2013 [cit. 2022-10-11]. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology. ISBN 978-1-4614-3115-2. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4614-3116-9
- [7] BEAUCAMP, Anthony, Benjamin KIRSCH a Wule ZHU. Advances in grinding tools and abrasives. *CIRP Annals* [online]. 2022, **71**(2), 623-646 [cit. 2022-10-11]. ISSN 00078506. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirp.2022.05.003
- [8] KING, Robert a Robert HAHN. *Handbook of Modern Grinding Technology*. New York: Chapman and Hall, 1986. ISBN 978-1-4612-9167-1.
- [9] BRYCHTA, Josef. *Technologie II- 2. díl*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2007-2008. ISBN 978-80-248-1822-1.
- [10] ČSN ISO 525. *Pojené broušící nástroje - Obecné požadavky*. Čtvrté vydání. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [11] VASILKO, Karol a Givi BOKUČAVA. *Brúsenie kovových materiálov*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1988, . Dostupné také z: <https://go.exlibris.link/OflfbmbD>

- [12] ROWE, W. Brian. *Modern Grinding Techniques*. Salem: Scrivener Publishing LLC, 2010. ISBN 978-0-470-88231-3.
- [13] NECKÁŘ, Ferdinand a Ivo KVASNIČKA. *Vybrané statě z úběru materiálu*. Vyd. 1. Vyd. 1. Praha: Editační středisko ČVUT, 1991, 88 s. ISBN 80-010-0696-4.
- [14] PITRMUC, Zdeněk. *Kvalita povrchové vrstvy: Výzkum vybraných parametrů integrity povrchu při obrábění materiálů leteckého průmyslu*. Praha, 2022. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní.
- [15] ČSN EN ISO 21920-2. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Struktura povrchu: Profil - Část 2: Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2022.
- [16] *Diamantové a CBN nástroje 3M™*. 3M Divize brusných systémů. 2017.
- [17] WENTORF, R. H. Synthesis of the Cubic Form of Boron Nitride. *The Journal of Chemical Physics* [online]. 1961, **34**(3), 809-812 [cit. 2023-02-28]. ISSN 0021-9606. Dostupné z: doi:10.1063/1.1731679
- [18] HOLEŠOVSKY, Frantisek, Martin BARTOS, Milan DIAN a Jan ŘEHORŤ. Application of New Abrasives and their Quality Parameters. *Solid State Phenomena* [online]. 2017, **261**, 181-188 [cit. 2022-10-11]. ISSN 1662-9779. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.261.181
- [19] WEBSTER, J. a M. TRICARD. Innovations in Abrasive Products for Precision Grinding. *CIRP Annals* [online]. 2004, **53**(2), 597-617 [cit. 2022-10-11]. ISSN 00078506. Dostupné z: doi:10.1016/S0007-8506(07)60031-6
- [20] *Konvenční brusné kotouče 3M™*. 3M Česko, spol. s.r.o., 2015.
- [21] *Handbook Cylindrical Grinding*. 3M Abrasive System Division. 2014.
- [22] LINDSAY, Richard P. The Performance of Seeded Gel Abrasives in the Laboratory and at Customer Test Sites. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology* [online]. 1989, **61**(10), 20-26 [cit. 2023-04-20]. ISSN 0002-2667. Dostupné z: doi:10.1108/eb036854
- [23] *Diamantové nástroje a brusivo*. DIA Praha. 2016.

Seznam tabulek

Tab. 1: Zrnitost [10].....	16
Tab. 2: Vliv a účinek na povrchovou vrstvu [14]	28
Tab. 3: Značení základních druhů brusiva u konvenčních BK [10].....	50
Tab. 4: Označení zrnitosti brousicích kotoučů [10]	50
Tab. 5: Značení stupně tvrdosti brousicích kotoučů [10]	50
Tab. 6: Typy pojiva konvenčních brousicích kotoučů [10].....	51
Tab. 7: Stupně překrytí pro různé druhy broušení [21]	55
Tab. 8: Příklad na broušení v závislosti na průměru vodícího pouzdra.....	64
Tab. 9: Chemické složení oceli 100Cr6	64
Tab. 10: Značení používané ložiskové oceli dle různých norem.....	64
Tab. 11: Chemické složení oceli X90CrMoV18	65
Tab. 12: Značení používané nerezové oceli dle různých norem	66
Tab. 13: Specifikace brousicího kotouče	67
Tab. 14: Parametry orovnávacího procesu pro konvenční BK	68
Tab. 15: Parametry cyklu G9205	70
Tab. 16: Parametry kinematiky broušení	70
Tab. 17: Technická data brusky Studer S31	71
Tab. 18: Specifikace brousicího kotouče Cubitron	73
Tab. 19: Nové parametry kinematiky broušení	74
Tab. 20: Průměrná velikost dávky pro vodící pouzdra 100Cr6	75
Tab. 21: Průměrná velikost dávky pro vodící pouzdra X90CrMoV18.....	75
Tab. 22: Parametry efektivnosti při broušení 100Cr6 s použitím klasického kotouče	76
Tab. 23: Parametry efektivnosti při broušení 100Cr6 s kotoučem 3M™ Cubitron II	76
Tab. 24: Parametry efektivnosti při broušení X90CrMoV18 s použitím klasického kotouče	77
Tab. 25: Parametry efektivnosti při broušení X90CrMoV18 s kotoučem 3M™ Cubitron II.....	77
Tab. 26: Porovnání efektivnosti po zavedení Cubitronu II pro 100Cr6.....	78
Tab. 27: Porovnání efektivnosti po zavedení Cubitronu II pro X90CrMoV18.....	79

Tab. 28: Porovnání výrobních nákladů při broušení 100Cr6.....	80
Tab. 29: Porovnání výrobních nákladů při broušení X90CrMoV18	82
Tab. 30: Porovnání parametrů životnosti pro jednotlivé BK	84

Seznam obrázků

Obr. 1: Základní prvky systému broušení (upraveno dle [2])	14
Obr. 2: Konvexnost (upraveno dle [6]).....	16
Obr. 3: Mechanismy odebrání materiálu [2]	17
Obr. 4: Mechanismus tvorby třísky u houževnatých materiálů (upraveno dle [2])	18
Obr. 5: Mechanismus tvorby třísky u křehkých materiálů (upraveno dle [2]).....	19
Obr. 6: Rozložení sil při vnějším obvodovém broušení [9]	21
Obr. 7: Rozdělení vzniklého tepla při broušení (upraveno dle [5]).....	25
Obr. 8: Teploty obrobku: a) stykové teploty a b) okamžité teploty v místech dotyku zrn (upraveno dle [5])	26
Obr. 9: Postup získání P-profilu, W-profilu a R-profilu [15].....	30
Obr. 10: Charakteristické průběhy mikrotvrdosti [14].....	31
Obr. 11: Rozdělení metod broušení [1]	35
Obr. 12: Metody obvodového broušení [9]	36
Obr. 13: Metody čelního broušení [9].....	36
Obr. 14: Hloubkové broušení [9].....	37
Obr. 15: Zrna DG [22]	46
Obr. 16: Trojúhelníková zrna Cubitronu II [21]	46
Obr. 17: Porovnání brusných zrn z hlediska ceny a výkonu [20].....	47
Obr. 18: Minimální požadované údaje pro označení brousících kotoučů [10]	49
Obr. 19: Rozdělení údajů specifikační značky [10].....	49
Obr. 20: 3 typy opotřebení BK (upraveno dle [2])	52
Obr. 21: Mechanismy opotřebení brusného zrna (upraveno dle [6]).....	54
Obr. 22: Druhy orovnávačů [23].....	56
Obr. 23: Hlavní požadované vlastnosti procesních kapalin [1]	57
Obr. 24: Rozdělení procesních kapalin [2].....	58
Obr. 25: Paretova analýza pro stav výroby vodicích pouzder z oceli 100Cr6	61
Obr. 26: Paretova analýza pro stav výroby vodicích pouzder z oceli X90CrMoV18	62
Obr. 27: Příklad vodicího pouzdra	63
Obr. 28: Tepelné zpracování vodicích pouzder z ložiskové oceli	65

Obr. 29: Tepelné zpracování vodících pouzder z X90CrMoV18.....	66
Obr. 30: Broušící kotouč řady 33VB.....	67
Obr. 31: Výňatek z katalogu DIA-Praha.....	68
Obr. 32: CNC bruska Studer S31	71
Obr. 33: Broušící kotouč Cubitron II	73
Obr. 34: Graf celkových nákladů při broušení 100Cr6	81
Obr. 35: Graf celkových nákladů při broušení X90CrMoV18.....	82