

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2024

**BÁRA
PAJEROVÁ**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Pajerová** Jméno: **Bára** Osobní číslo: **501467**
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:

Rovinné broušení nástrojových ocelí

Název bakalářské práce anglicky:

Surface grinding of tool steel parts

Pokyny pro vypracování:

- 1) Rozbor technologie broušení rovinných ploch – strategie, řezné podmínky, kinematika strojů
- 2) Materiály brousících kotoučů – přehled a doporučení pro nástrojové oceli
- 3) Poměrové ukazatele, analytické vztahy, metodika pro hodnocení procesu
- 4) Návrh experimentu, porovnání brousících kotoučů

Seznam doporučené literatury:

Handbook of Modern Grinding Technology, Robert I. King , Robert S. Hahn
MASLOV, Je. N., 1979. Teorie broušení kovů. Praha: Státní nakladatelství technické literatury. ISBN Teorie broušení kovů.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Zdeněk Pitrmuc, 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: **08.04.2024** Termín odevzdání bakalářské práce: **05.08.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Zdeněk Pitrmuc, 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

Studentka bere na vědomí, že je povinna 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 studentky

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracovala samostatně pod vedením Ing. Zdeňka Pitrmuce, 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, vydaných 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

Ráda bych poděkovala vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Zdeňku Pitrmucovi, Ph.D., za trpělivost, vstřícné jednání, obětování svého času a odborné vedení během uskutečňování mé závěrečné práce.

Děkuji i své rodině, která při mně stála během studia a nepřestala mě nikdy podporovat.

Anotace

Cílem této bakalářské práce je seznámení se s rovinným broušením nástrojových ocelí. V teoretické části práce se rozebírá princip broušení, doporučený postup pro volbu brusného nástroje a správného zajištění brusného prostředí.

V experimentální části se vyhodnocují dva různé brusné kotouče, které jsou podrobeny různým řezným podmínkám rovinného broušení. Vyhodnocení je založeno na úběru objemu brusného kotouče a celkových finančních nákladů.

Název diplomové práce:	Rovinné broušení nástrojových ocelí
Autor práce:	Bára Pajerová
Vedoucí práce:	Ing. Zdeněk Pitrmuc, Ph.D.
Akademický rok:	2023/2024
Vysoká škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	12134 - Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Vedoucí ústavu:	Ing. Libor Beránek, Ph.D.
Rozsah práce:	51 stránek, 13 tabulek, 24 obrázků, 6 grafů
Klíčová slova:	Broušení, rovinné broušení, brusné kotouče, nástrojové oceli, pracovní podmínky

Annotation

This bachelor's thesis goal is to introduce the reader to the surface grinding of tool steel parts. The theoretical part of this thesis analyzes the principles of grinding, recommended process of grinding tool selection and ways to ensure correct grinding environment.

The experimental part of the thesis evaluates two different grinding wheels which are subjected to surface grinding under different cutting conditions. The evaluation is based on reduction of the grinding wheel volume and the total costs.

Title of the final thesis:	Surface grinding of tool steel parts
Author:	Bára Pajerová
Supervisor:	Ing. Zdeněk Pitrmuc, Ph.D.
Academic year:	2023/2024
University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	12134 – Department of Machining Technology, Process Planning a Metrology
Head of department:	Ing. Libor Beránek, Ph.D.
Extent:	51 pages, 13 tables, 24 pictures, 6 charts
Keywords:	grinding, surface grinding, grinding wheels, tool steel, cutting conditions

Obsah

1. Úvod	9
2. Strategie broušení.....	10
2.1 Podstata metody	10
2.2 Rozdělení druhů broušení	11
2.2.1 Broušení rotačních ploch	11
2.2.2 Broušení rovinných ploch	12
2.3 Volba broušicího nástroje	13
2.3.1 Značení broušicích kotoučů	13
2.3.2 Druh broušicího materiálu.....	14
2.3.3 Zrnitost broušicího materiálu.....	16
2.3.4 Tvrdost nástroje	16
2.3.5 Struktura nástroje	16
2.3.6 Pojivo nástroje	17
2.4 Upínání broušicího nástroje	18
2.5 Orovnávání broušicího kotouče.....	19
2.6 Řezné prostředí	19
2.6.1 Technologické požadavky na řezná média	20
2.6.2 Řezné kapaliny.....	21
2.7 Řezné podmínky rovinného broušení.....	21
2.7.1 Vliv podmínek broušení na drsnost broušeného povrchu	24
3. Kinematika rovinného broušení	25
3.1 Ekvivalentní tloušťka třísky.....	25
3.2 Řezné síly.....	26
3.3 Jednotkový strojní čas.....	28
4. Poměrové ukazatele.....	29
5. Charakteristika a rozdělení NO	31
6. Popis experimentální části	32
6.2 Postup měření.....	32
6.2.1 Brusný kotouč 3M CUBITRON	35
6.2.2 Brusný kotouč Tyrolit strato ultra.....	38
6.3 Vypočtené hodnoty	41
6.3.1 Objem odebraného materiálu z brusného kotouče	41
6.3.2 Stykový úhel brusného kotouče a obráběného materiálu	42
6.3.3 Délka stykového oblouku broušicího kotouče s obrobkem	42
6.3.4 Strojní čas	43

6.3.5 Ekvivalentní tloušťka třísky	44
6.4 Ekonomické vyhodnocení	45
7. Závěr	47
Seznam literatury	48
Seznam obrázků	50
Seznam tabulek	51
Seznam grafů	51

1. Úvod

Technologie broušení se řadí mezi dokončovací operace obrábění, které se využívají již stovky let. Dříve se využívala brusiva běžně nacházená v přírodě, jako například křemík, a sloužila k naostření pracovních nástrojů. Značný pokrok v teorii broušení nastal roku 1859, kdy došlo k vynálezu umělého broušícího kotouče a roku 1860, kdy se sestrojily první univerzální brusky. Po těchto hojných letech ohledně objevování technologie broušení a jejího neustálého zdokonalování umožnilo, že se broušení stalo jedním z nejproduktivnějších procesů přesného obrábění. [1]

Nalezení přírodních diamantů v přírodě umožnilo výrobu diamantových broušících nástrojů, které se využívaly nejdříve pro broušení břitů ze slinutých karbidů. O několik let později začala výroba broušících kotoučů s brusnými zrny z materiálu kubického nitridu boru, které umožnilo brousit efektivně železné materiály a specificky vysokolegované oceli. Broušením s vysokými rychlostmi, posuvy a použití moderních brusných materiálů se zajistí rychlost výroby a dosažení vysoké kvality broušeného povrchu za nízké náklady. [1]

Tato práce začíná seznámením s technologií broušení, kde je zpočátku jednoduše vysvětlen její princip a ukázka, jak dochází k jednotlivému úběru materiálu. Dále jsou rozepsány různé druhy způsoby broušení, které se využívají pro jednotlivé tvary polotovarů. Pro efektivní broušení je nesmírně důležité zvolit správný tvar brusného kotouče s požadujícími vlastnostmi, mezi které spadá například volba brusného materiálu, typ pojiva nebo zrnitost. Mezi další podmínky, které jsou nutné pro efektivní broušení je zajištění dostatečného a správného přívodu rezné kapaliny.

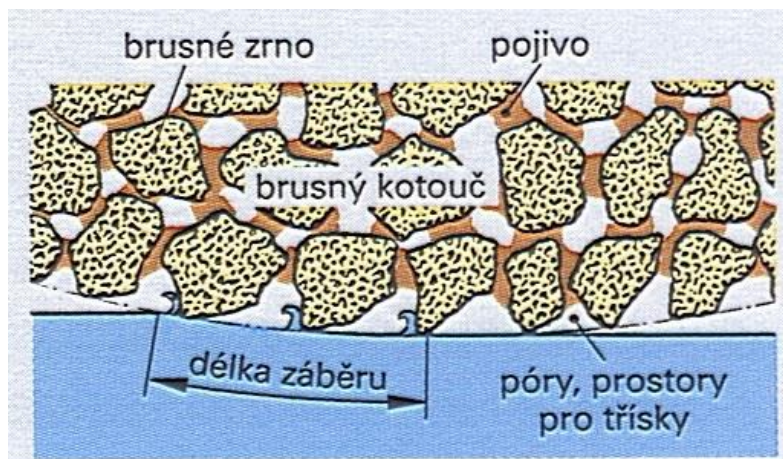
Experimentální část je věnována porovnání dvou brusných kotoučů využitých na hloubkové broušení. Pro první měření byl využit kotouč se značením 3M Cubitron a pro druhý měření byl využit kotouč se značením Tyrolit strato ultra. Brusný kotouč 3M Cubitron byl podroben třem měřením, zatímco kotouč Tyrolit strato ultra byl využit ke čtyřem měřením.

Měření probíhalo buďto oscilačním způsobem, které obrobí přídavek na obrábění na několik průchodů. Od této metody je očekávané, že bude šetrnější k brusnému kotouči, ale bude dražší kvůli delšímu strojnímu času. Druhá metoda broušení byla ručním způsobem, kde se hloubka záběru obrousí na jeden pracovní záběr. Od této metody se očekává kratší strojní čas na úkor odebraného brusného materiálu.

Cílem této bakalářské práce bude vyhodnocení celkových nákladů každého uskutečněného měření a výsledné vyhodnocení, který brusný kotouč lépe obstál hloubkovému broušení.

2. Strategie broušení

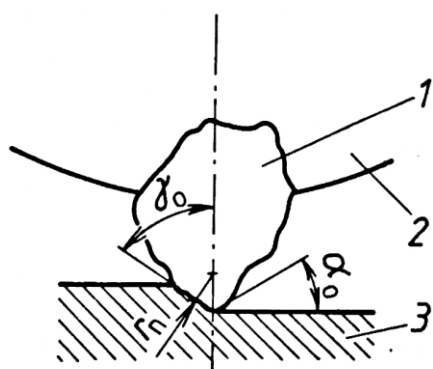
Metoda broušení spadá do nejstarších metod obrábění. Byla využívána už před více jak 2000 lety, kdy sloužila především k ostření jednoduchých nástrojů sloužících k přežití. Brusné nástroje nemají přesně definovaný geometrický tvar zrna, a navíc jsou zrna rozmístěna náhodně. Spojení zrn k sobě je zajištěno pojivem. Mezi spojenými zrny a pojivem vznikají prázdná místa, která se nazývají póry. Broušením se můžou dokončovat rovinné, válcové vnitřní, válcové vnější nebo rovinné plochy. [4], [6]



Obrázek 1: Struktura broušícího nástroje

2.1 Podstata metody

K obrábění během broušení se využívá mnohabřitý nástroj bez jasně definované geometrie jednotlivých zrn. Všechna zrna jsou charakteristická tím, že během obrábění odebírají velmi malé průřezy různých velikostí. [6], [21]



- 1 – zrno, 2 – broušící kotouč,
- 3 – obrobek
- α_0 – ortogonální úhel hřbetu,
- γ_0 – ortogonální úhel čela,
- r_n – poloměr ostří

Obrázek 2: Tvar zrna broušícího kotouče

2.2 Rozdělení druhů broušení

Základní rozdělení broušení dělíme podle typu broušené plochy na plochy rotační a rovinné. Dále můžeme broušení rozdělit na vnitřní nebo vnější obrábění. Poslední způsob dělení se týká strojů pro broušení. Stroje můžeme dělit na brusky hrotové, bezhroté, na díry, speciální a na rovinné. [3], [4]



Obrázek 3: Bezhrotá bruska

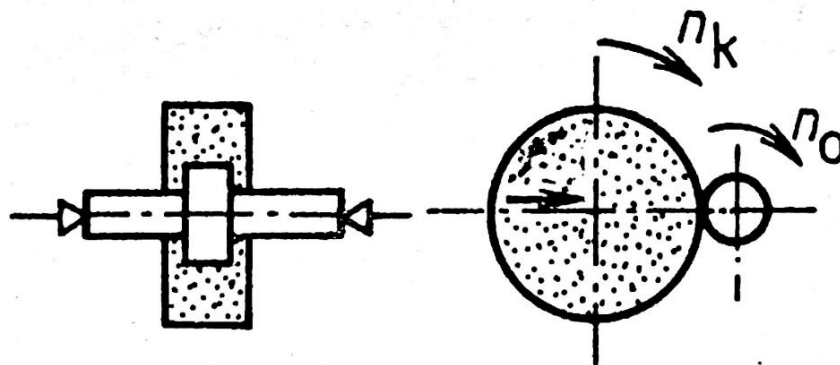
2.2.1 Broušení rotačních ploch

- Podélné broušení válcových ploch

Hlavní využití podélného broušení spočívá v obrábění dlouhých válcových nebo kuželových ploch. Pro broušení kuželových ploch je však nutné pracovní stůl brusky natočit. Upínání obrobku se uskutečňuje upínáním mezi hroty. Hlavní pohyb je vykonávaný broušicím kotoučem. Obrobek koná pomocný rotační pohyb. Podélný posuv vykonává v axiální směru je uskutečněn stolem s obrobkem. Hloubka řezu je vykonána v jedné nebo v obou úvratí stolu broušicím vřeteníkem. [3], [6]

- Zapichovací broušení

Tato metoda využívá pro tuhé a krátké součásti, kde se celý přídavek obrobí na jeden přísuv. Podmínkou zapichovacího broušení musí být, že šířka kotouče bude větší než šířka broušené plochy obrobku. Nástroj koná radiální posuv kolmo k směru osy obrobku. Čelní plochy lze obrobit bokem brusného kotouče. [3], [6]

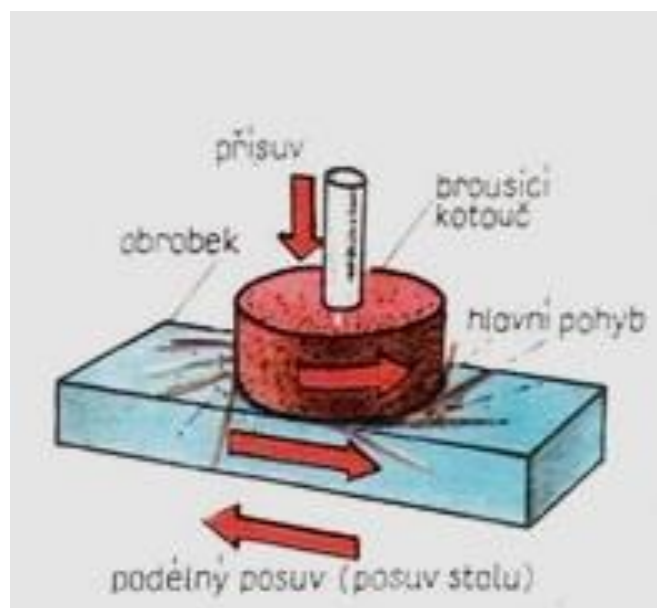


Obrázek 4: Zápichové broušení

- **Bezhraté broušení**
Využívá se v sériové výrobě válcových a tvarových ploch, jelikož se jedná o velice produktivní metodu. Obráběný materiál je ukládán mezi brousicí a podávací kotouč a pohybuje se na podpěrném pravítku. [3], [6]
- **Broušení vnitřních válcových ploch**
Vnitřní broušení válcových ploch se může uskutečnit pouze, pokud brousicí kotouč není větší než 0,9 průměru broušené díry. Tento způsob broušení lze uskutečnit zapichovacím nebo planetovým způsobem. V hromadné výrobě například u výroby ložisek se vnitřní plochy obrábí bezhratým způsobem. Podávací kotouč vede obráběnou součást s dalšíma dvěma opěrnými kotouči. [3], [6]

2.2.2 Broušení rovinných ploch

- **Broušení čelem brousicího kotouče**
Aktuální metoda je výkonnější než rovinné broušení obvodem kotouče, ale je méně přesná a zároveň umožňuje velký úběr materiálu. [7]



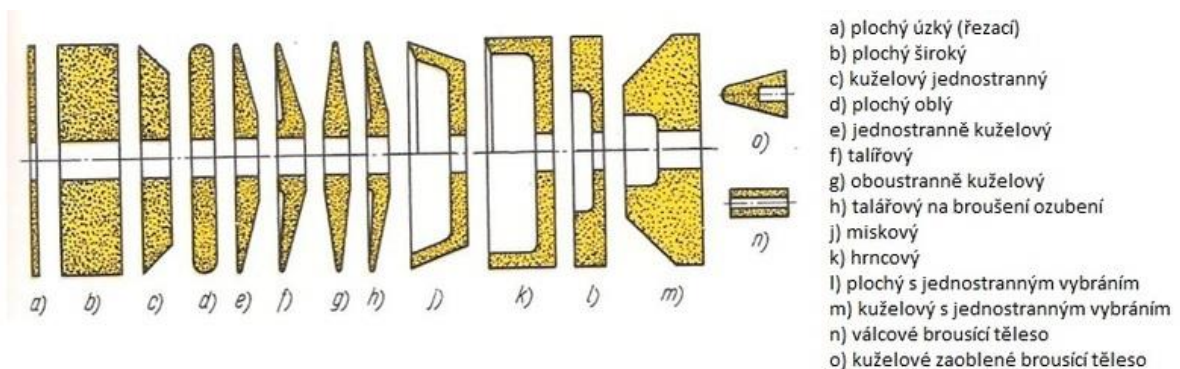
Obrázek 5: Rovinné broušení čelem brousicího kotouče

- **Broušení obvodem brousicího kotouče**
Jedná se o nejpřesnější metodu broušení rovinných ploch. Obrobek vykonává vratný přímočarý pohyb a hlavní rotační pohyb vykonává brousicí kotouč. Ve většině případů je šířka obráběné plochy větší než šířka brousicího kotouče a z tohoto důvodu je potřeba vykonat další pohyb. Pohyb je posuvový a je konán ve směru osy nástroje a je realizován v krajních úvratí podélného pohybu stolu. Hloubka záběru je vykonávaná vřeteníkem v krajních úvratích axiálního posuvu. [3], [5], [6]

2.3 Volba brousícího nástroje

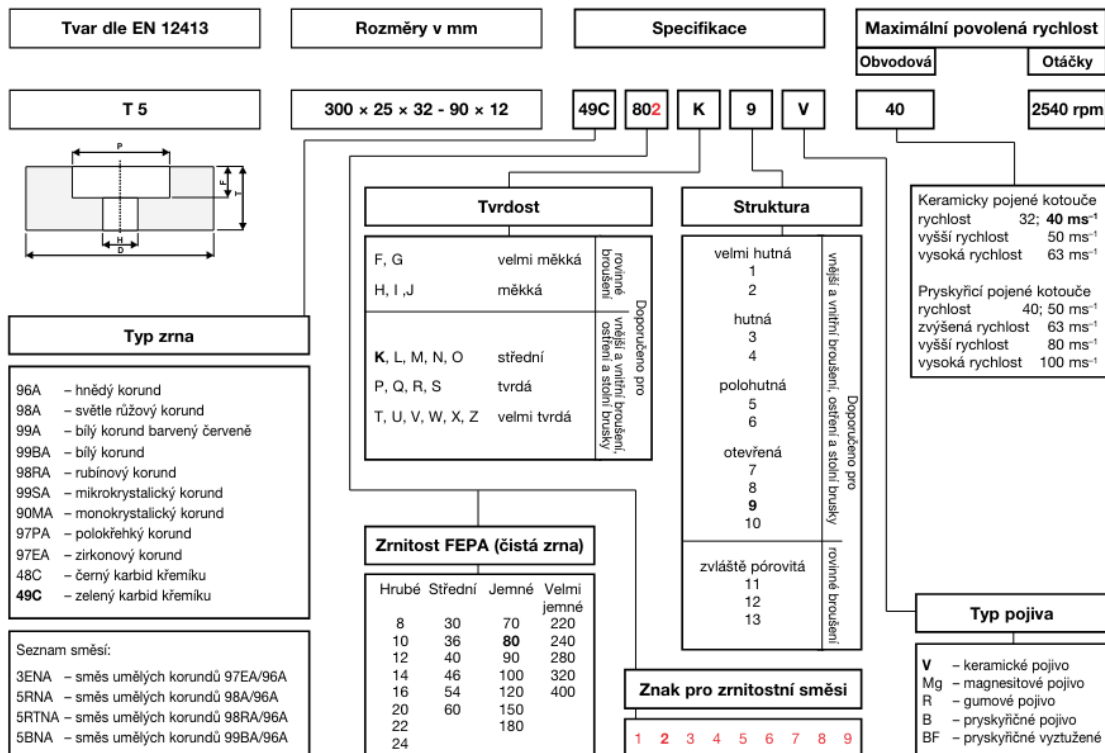
Brousící nástroj je tvořen póry, zrny brusiva spojený pojivem v jednotný celek. Tvary nástroje mohou být kotouče, kameny, segmenty, pásy atd. Dále rozdělujeme brousící nástroje podle: [1], [3], [5]

- Druhu brousícího materiálu
- Zrnitosti brousícího materiálu
- Tvrdosti nástroje
- Struktury nástroje
- Typem pojiva



Obrázek 6: Základní tvary brousících nástrojů

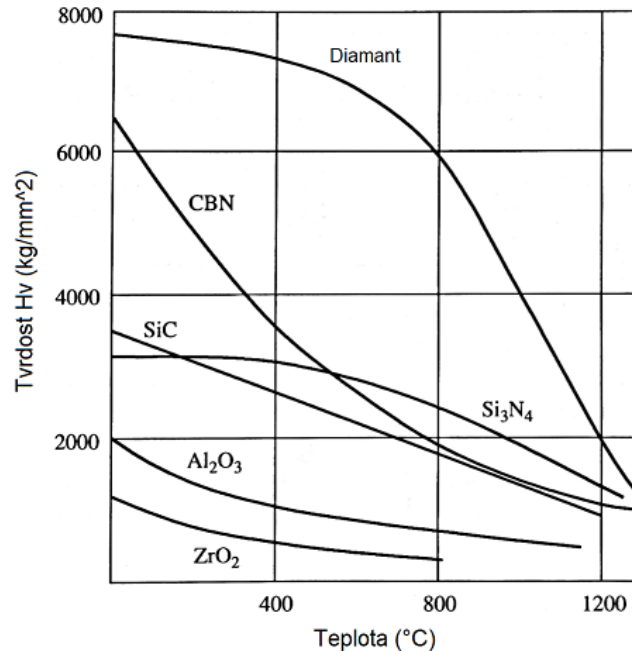
2.3.1 Značení brousících kotoučů



Obrázek 7 Značení tvaru, rozměrů a specifikace brousících nástrojů podle firmy TYROLIT

2.3.2 Druh brousicího materiálu

Nejdůležitější vlastností brusného zrna je tvrdost, u které je důležité, aby se za vysokých teplot nesnižovala, chemicky nereagovala a aby zároveň nedocházelo k difúzi. Brousicí materiál se rozděluje podle výroby na syntetický a přírodní. Materiál brusných zrn se volí podle materiálu broušeného obrobku. [1], [3], [4]



Obrázek 8: Tvrdost brousících materiálů v závislosti na teplotě

Superabraziva

- Diamant

Diamant je nejtvrdší známý materiál a je s ním možné obrábět i velice tvrdé materiály jako keramiku. Výhodná vlastnost využití diamantu jako brusiva spočívá v udržení své tvrdosti za vysokých teplot. Diamant dokáže být teplotně stabilní na vzduchu do teplot 760 °C a do 1400 °C ve vakuu. Diamant je forma uhlíku a je nevhodné ho využívat k broušení ocelí. Rozpustnost uhlíku v nízkouhlíkových ocelích a za pomoci vyšších teplot způsobuje výrazně rychlejší otupování diamantových brusiv. [4]

- Kubický nitrid boru (CBN)

Kubický nitrid boru obsazuje druhou příčku nejtvrdšího materiálu hned za diamantem a využívá se především k obrábění ocelí. I přes vyšší cenu nahrazuje konvenční brusiva z důvodu přesnějšího broušení a menšího opotřebení. Na vzduchu si kubický nitrid boru vytváří vrstvu z oxidu boritého, která zabraňuje další tvorbě oxidace. Kubický nitrid boru je tepelně stabilní do teplot 1500 °C v inertní atmosféře. Ve vodě se vrstva z oxidu boritého rozpouští a za použití řezné kapaliny ve formě vodných roztoků dochází k rychlejšímu otupení zrn z kubického nitridu boru. K broušení je doporučeno jako řeznou kapalinu využívat olejové emulze. Brusná zrna z kubického nitridu boru se využívají při broušení vysoce legovaných nástrojových ocelí. [4]

Konvenční brusiva

- Karbid křemíku (SiC)

Karbid křemíku je nejtvrděší brusný materiál ze skupiny konvenčních brusiv, ale jeho nevýhodami je nízká odolnost proti rázům a vyšší opotřebení při obrábění ocelí. Taví se v obloukové peci za teplot 1 800 °C až 2 200 °C z křemičitého písku smíchaného s koksem. Karbid křemíku se rozděluje podle barev na zelený a černý. [4]

Zelený karbid křemíku dosahuje vyšší čistoty, ostrosti a drobitosti. Využívá se převážně k broušení nástrojů ze slinutých karbidů a keramiky.

Černý karbid křemíku není stejně tvrdý jako zelený karbid křemíku, ale je užitečný pro broušení litin. [4]

- Oxid hlinitý – umělý korund (Al₂O₃)

Umělý korund se využívá k broušení železných materiálů zahrnujících oceli. Podle čistoty a přípravy mohou být brusná zrna ostrá nebo hranatá. Vyrábí se tavením bauxitu při teplotách 2 000 °C až 2 400 °C, následně dochází k drcení a třídění. Brusná zrna z bílého oxidu hlinitého jsou nejčistší. Zrna s hranatým tvarem jsou odolná vůči rázům a využívají se na hrubovací operace. U ostrých zrn nedochází ke značnému otupování a vylamování a z tohoto důvodu mají delší trvanlivost. [4]

Růžový nebo rubínový korund obsahuje oxid chromitý, který způsobuje obarvení. Přidáním oxidu chromitého v rozsahu 0,5 až 5,0 % zvýší drobitost korundu. Přidáním 2 % oxidu titaničitého bude mít za následek zvýšení tvrdosti. Hnědý korund se využívá na hrubovací operace. [4]



Obrázek 9: Umělý růžový korund A98

2.3.3 Zrnitost brousicího materiálu

Podle velikosti zrn se brusivo rozděluje na velmi jemné, jemné, střední a hrubé. Tato velikost zrn všeobecně ovlivňuje výslednou drsnost povrchu. Pro hrubování se volí větší velikost zrna, naopak pro obrábění načisto se velikost zrna volí menší. Tvrdý a křehký materiál si žádá jemná zrna. [4]

FEPA zrnitost			
Hrubé	Střední	Jemné	Velmi jemné
8	30	70	220
10	36	80	240
12	40	90	280
14	46	100	320
16	54	120	400
20	60	150	
22		180	
24			

Tabulka 1: Zrnitost FEPA

2.3.4 Tvrdost nástroje

Tvrdost neboli soudržnost brousicího nástroje je vlastnost materiálu, která je schopna klást odpor k uvolnění nebo vylomení brusných zrn z pojiva nástroje vlivem řezných sil. Tvrdost tedy vyjadřuje houževnatost a pružnost spojení mezi jednotlivými zrny brusných zrn. U měkkých kotoučů dochází k vylamování rychleji a snadněji než u tvrdých kotoučů. Důležité pro brousicí nástroj je, aby se tvrdost neměnila s rostoucí teplotou. [3], [5]

2.3.5 Struktura nástroje

Jedná se o poměr objemu pórů, zrn a celkového nástroje. Výsledek určuje vzájemnou vzdálenost zrn. Více pórovitý nástroj se využívá k velkému úběru materiálu z důvodu menšího zanášení pórů obrobenými třískami. Struktura se označuje čísly od 1 do 13 a rozděluje se na uzavřenou, střední a otevřenou. Nižší struktura se využívá pro tvrdé a křehké materiály. Pro houževnaté materiály je vhodné použít pórovitější kotouče. [3], [5]

2.3.6 Pojivo nástroje

Pojivo zajišťuje požadovaný tvar stmelnými brusnými zrny, rozměr a mechanickou pevnost. K výrobě nástrojů dochází nejčastěji lisováním nebo litím při teplotě 1200 °C. Požadovanými vlastnostmi pojiva je být rezistentní vůči změnám teploty, vylamovat opotřebená zrna a odolávat vlivům chladící kapaliny. [4]

- Organická pojiva

Nástroje složené z keramického pojiva jsou více pružná než nástroje vyrobené z jiných pojiv. Pružnost organického pojiva zaručuje bezpečnost při vyšších rychlostech broušení. Je užitečná také u neobvyklého zatížení nebo v případech, kdy chceme dosáhnout vyššího lesku povrchu. Organická pojiva jsou využívána spíše ve spojení s konvenčními typy brusiv, ale své využití mají ve spojení s superabrazivy pro dosažení velmi nízkých drsností povrchu. Organická pojiva jsou dostupná v mnoha provedení např. epoxidová pryskyřice a šelak. Pojivo ze šelaku se využívá pro práci načisto a pojivo z epoxidové pryskyřice pro hrubovací operace. Všechna organická se opotřebovávají s vysokou teplotou. Je velice časté, že nové broušící nástroje nebudou brousit účinně, dokud teplo z broušícího procesu neopotřebuje povrchovou vrstvu broušícího nástroje složenou z pojiva. Odebráním této vrstvy z pojiva se k řezu dostane část nástroje složená z broušících zrn. Již před prvním použitím se organickým pojivům snižuje životnost, tudíž je velice důležité hlídat si datum spotřeby. [4]

- Keramická pojiva

Keramické pojivo je měkčí než kovové pojivo, ale je mnohem tvrdší než pojiva organická. U konvenčních materiálů brusných zrn se využívá ve spolupráci s umělým korundem a se superabrazivy se využívá konkrétně s kubickým nitridem boru. Tento druh pojiva se skládá ze skleněného prášku, jílu a boraxu nebo živce. [4]

- Kovová pojiva

Jsou využívána převážně jako pojiva pro superabraziva. Brusná zrna z diamantu nebo kubického nitridu boru mohou být nanášena v jedné vrstvě nebo ve více vrstvách. Výroba jednovrstvého broušícího nástroje je značně drahá z důvodu dlouhé výroby, která zahrnuje přesné umístění zrn na povrch kola. Vypadlá broušící zrna se dají běžně opravit galvanickým niklováním. Je možná i alternativní metoda opravy vypadlých jednotlivých broušících zrn, a to pomocí operace pájení. Výhodou pájení je, že okolo broušícího zrna dokáže nanést slabší vrstvu povlaku, která zajišťuje účinnější broušení. [4]

2.4 Upínání broušícího nástroje

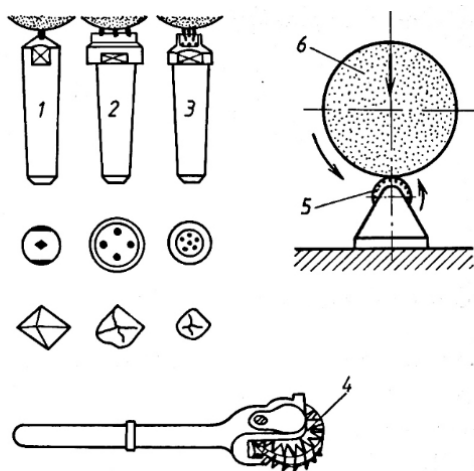
K upnutí broušícího nástroje ke stroji využíváme příruby, které se upínají mechanickými svěráky. Při nedokonalém vyváženém upnutí nástroje dochází k vyvolání nechtěných vibrací, které mají vliv na výslednou kvalitu povrchu a díky tomu dochází k rychlejšímu opotřebení broušícího nástroje. Proto je zapotřebí broušící nástroj i s přírubami vyvážit pomocí vyvažovacích tělísek na vyvažovacím stojánku. Modernější stroje mohou obsahovat vyvažovací zařízení, u kterého při chodu stroje dochází k samostatnému vyvažování nástroje. [9]



Obrázek 10: Plochá příruba

2.5 Orovňávání brousicího kotouče

Dále na výslednou broušenou plochu má vliv také stav brousicího kotouče. K obnově opotřebované plochy kotouče se využívají orovňavače různých druhů. Orovňavače mohou být diamantové, drticí orovňovací nástroje a kontinuální orovňavače. [6]

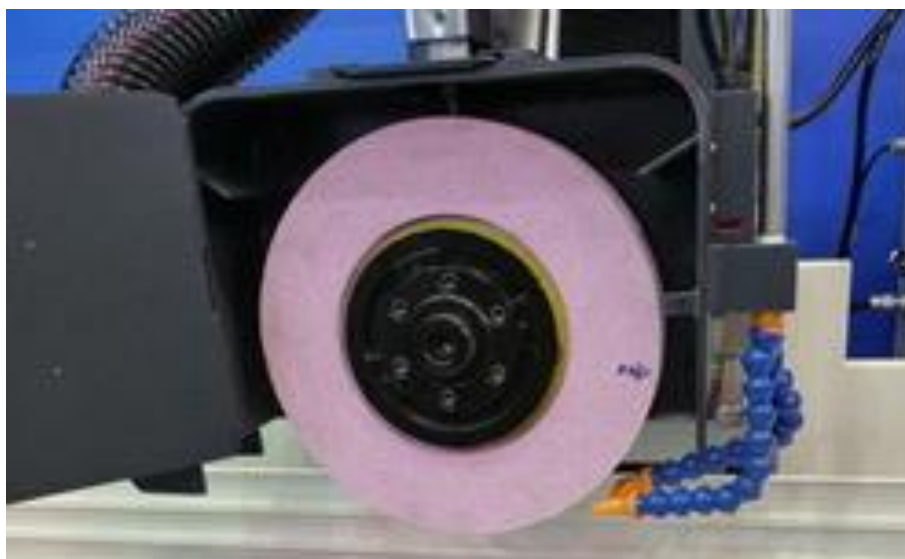


1 – monokrystalický, 2 – polykrystalický, 3 – práškový, 4 – orovňovací kladka,
5 – kolečkový (pro hrubé orovňávání), 6 – brousicí kotouč

Obrázek 11: Orovňavače

2.6 Řezné prostředí

Při broušení se používá vysoká řezná rychlost, která způsobí v místě řezu vysokou změnu teploty. K ochraně obrobku a nástroje před teplotním ovlivněním se využívají řezná média, která by měla mít minimálně 3 funkce, mezi které patří snížení tření v místě obrábění, dále odvod tepla vzniklého při broušení a poslední funkcí je odplav vzniklých třísek a i vylomených zrn z brousicího kotouče. [4], [6], [8]



Obrázek 12: Přívod řezné kapaliny do místa broušení

2.6.1 Technologické požadavky na řezná média

- Chladicí účinek

Chladicí účinek je vlastnost řezného média odvádět teplo z místa obrábění. Obklopení broušicího nástroje a obráběného povrchu řezným médiem zajišťuje odvod tepla, odvod třísek a snížení teploty. Účinek ochlazování má pozitivní vliv na trvanlivost nástroje, i na jakost broušeného povrchu obrobku. [4], [6], [8]

Chladicí účinek řezného média mohou ovlivňovat jeho smáčecí schopnosti, rychlost vypařování za různých teplot, měrné teplo, tepelnou vodivost a průtokové množství. Tyto veličiny mají přímý vliv na chladicí účinek řezné kapaliny, jelikož čím vyšší budou, tím více bude účinné chlazení řezné kapaliny. [4], [6], [8]

- Mazací účinek

Mazací účinek média se projevuje snížením tření mezi obrobkem a nástrojem. Ke snížení tření dochází k vytvoření povrchové vrstvy médiem na povrchu nástroje a obrobku, která zabraňuje styku kovových povrchů. I minimální množství média může být přínosem k efektivitě obrábění. Řezná kapalina s mazacím účinkem má vliv na zmenšení řezných sil, zlepšení povrchu obrobeného povrchu a snížení potřeby energie. [4], [6], [8]

Vyšší viskozita řezné kapaliny může mít negativní vliv na průnik mezi třecí plochy, zároveň se větší množství média zadržuje na obrobených třískách a dochází k jeho ztrátám. [4], [6], [8]

- Ochranný účinek

Důležitý aspekt řezné kapaliny je, aby nezpůsobovala škody ve formě koroze obráběcím nástrojům a obráběnému materiálu. Aby se nemusely výrobky mezi operacemi obrábění konzervovat a zároveň, aby byl chráněn obráběcí stroj před vznikem koroze, je nezbytné přidat pasivační přísady do řezného média. [4], [6], [8]

- Zdravotní nezávadnost

Pracovník má zodpovědnost za řezné médium od začátku jeho používání do jeho výměny. Zákony na národní i mezinárodní úrovni se zaměřují na prevenci poškození zdraví a zároveň i poškození životního prostředí. Z tohoto důvodu je nákladná likvidace řezných kapalin. [4], [6], [8]

Pracovní médium nesmí být zdraví škodlivé, jelikož s ním mohou přijít do přímého styku pracovníci obsluhující stroj. Požadavky na řeznou kapalinu jsou, že nesmí obsahovat látky, které mohou dráždit sliznici, oči a pokožku a dále nesmí zamořovat ovzduší zápachem. [4], [6], [8]

2.6.2 Řezné kapaliny

- Vodné roztoky

Vodné roztoky nemají žádný mazací účinek, a proto se používají u obrábění, kde je vyžadován chladicí a čistící účinek. Pro použití vodného roztoku je nutné předejít nevídaným vlastnostem vody, která může na obrobku nebo nástroji způsobovat korozivzdornost. Další nevídanou vlastností vody je vysoká tvrdost nebo obsah bakterií. Těmto nežádaným vlastnostem vody můžeme zabránit přidáním látek např. uhličitanu sodného, dusičnanu sodného nebo triethanolaminu. [7] [8] [4]

- Emulze

Emulze jsou složené z vodného roztoku a řezného oleje, které se využívají u případů, kdy je potřeba místo obrábění více chladit. Různé poměry složení z vodného roztoku a řezného oleje se využívají pro odlišné druhy obrábění. Z důvodu vysokého podílu vodného roztoku je nutné emulzi obohatit korozivzdornými látkami. Nevýhodou emulze je horší mazací vlastnost a menší životnost. [7] [8] [4]

- Řezné oleje

Řezné oleje mají své využití pro vysokorychlostní broušení vzhledem k pozitivním mazacím vlastnostem a vyšší teplotě varu. Správné užívání řezného oleje nám zaručuje vyšší životnost než u vodných roztoků. Hlavní výhodou řezného oleje oproti vodným roztokům je menší opotřebení brusného nástroje vlivem mazacího účinku. Při využívání řezných olejů může dojít k požáru nebo explozi. K prevenci před nebezpečím požárem by měly být uzpůsobeny pracovní stroje, které se musí uzavřít. Řezné oleje jsou účinné do teplot 200 °C, nad tuto teplotu mohou přestat fungovat z důvodu poškození teplem. [7] [8] [4]

2.7 Řezné podmínky rovinného broušení

Správná volba řezných podmínek je u broušení a jakéhokoliv jiného obrábění velice důležitá, jelikož má vliv na výsledné parametry, jako například drsnost povrchu, požadovanou přesnost a geometrický tvar. Nevhodně zvolené řezné podmínky mohou mít negativní vliv i na efektivitu, ekologii a finanční náročnost výroby. Mezi hlavní řezné podmínky rovinného broušení spadá řezná rychlost, podélný posun a hloubka řezu. [6], [11]

Řezné podmínky u broušení jsou ovlivněny materiálem obrobku, materiálem nástroje, geometrií břitu, výrobním strojem, způsobem chlazení a způsobem broušení. [6], [11]

K určení správných řezných podmínek existuje několik postupů:

- Podle tabulek a nomogramů

Tabulky a nomogramy uvádí jednotlivé vztahy mezi řeznými podmínkami, materiálem nástroje a obrobku. K předejití poškození stroje nebo nástroje se řezné podmínky uvádí s nejmenší dovolenou hodnotou. Metoda určení vhodných řezných podmínek podle tabulek a nomogramů má své uplatnění v malosériové a kusové výrobě. [26]

- Podle normativů

Normativy jsou detailně propracované tabulky, které obsahují nespočet faktorů. Tyto faktory mají přímý vliv na celý proces obrábění. Výsledné řezné podmínky podle normativů mají tendenci být stejné jako podmínky optimální. Využití vyhledávání podmínek podle normativů najdeme v sériové výrobě. [26]

- Určování řezných podmínek zkusmo

Při této metodě závisí jen a pouze na znalostech a zkušenostech pracovníka. Není doporučeno tuto metodu zkoušet, pokud je možné využít jednu z předešlých metod volby řezných podmínek. Metodu zkusmo je doporučeno využívat pouze v případech, že nejsou známy vlastnosti obráběného materiálu. Pracovník by s obráběním měl začínat od nejnižší rychlosti posuvu společně s otáčkami a podle možnosti obráběného materiálu postupně přidávat na rychlosti. [26]

Řezné podmínky:

- Řezná rychlost

Řeznou rychlost vykonává obvod broušícího kotouče. Zároveň ji volíme co nejvyšší s ohledem na vlastnosti broušeného materiálu a materiálu broušícího nástroje. Řezná rychlost se může pohybovat od $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ do $120 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. U nástroje složeného z keramického pojiva se může řezná rychlost pohybovat od $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ do $35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Pro rychlostní broušení jsou vyráběny kotouče s keramickou vazbou, které umožňují broušení až do $120 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Vyšší řezná rychlost způsobuje zvýšení teploty povrchu, které může vést k popuštění materiálu. K vyvarování se tepelným změnám je nutné užívat chladící kapalinu. Pro běžné broušení je doporučeno využít 1 litr kapaliny za minutu na 1 mm šířky kotouče. U rychlostního broušení se kapalina přivádí pod vyšším tlakem až 2 MPa a ve větším množství. [6], [11]

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

$d_s [mm]$... průměr broušícího kotouče

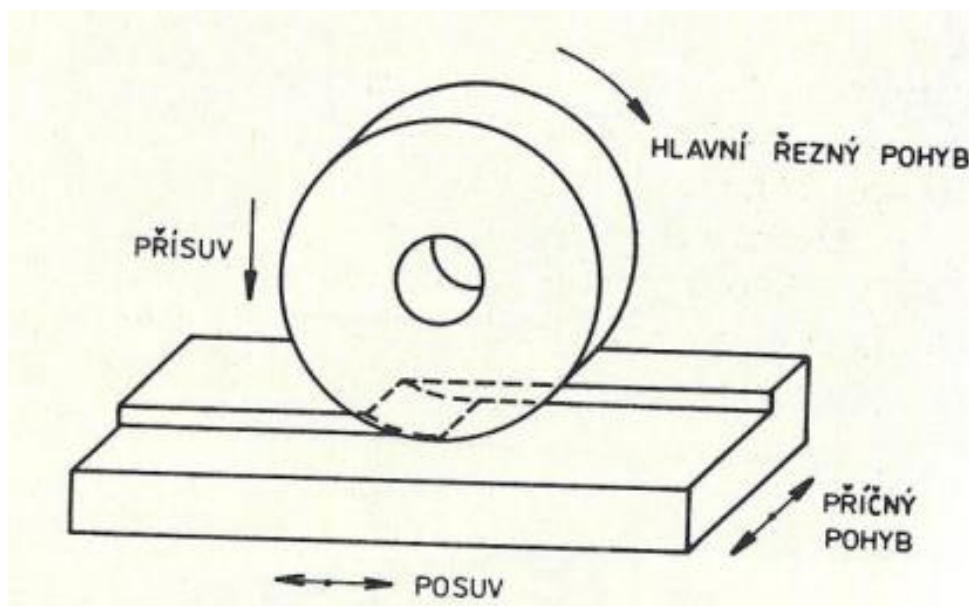
$n_s [min^{-1}]$... otáčky broušícího kotouče

- Příčný posuv

Posuv je pohyb obrobku do strany vůči broušicímu kotouči. Dráha posuvu se zadává v šířce broušicího kotouče (například pro rovinné broušení až 0,7 šířky kotouče), ale nesmí být větší než šířka kotouče. S větším posuvem jsou zároveň zajištěny lepší podmínky obrábění, jelikož nedochází k velkému teplotnímu ovlivnění. [12]

- Podélný posuv

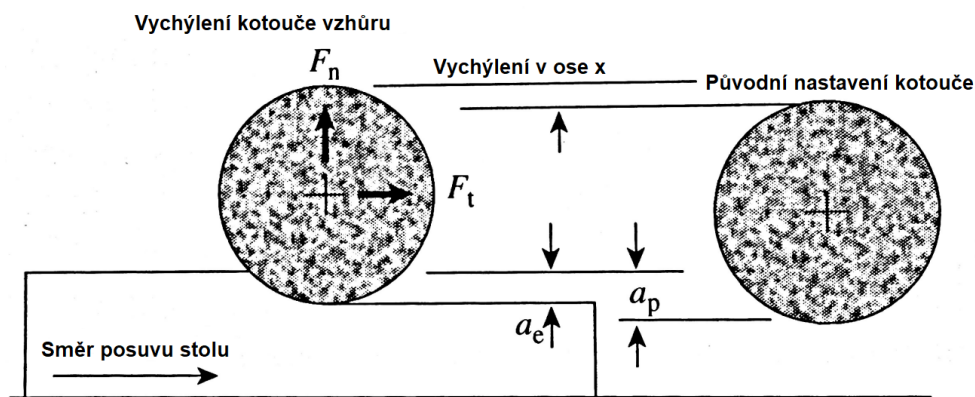
Podélný posuv se volí v rozsahu od $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ do $35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Při hrubování i při práci na čisto se rychlost posuvu pohybuje od $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ do $18 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. [11]



Obrázek 13 Zobrazení řezných pohybů

- Hloubka řezu

Reálná hloubka řezu a_e je skutečná tloušťka odebraného materiálu na jeden záběr. Hloubka řezu nastavená operátorem na stroji se označuje a_p , která je větší než reálná hloubka řezu. Hloubka řezu a_e bývá rovna přibližně jedné čtvrtině velikosti a_p . Vliv na velikost hloubky řezu mají tvrdost obrobku, řezná rychlost, ostrost broušícího kotouče a tuhost obráběcího nástroje. Hloubka řezu ovlivňuje vznikající síly při broušení, životnost broušícího kotouče a výslednou kvalitu povrchové vrstvy obráběného materiálu. Ke zpřesnění rozměru broušené plochy se využívá vyjiskřování. Za procesu vyjiskřování se přejede broušícím kotoučem několikrát za sebou povrch obrobku bez přísuvu. Tímto procesem v soustavě stroj – nástroj – obrobek – upínač dojde k vyrovnání pružných deformací způsobené řeznými silami. [4], [11]



Obrázek 14: Vliv řezných podmínek na reálnou hloubku řezu

2.7.1 Vliv podmínek broušení na drsnost broušeného povrchu

Na dosahované drsnosti broušeného povrchu mají vliv různé podmínky broušení, ku příkladu řezné podmínky, charakteristika broušícího kotouče, orovnávaní kotouče apod. Vysoká obvodová rychlost broušícího kotouče má příznivý vliv na výslednou drsnost povrchu. [1]

Dopad vyšší obvodové rychlosti broušícího kotouče má spíše vliv na broušení kalených ocelí než na broušení měkkých ocelí. Při broušení kalených ocelí dochází k vývoji vyššího tepla zrnem brusiva, které zvyšuje odpevnění a plastičnost kovu. Na drsnost broušeného povrchu má také vliv podélný a příčný posuv obrobku. Tento předešlý jev je vysvětlen tím, že vyšším posuvem se zvětšuje tloušťka třísky odebraným jednotlivým zrnem brusiva, který zároveň pronikají do větších hloubek broušeného povrchu. [1]

Tvar broušené plochy	Způsob broušení	Přesnost rozměrů IT	Jakost obrobene plochy Ra
Rovinná	Hrubování		
	Čelem	9 až 11	0,8 až 6,3
	Obvodem	8 až 11	0,8 až 3,2
	Načisto		
	Čelem	5 až 7	0,2 až 1,6
	obvodem	5 až 7	0,2 až 1,6
	Jemné broušení	3 až 5	0,025 až 0,4

Tabulka 2: Přesnost a jakost ploch obrobenech rovinným broušením

3. Kinematika rovinného broušení

Během rovinného broušení vznikají dva pohyby, které podle kinematiky rozlišujeme na hlavní řezný pohyb a pohyb vedlejší posuvný. Hlavní řezný pohyb je vykonáván nástrojem ve formě rotačního pohybu. Vedlejší pohyb vykonává obrobek a může být přímočarý nebo rotační. Výsledný pohyb, ke kterému dochází pomocí břitů nástroje k úběru materiálu z obrobku lze zobrazit kinematickými schémata. Kinematická schémata znázorňují pohyb řezné části vůči obráběné ploše po drahách ovlivněnými pracovními rychlostmi, které jsou dané vazbou nástroj – obrobek. [13], [14]

3.1 Ekvivalentní tloušťka třísky

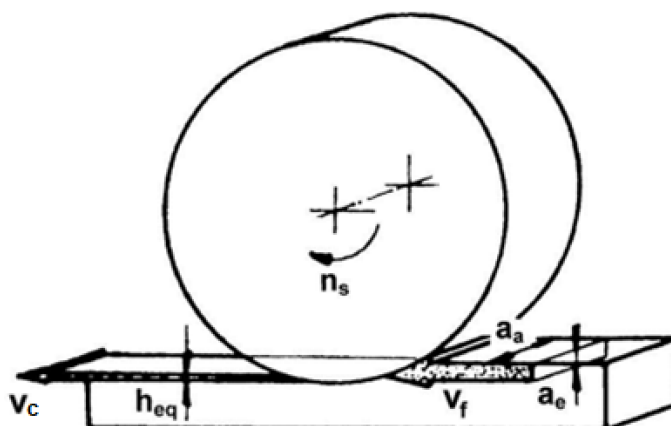
Výpočet tloušťky třísky vzniklé broušením je velice složitý z důvodu nedefinované geometrie zrn na broušicím kotouči. K výpočtu tloušťky třísky využíváme teoretickou hodnotu, zvanou také jako ekvivalentní tloušťka třísky h_{eq} . Ekvivalentní tloušťka třísky roste se zvýšenou rychlostí obrobku a větší hloubkou řezu. Čím vyšší je ekvivalentní tloušťka třísky, tím větší vzniká napětí na broušicích zrnech. Ekvivalentní tloušťka třísky nám pomáhá určit odpory, řezné síly, měrnou práci a výkon. [3], [9], [13]

$$h_{eq} = \frac{v_{ft}}{60 \cdot v_c} \cdot a_e \text{ [mm]} \quad (2)$$

a_e [mm]... pracovní záběr mm

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

v_{ft} [$m \cdot min^{-1}$] ... rychlost posuvu stolu brusky



Obrázek 15: Ekvivalentní hloubka řezu

$h_{eq} [mm]$... ekvivalentní hloubka řezu

$a_a [mm]$... šířka záběru

$a_e [mm]$... hloubka záběru

$n_s [min^{-1}]$... otáčky brousícího kotouče

$v_f [mm/ot]$... rychlost posuvu

$v_c [m * s^{-1}]$... řezná rychlost

3.2 Řezné síly

Řezná síla F , která působí mezi brousícím kotoučem a obrobkem, se rozkládá do tří směrů na sebe kolmých. Pasivní síla značená F_y je kolmá k broušené ploše, řezná síla F_z působí ve směru řezné rychlosti a posuvová síla F_x působí ve směru podélného posuvu. [9]

Pro tyto rozložené síly platí vztah:

$$F_y > F_z > F_x \quad (3)$$

Dále platí i poměr sil, který může nabývat hodnot od 1,2 do 3,0.

$$\frac{F_y}{F_z} = 1,2 \text{ až } 3,0 \quad (4)$$

Vliv na velikost řezných sil má mnoho faktorů, jako například materiál obrobku, způsob broušení, zrnitost brusiva, druh pojiva, řezné podmínky a struktura broušícího nástroje. Řezná síla se v průběhu broušení může zvýšit až několikanásobně v závislosti na rostoucím otupování broušícího nástroje. Řeznou sílu F_c u rovinného broušení můžeme zjistit z empirického vztahu. [9]

$$F_c = k_{fc} \cdot v_c^{z_{Fc}} \cdot f_a^{y_{Fc}} \cdot a_e^{x_{Fc}} \quad (5)$$

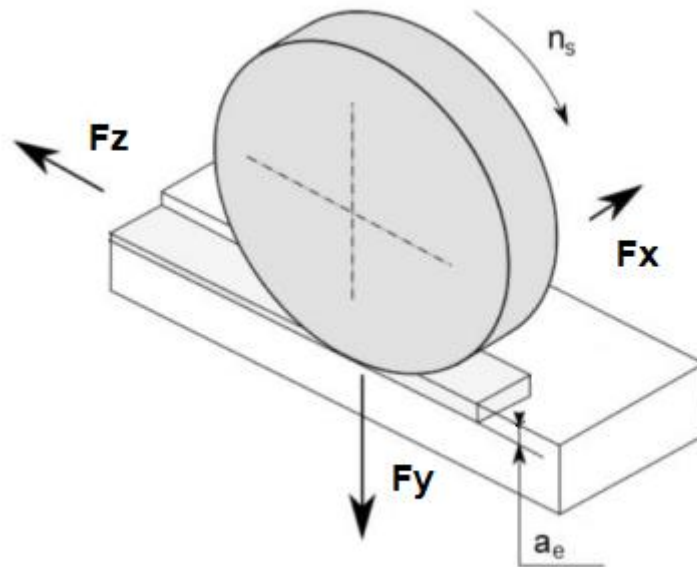
k_{fc} ... koeficient řezné síly

v_c [$m \cdot \text{min}^{-1}$] ... řezná rychlost

f_a [mm/ot] ... axiální posuv stolu brusky

a_e [mm] ... hloubka řezu

x_{Fc}, y_{Fc}, z_{Fc} ... empirické koeficienty



Obrázek 16: Řezné síly při rovinném broušení

3.3 Jednotkový strojní čas

Délka strojního času závisí na obráběcím materiálu, přesnosti a požadované kvalitě. Pro rovinné broušení máme 3 různé typy výpočtu strojního času. [4], [9]

Výpočet strojního času pro rovinné obvodové tangenciální broušení s přímočarým pohybem stolu a posuvem stolu na každý zdvih stolu, bez vyjiskřování. [9]

$$t_{AS} = \frac{l_t}{10^3 \cdot v_{ft}} * \frac{l_a}{f_a} * \frac{p}{a_e} \text{ [min]} \quad (6)$$

$l_t = l_{nt} + l_w + l_{pt}$ [mm] ... dráha pohybu v tangenciálním směru stolu brusky

$l_{nt} = \sqrt{3 * d_s + 9}$ [mm] ... délka náběhu v tangenciálním směru

d_s [mm] ... průměr broušícího kotouče

$l_{pt} = l_{nt}$ [mm] ... délka přeběhu v tangenciálním směru

l_w [mm] ... délka obrobku

v_{ft} [$m * min^{-1}$] ... tangenciální rychlost posuvu stolu brusky

$l_a = l_{na} + b_w + l_{pa}$ [mm] ... dráha pohybu stolu brusky v axiálním směru

l_{na} [mm] ... délka náběhu v axiálním směru

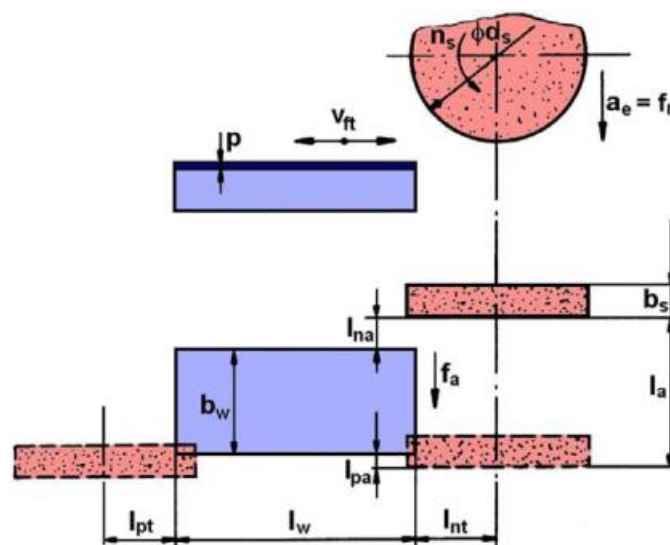
b_w [mm] ... šířka broušené plochy

l_{pa} [mm] ... délka přeběhu v axiálním směru

f_a [mm] ... axiální posuv stolu brusky na jeden zdvih v tangenciálním směru

p [mm] ... přídavek na broušení

a_e [mm] ... hloubka záběru



Obrázek 17: Obrázek výpočtu strojního času pro rovinné broušení

4. Poměrové ukazatele

Pro vyhodnocení celkového procesu broušení a jeho efektivnosti se využívají různé ukazatele, které nám zároveň vyhodnotí i kvalitu broušících nástrojů [1]

- Úběr určený objemem odebraného materiálu Q_m ($mm^3 * min^{-1}$)
- Opotřebení brusiva, určené jeho spotřebou Q_a ($mm^3 * min^{-1}$)
- Brusný poměr $g = \frac{Q_m}{Q_a}$
- Trvanlivost nástroje T (min)
- Drsnost obrobenej plochy Ra (μm)
-

U broušících nástrojů s broušícími zrny, které mají vyšší hodnotu, jako například diamantové nebo z kubického nitridu boru se brusný poměr broušení vyjadřuje množstvím odebraného materiálu, které odpovídá jednotce hmotnosti spotřebovaného zrna. Vyjadřuje se v jednotkách objemu nebo hmotnosti odebraného materiálu. [1]

$$g = \frac{G_m}{G_z} \qquad g_v = \frac{Q_m}{G_z} \qquad (7)$$

Q_m [$mm^3 * min^{-1}$] ... Objem odebraného materiálu

G_m [g]... Hmotnost odebraného materiálu

G_z [g] ... Hmotnost spotřebovaného zrna

K výpočtu spotřeby nástroje se využívají hodnoty měrné spotřeby zrna, které vyjadřují množství zrna potřebné k odebrání hmotnostní nebo objemové jednotce materiálu. [1]

$$g = \frac{G_z}{G_m} \qquad g_v = \frac{G_z}{Q_m} \qquad (8)$$

Z následující rovnice lze vyjádřit různé možnosti snížení nákladů vznikajících při broušení. K dosažení největších úspor vlastních nákladů lze dojít za pomoci zvýšení měrného výkonu broušení, prodloužení životnosti nástroje a zvýšení výkonu broušení. Velký vliv na snížení nákladů má snížení spotřeby kotouče a snížení času na orovnávaní brusného kotouče. Jeden z největších vlivů na snížení nákladů je určení správného brousícího kotouče s nejvhodnějšími vlastnostmi. [1]

$$C = \frac{C_p}{Q_m} + \frac{C_a}{g} + \frac{C_p T_{or} + C_a Q_p}{T} + C_e A_e \quad (9)$$

C_p ... cena strojové minuty

Q_m ... výkon broušení

C_a ... cena 1 cm^3 užitečného objemu kotouče na 1 cm^3

Q_p ... spotřeba brusiva na jedno orovnávaní

C_e ... cena elektrické energie

A_e ... měrná spotřeba elektrické energie

T ... trvanlivost nástroje

T_{or} ... doba orovnávaní brousícího kotouče

g ... brusný poměr broušení

5. Charakteristika a rozdělení NO

Mezi nároky na nástrojovou ocel spadá zejména vysoká tvrdost, houževnatost, prokalitelnost a odolnost proti opotřebení. [10]

- Nelegované (uhlíkové)

Mají předepsaný obsah legujících prvků. Obsahují uhlík od 0,7 % do 1,5 %, mangan do 0,4 % a křemík maximálně do 0,35 %. Nelegované nástrojové oceli můžeme použít na výrobu nástrojů namáhané rázem a na ruční nástroje a nářadí, které zároveň nejsou vystaveny vyšším teplotám. [10]

Malá množství prvků manganu, křemíku a chromu zvyšují prokalitelnost nelegovaných ocelí. Tyto prvky v menších množstvích musí být zvláště u nástrojů, kde je nutná vyšší houževnatost na povrchu, v jádře nástroje je prokalení nežádoucí. [10]

- Legované (slitinové)

Legované nástrojové oceli mají své využití u nástrojů pracujících za vysokých rychlostí a vysokých teplot, kde musí být zaručena stálost vlastností za vyšších teplot.

Stálost vlastností za tepla je nejdůležitější aspekt u řezných nástrojů, které jsou vystavovány vysokým řezným rychlostem, které způsobují vysoké zahřívání. Pozitivní vlastnosti u nástrojových ocelí jako například odolnosti proti tepelné únavě, rozměrová stálost nebo houževnatost lze zajistit přidáním legujících přísad. Hlavní legující přísady pro nástrojové oceli jsou chrom, molybden, wolfram a vanad. Množství všech těchto legujících prvků se pohybuje od 3 % do 5 %. [10]

- Rychlořezné oceli

Rychlořezná ocel vyniká svou stabilitou vlastností i ve vysokých teplotách, které mohou dosahovat až 650°C. Do této maximální teploty nedochází ke snížení tvrdosti ani ke zhoršení řezných vlastností. Rychlořezné oceli jsou legovány wolframem, chromem a v některých případech i kobaltem v celkovém množství nad 20 %. Výsledná tvrdost rychlořezných ocelí dosahuje 60 až 66 HRC. Nástrojové rychlořezné oceli obsahují vysoký obsah uhlíku, který způsobuje problémy s tavnými způsoby svařování. [10]

Třída oceli	Druh oceli podle			Hlavní charakteristika složení
	Jakosti	Použití	Chem. složení	
19 XXX	Ušlechtilé	Nástrojové	Nelegované	Předepsaný obsah C, Mn, Si, P, S
			Legované	Nízko, středně a vysoce legované oceli: Cr, V, Cr-Mo-V-W, Cr-V-W-Co a další

Tabulka 3: Rozdělení nástrojových ocelí

6. Popis experimentální části

Experimentální část se zabývá vyhodnocením dvou brusných kotoučů, které byly využity na hloubkové broušení nástrojové legované oceli třídy 19 437. První využitý brusný kotouč experimentální části je značen 3M Cubitron 240x15x50 93DA80/80 H15VPMF601W 40. Druhý využitý brusný kotouč je od firmy Tyrolit strato ultra s přesným označením 240x15x51 SU33A702GG11V B1/40. Broušení proběhlo na rovinné brusce BRH 20 od firmy Mikronex s.r.o a každý kotouč byl podroben zkouškám různých řezných podmínek. Na konci experimentální části budou pomocí celkových finančních nákladů a úběru materiálu z brusného kotouče ohodnocena jednotlivá provedená měření.



Obrázek 18: Rovinná bruska Mikronex BRH 20

6.2 Postup měření

Broušení začínalo na materiálu z nástrojové oceli o délce 150 mm, šířce 42,5 mm a výšce 30,53 mm, který byl upnut k pracovnímu stolu pomocí magnetického svěráku. Následně byly určeny vzdálenosti mezi úvratěmi na ose Z a X. Na ose Z úvratě vzdálenost činila 61 mm a na ose X vzdálenost mezi levou a pravou úvratí měřila 600 mm. Před každou operací došlo k orovnění kotouče z důvodu, aby se srovnal jeho povrch a obnovila se jeho ostrost. Následně se pomocí velmi jemného ovládání nastavila souřadnicová nula v ose Y pomocí velmi jemného škrtnutí brusného kotouče o povrch obrobku. V poslední fázi měření se nastavily řezné podmínky, spustil se přívod chladicí kapaliny, zapnulo se odsávání vzniklého aerosolu vzniklého z obrábění, a nakonec se zajistí bezpečnost obsluhy pomocí zatažení ochranných dveří, aby mohlo dojít ke spuštění obráběcího programu.

Každé měření bude vyhodnoceno pomocí následujících výpočtů:

- Objem odebraného materiálu z brusného kotouče

$$V_{om} = \frac{a*b}{2} * D * \pi [mm^3] \quad (10)$$

$a [mm]$... šířka sražení

$b [mm]$... hloubka sražení

$D [mm]$... průměr brusného kotouče

- Stykový úhel obrobku a brousicího kotouče

$$\sin \psi = 2 \sqrt{\frac{a_e}{D}} [^\circ] \quad (11)$$

$a_e [mm]$... hloubka záběru

$D [mm]$... průměr brusného kotouče

- Délka stykového oblouku brousicího kotouče s obrobkem

$$L_{pl} = \sqrt{a_e * D} [mm] \quad (12)$$

$D [mm]$... průměr brusného kotouče

$a_e [mm]$... hloubka záběru

- Pro výpočet strojního času ročního broušení využijeme vztah (6)

$$t_{AS} = \frac{l_t}{10^3 * v_{ft}} * \frac{l_a}{f_a} * \frac{p}{a_e} [min] \quad (6)$$

$l_t [mm]$... dráha pohybu stolu v tangenciálním směru

$l_a [mm]$... dráha pohybu brusného kotouče v axiálním směru

$p [mm]$... přídavek na broušení

$v_{ft} [m * min^{-1}]$... tangenciální rychlost posuvu stolu brusky

$f_a [mm]$... axiální posuv stolu brusky na jeden zdvih v tangenciálním směru

$a_e [mm]$... hloubka záběru

- Strojní čas pro oscilační způsob broušení

$$t_{AS} = \frac{l_t}{10^3 \cdot v_{ft}} * \left(\frac{l_a}{f_a} + n_v \right) * \frac{p}{a_e} \text{ [min]} \quad (13)$$

l_t [mm] ... dráha pohybu stolu v tangenciálním směru

l_a [mm] ... dráha pohybu brusného kotouče v axiálním směru

p [mm] ... přídavek na broušení

v_{ft} [$m * min^{-1}$] ... tangenciální rychlost posuvu stolu brusky

f_a [mm] ... axiální posuv stolu brusky na jeden zdvih v tangenciálním směru

a_e [mm] ... hloubka třísky

n_v ... počet vyjiskřovacích dvojzdvihů

- Pro výpočet ekvivalentní tloušťky třísky využijeme vztah (2)

$$h_{eq} = \frac{v_{ft} * a_e}{60 * v_c} \text{ [}\mu\text{m]} \quad (2)$$

v_{ft} [$m * min^{-1}$] ... tangenciální rychlost posuvu stolu brusky

a_e [mm] ... hloubka třísky

v_c [$m * s^{-1}$] ... řezná rychlost



Obrázek 19: Ovládací panel rovinné brusky

6.2.1 Brusný kotouč 3M CUBITRON

- 1. měření

Pro první měření byl vybrán kotouč, který byl již v minulosti využit a který měl původní průměr 207,5 mm. Ze zkoušky dotyku prsty bylo zřejmé, že není kotouč v dobré kondici a muselo dojít k orovnaní na diamantu, které ubralo z kotouče značnou část materiálu. Aby byl kotouč schopný broušení, byl orovnan na průměr 205,5 mm a byl již připraven na svou práci. První měření bylo uskutečněno programem na ruční broušení a byly nastaveny podmínky:

Zadané řezné podmínky	
Rychlost posuvu stolu	$v_{ft} = 17,4 \text{ m/min}$
Příčný pohyb kotouče	$f_a = 0,2 \text{ mm}$
Řezná rychlost	$v_c = 35 \text{ mm/s}$
Hloubka záběru	$a_e = 0,5 \text{ mm}$

Tabulka 4: Zadané řezné podmínky pro 1. měření brusným kotoučem 3M Cubitron

První měření trvalo přesně 4 minuty a 59 s. Ze zkoušky dotyku brusného kotouče bylo cítit sražení na straně bližší k obsluze, které bylo naměřeno v šířce 4 mm, jelikož se příčný posuv konal ze zadní úvrati směrem k přední úvrati na ose Z. Následovalo přeměření výšky obrobku hloubkoměrem a byl naměřen úběr po celém obrobku přesně 0,5 mm. Jelikož se jednalo o hloubkové broušení, tak nebylo důležité přesné přeměření výsledné drsnosti povrchu a došlo pouze k vizuální a dotykové zkoušce, která obstála a povrch byl zhodnocen jako velice hladký.



Obrázek 20: Průběh procesu rovinného broušení

- 2. měření

Druhé měření proběhlo bez orovnění brusného kotouče, jelikož přísuv kotouče byl uskutečněn ve směru z přední úvrati do úvrati zadní. Průměr kotouče tedy zůstal roven 205,5 mm. Program byl nastaven opět na ruční broušení a byly nastaveny podmínky pro broušení:

Zadané řezné podmínky	
Rychlost posuvu stolu	$v_{ft} = 17,4 \text{ m/min}$
Příčný pohyb kotouče	$f_a = 0,2 \text{ mm}$
Řezná rychlost	$v_c = 35 \text{ mm/s}$
Hloubka záběru	$a_e = 1 \text{ mm}$

Tabulka 5: Zadané řezné podmínky pro 2. měření brusným kotoučem 3M Cubitron

Délka měření na stopkách vyšla bezmála 5 minut. Během broušení bylo znatelně slyšet, jak přibližně od poloviny šířky obrobku dochází k opotřebení brusného kotouče. Po dokončení procesu broušení se přešlo ke hmatové kontrole kotouče, která prokázala, že nastavené řezné podmínky byly zvoleny nevhodně a z důvodu velkého tlaku na zrno došlo k velkému opotřebení brusného kotouče. Pomocí hloubkoměru se uskutečnilo přeměření na stranách obrobku po ose Z. V přední části byla výška naměřena 29,04 mm a v zadní části 29,48 mm. Tyto výsledky jsou nepříjemné, a proto se s nimi nebude počítat v budoucím zhodnocení.



Obrázek 21: Výsledný povrch obráběné oceli po nevhodně zvolených řezných podmínkách

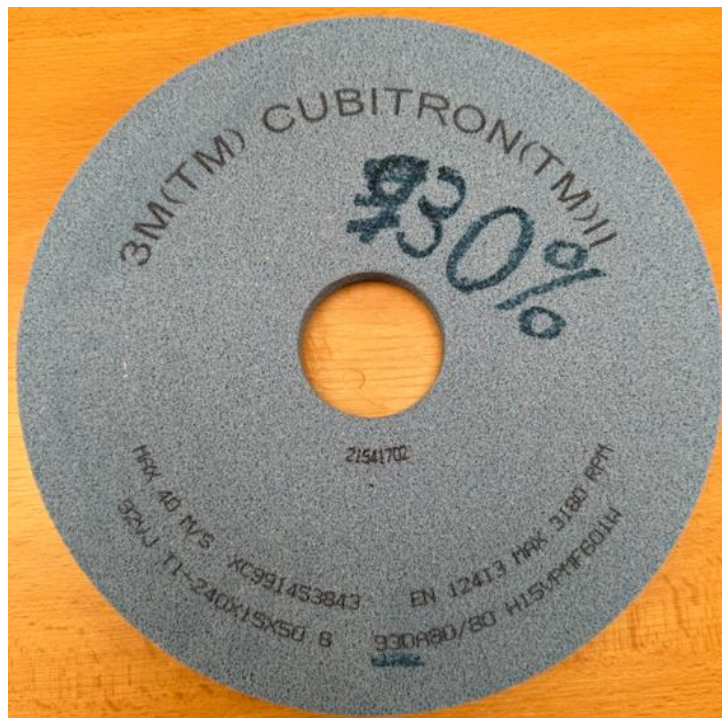
- 3. měření

Před posledním měřením brusným kotoučem značky CUBITRON muselo dojít k rozsáhlejšímu orovnaní pomocí diamantového orovnače a ke sjednocení výšky obrobku na 28,93 mm. Po zarovnání výšky obráběného materiálu muselo dojít opět k orovnaní brusného kotouče, který zarovnal jeho průměr na 203,5 mm. Třetí měření bylo uskutečněno oscilačním broušením a byly zadány tyto hodnoty:

Zadané řezné podmínky	
Rychlost posuvu stolu	$v_{ft} = 17,4 \text{ m/min}$
Příčný pohyb kotouče	$f_a = 3 \text{ mm}$
Řezná rychlost	$v_c = 35 \text{ mm/s}$
Hloubka záběru	$a_e = 0,015 \text{ mm}$
Přídavek na broušení	$p = 0,5 \text{ mm}$
Počet průchodů na vyjiskření	$n_v = 4$

Tabulka 6: Zadané řezné podmínky pro 3. měření brusným kotoučem 3M Cubitron

Celý proces broušení trval po dobu 24 minut a 6 vteřin. V porovnání s předešlými metodami měření, broušení oscilačním způsobem probíhalo klidněji. Po dokončení rovinného broušení došlo k přeměření obrobku pomocí hloubkoměru a došlo k naměření výšky po celém obrobku 28,45 mm. Celková hloubka řezu vyšla tedy o celé 2 setiny menší, ale jelikož se jedná o metodu hloubkového broušení, tato chyba je zanedbatelná.



Obrázek 22: Využitý kotouč 3M Cubitron

6.2.2 Brusný kotouč Tyrolit strato ultra

- 1. měření

K druhému způsobu broušení byl zvolen kotouč od firmy Tyrolit, který nebyl v minulosti použit a bylo nutné začít jeho orovnááním. Z původního průměru 240 mm byl brusný kotouč orovnáán na průměr 239,6 mm. První měření brusným kotoučem značky Tyrolit strato ultra se uskutečnilo oscilačním způsobem a řezné podmínky byly zadány stejně, jako pro 3. měření brusným kotoučem značky 3M cubitron:

Zadané řezné podmínky	
Rychlost posuvu stolu	$v_{ft} = 17,4 \text{ m/min}$
Příčný pohyb kotouče	$f_a = 3 \text{ mm}$
Řezná rychlost	$v_c = 35 \text{ mm/s}$
Hloubka záběru	$a_e = 0,015 \text{ mm}$
Přídavek na broušení	$p = 0,5 \text{ mm}$
Počet průchodů na vyjiskření	$n_v = 4$

Tabulka 7: Zadané řezné podmínky pro 1. měření brusným kotoučem Tyrolit strato ultra

Celý proces broušení oscilačním způsobem trval přibližně 20 minut podle stopek. Během probíhajícího obrábění nebyl zaznamenán žádný problém. Po posledním vyjiskření došlo k vypnutí stroje a přešlo se k přeměření výšky obrobku. Naměřená výška obrobeného materiálu byla 28,05 mm. Bohužel tato hodnota neodpovídá původně zadanému přídavku na broušení o 1 desetinu milimetru. Zadané parametry oscilačního broušení byly příliš náročné na používaný brusný kotouč Tyrolit strato ultra a při obrábění došlo k jeho značnému opotřebení.

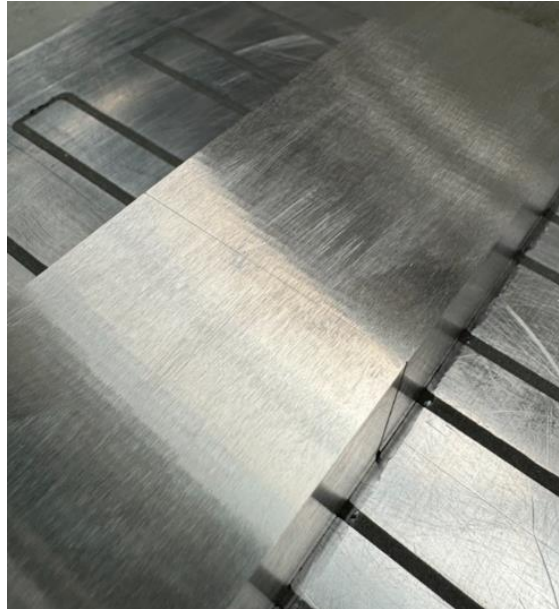
- 2. měření

Pro druhé měření brusným kotoučem Tyrolit strato ultra bylo zvoleno ruční broušení. Stejně jako před každým jiným měřením muselo dojít k orovnáání kotouče, které zajistí srovnání a sjednocení povrchu. Orovňovací proces snížil průměr brusného kotouče na 238,8 mm. Řezné podmínky byly zadány:

Zadané řezné podmínky	
Rychlost posuvu stolu	$v_{ft} = 17,4 \text{ m/min}$
Příčný pohyb kotouče	$f_a = 0,2 \text{ mm}$
Řezná rychlost	$v_c = 35 \text{ mm/s}$
Hloubka záběru	$a_e = 0,5 \text{ mm}$

Tabulka 8: Zadané řezné podmínky pro 2. měření brusným kotoučem Tyrolit strato ultra

Celý broušící cyklus trval 4 minuty a 57 sekund. Výsledný čas je podobný, jako u předešlého obrábění ručním broušením s volenou hloubkou řezu 0,5 mm. Výsledný povrch obráběného materiálu byl uznán za velice hladký z vizuální a dotykové zkoušky. Výška obrobku odpovídá zadané hloubce řezu, tedy 27,56 mm. Na brusným kotouči došlo ke sražení jeho hrany v šířce 5,1 mm.



Obrázek 23: Výsledný povrch obrobené oceli po zvolených podmínkách z 2. měření

- 3. měření

Předposlední měření v pořadí proběhlo se stejným průměrem kotouče 238,8 mm, jelikož k náběhu na materiál došlo ze strany brusného kotouče bez sražení z předešlého měřicího pokusu. Na 3. pokus měření došlo poprvé ke změně rychlosti posuvu stolu brusky a k nastavení velké hloubky řezu. Všechny řezné podmínky byly konkrétně nastaveny:

Zadané řezné podmínky	
Rychlost posuvu stolu	$v_{ft} = 11,4 \text{ m/min}$
Příčný pohyb kotouče	$f_a = 0,2 \text{ mm}$
Řezná rychlost	$v_c = 35 \text{ mm/s}$
Hloubka záběru	$a_e = 1 \text{ mm}$

Tabulka 9: Zadané řezné podmínky pro 3. měření brusným kotoučem Tyrolit strato ultra

I se snížením rychlosti posuvu stolu brusky byla zadaná hloubka záběru příliš velká na používaný brusný kotouč. Velký obrus nástroje způsobilo velice drsný a nerovný povrch obráběného materiálu. Celkový čas broušení trval 6 minut a 53 vteřin. Výsledná výška obrobku byla naměřena hloubkoměrem na 26,54 mm. Tato metoda byla zhodnocena jako neakceptovatelná, a proto s ní nebudeme v budoucnu počítat.

- 4. měření

Poslední měření bylo věnováno k ověření teorie, zda vyšší řezná rychlost zajistí vyšší tvrdost řezného nástroje. Zadaná řezná rychlost brusného kotouče byla zvolena vyšší než rychlost dovolená z předepsaného značení. Před posledním pokusem došlo k finálnímu orovnáání a výsledný průměr brusného kotouče činil 235,6 mm. Poslední řezné podmínky byly nastaveny následovně:

Zadané řezné podmínky	
Rychlost posuvu stolu	$v_{ft} = 17,4 \text{ m/min}$
Příčný pohyb kotouče	$f_a = 0,2 \text{ mm}$
Řezná rychlost	$v_c = 43 \text{ mm/s}$
Hloubka záběru	$a_e = 0,5 \text{ mm}$

Tabulka 10: Zadané řezné podmínky pro 4. měření brusným kotoučem Tyrolit strato ultra

Poslednímu měření byl zaznamenán čas pomocí stopek na 4 minuty a 55 vteřin. Výsledná výška materiálu byla přeměřena hloubkoměrem a skutečná hloubka řezu odpovídala zadané hloubce řezu. Sražení na brusném kotouči bylo znatelnější, než u kterékoliv předešlé metody broušení a odpovídalo šířce 8,9 mm. Doposud si brusný kotouč Tyrolit strato ultra za zadaných podmínek nevedl moc dobře a proto došlo ke zvýšení řezné rychlosti, která měla potvrdit teorii, že vyšší rychlost zajistí vyšší tvrdost řezného nástroje. Bohužel po výsledném měření byl zjištěn velký úbytek materiálu z brusného kotouče a teorie se nepotvrdila.



Obrázek 24: Využitý brusný kotouč Tyrolit strato ultra

6.3 Vypočtené hodnoty

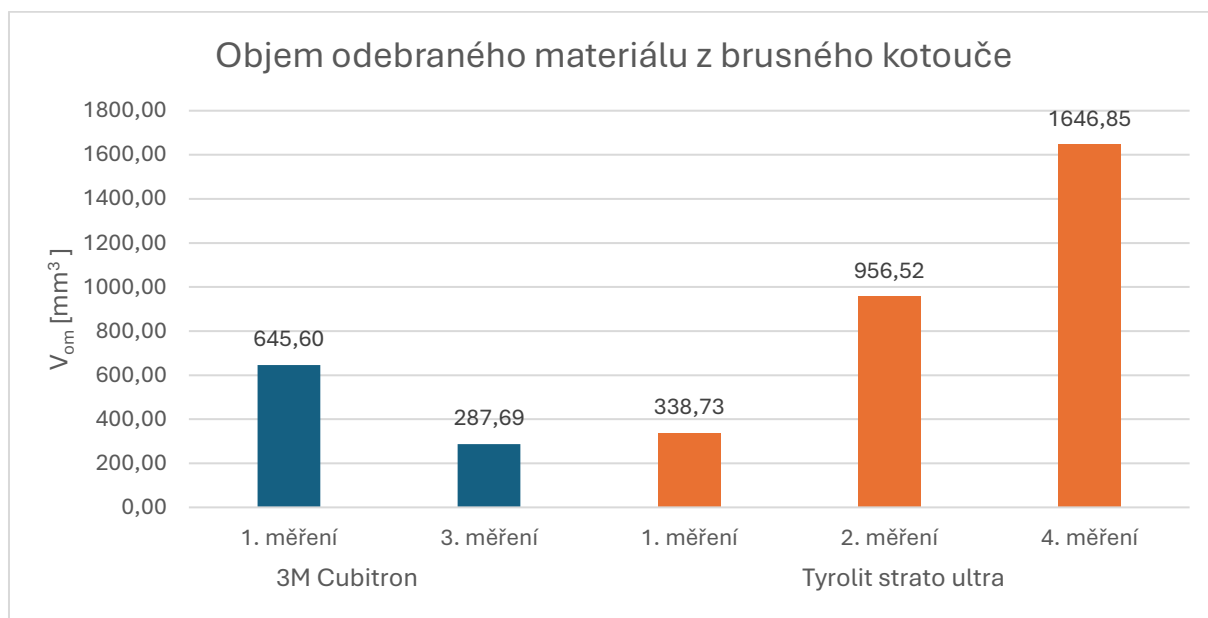
Ze zadaných řezných podmínek a následných změřených hodnot bylo možné dopočítat hodnoty, které jsou vhodné k vyhodnocení vlastností brusného kotouče.

	3M Cubitron		Tyrolit strato ultra			
	1. měření	3. měření	1. měření	2. měření	3. měření	4. měření
$V_{om} [mm^3]$	645,60	287,69	338,73	956,52	5626,59	1646,85
$\psi [^\circ]$	5,66	0,98	0,91	5,25	7,44	5,29
$L_{pl} [mm]$	10,14	1,75	1,89	10,93	15,45	10,85
$t_{AS} [min]$	5,26	27,96	27,96	5,26	8,03	5,26
$h_{eq} [\mu m]$	51,79	1,55	1,78	59,18	77,55	48,17

Tabulka 11: Vypočtené hodnoty na základě hodnot naměřených

6.3.1 Objem odebraného materiálu z brusného kotouče

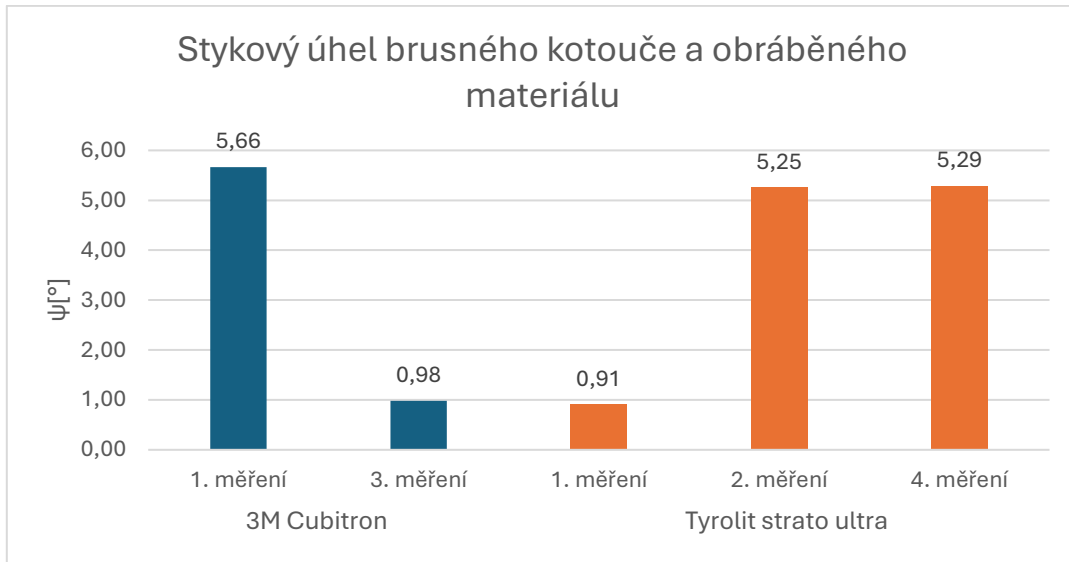
Jedná se o úbytek brusného materiálu z použitého nástroje způsobené opotřebením. Vliv na úbytek materiálu z brusného kotouče mají především jeho tvrdost, použitá chladicí kapalina, druh zvoleného brusiva a nastavené parametry obrábění. Z výsledného grafu lze vyčíst, že největší opotřebení utrpěl brusný kotouč Tyrolit strato ultra ručním broušením. Na vysoké opotřebení kotouče měla vliv zadaná hloubka záběru, jejíž účinek neztlumila ani zadaná snížená rychlost posuvu stolu. Nejmenší úbytek materiálu byl zaznamenán na kotouči 3M Cubitron, při oscilačním broušením.



Graf 1: Grafické porovnání objemu odebraného materiálu z brusného kotouče

6.3.2 Stykový úhel brusného kotouče a obráběného materiálu

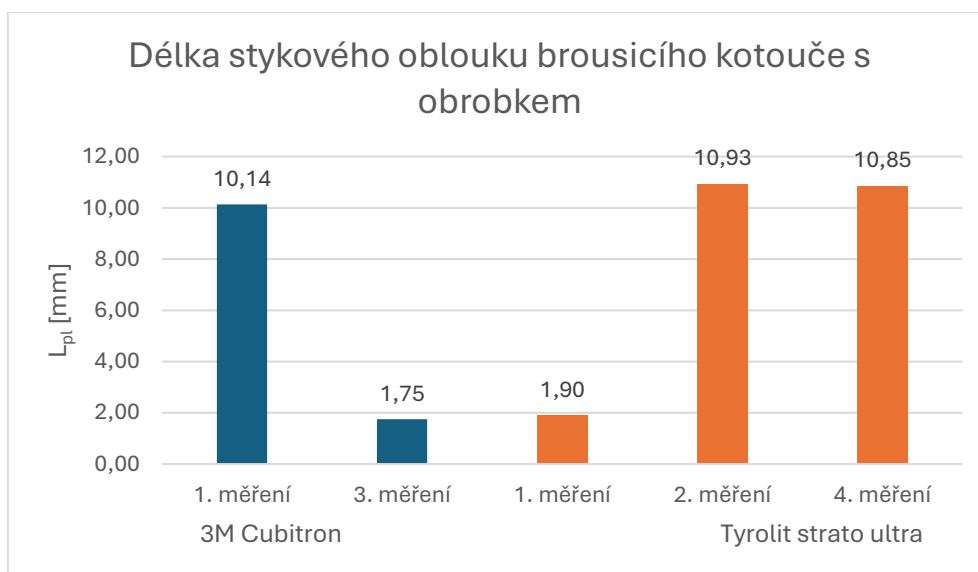
Stykový úhel má ovlivňuje velikost odebraného materiálu a celkovou efektivitu, protože má vliv na kontaktní plochu mezi brusným kotoučem a obráběným materiálem. Nejvyšší stykový úhel byl naměřen pro třetí měření. Větší stykový úhel je pro hloubkový broušení vyžadován.



Graf 2: Grafické porovnání velikosti stykového úhlu

6.3.3 Délka stykového oblouku brousicího kotouče s obrobkem

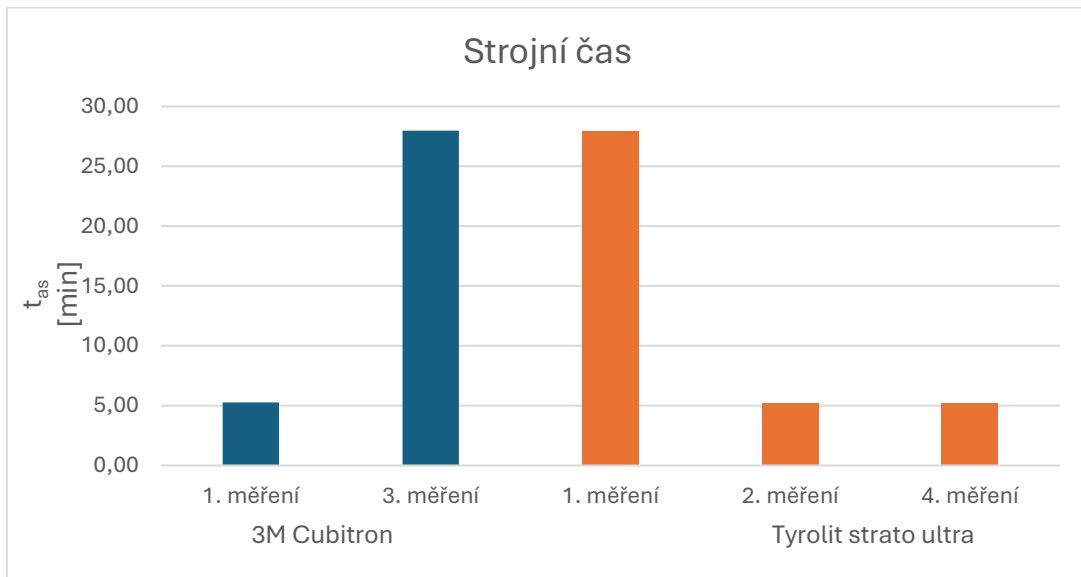
Délka stykového oblouku brousicího nástroje s obráběným materiálem má vliv na výrobu tepla, výkonnost broušení nebo opotřebení kotouče. Vyšší hodnota této délky znamená, že kontaktní plocha kotouče zajišťuje větší úběr materiálu, a to zaručuje zvýšenou produktivitu procesu.



Graf 3: Grafické porovnání délky stykového oblouku brousicího kotouče s obrobkem

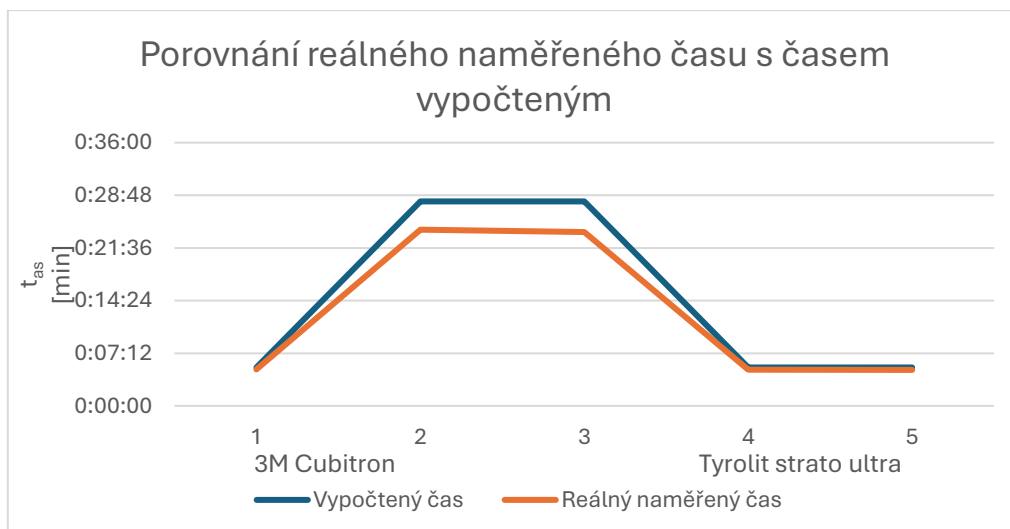
6.3.4 Strojní čas

Na výpočet strojního času má vliv především axiální posuv stolu a hloubka záběru. Jednotlivá měření měla tyto zadané podmínky stejné a z tohoto důvodu vyplývá, že vypočtené strojní hodnoty se rovnají. Proces ručního broušení je založen na jednom průchodu, a tudíž jsou výsledné časy násobně kratší než u broušení oscilačním způsobem.



Graf 4: Grafické porovnání strojního času

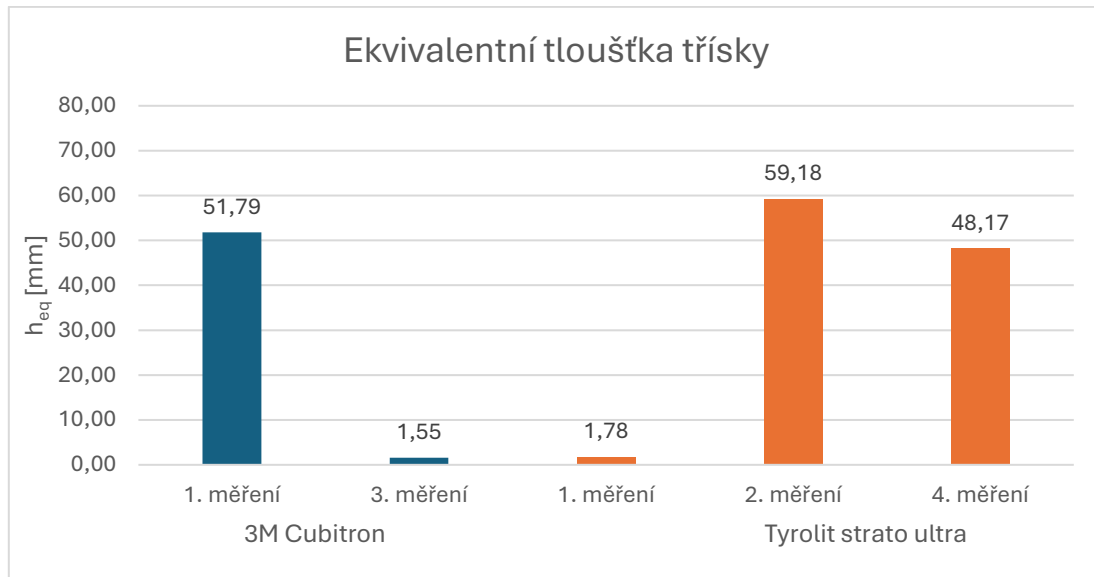
V následujícím grafu je zobrazeno porovnání naměřeného strojního času pomocí stopek a strojního času získaného výpočty. Hodnoty naměřené pomocí stopek jsou kratší než časy vypočtené. Výsledky mohly být ovlivněny lidským faktorem.



Graf 5: Grafické porovnání reálného naměřeného času a času vypočteného

6.3.5 Ekvivalentní tloušťka třísky

Na výslednou ekvivalentní tloušťku třísky má vliv zadaná hloubka záběru. Malá ekvivalentní tloušťka třísky má vliv na vytvoření jemného povrchu a menší opotřebení brusného kotouče. Velká ekvivalentní tloušťka třísky vede k většímu odebrání materiálu, ale způsobuje větší opotřebení brusného kotouče.



Graf 6: Grafické porovnání ekvivalentní tloušťky třísky

6.4 Ekonomické vyhodnocení

Ekonomické zhodnocení bude zaměřeno na finanční vyčíslení jednotlivých měření uskutečněných kotouči 3M Cubitron a Tyrolit strato ultra. Ze základních technických parametrů použitého stroje byl zjištěn jeho výkon. Dále byla stanovena cena kWh na provoz pracovního stroje, průměrná mzda na vyplacení operátora pracovního stroje a cena nástrojové oceli. Celkové finanční náklady jednotlivých procesů jsou vypočteny z nákladů na provoz stroje, nákladů na obsluhu a cenově vyčísleného úbytku brusného kotouče. [15], [16], [17], [18]

Hodnotící ukazatelé	Měrná jednotka
Výkon stroje	2,2 kW
Cena 1 kWh	4,5 Kč
Plat obsluhy stroje + odvody zaměstnavatele	33 900 Kč + 10 610 Kč
Cena nástrojové oceli ČSN 19 437 50,4 x 40,4 x 1000	6 769 Kč
Pořizovací cena brusného kotouče 3M Cubitron	7 000 Kč
Pořizovací cena brusného kotouče Tyrolit strato ultra	5 500 Kč

Tabulka 12: Konkrétní hodnoty vyhodnocovaných ukazatelů

Cenu jednoho obrobku lze získat z celkové délky polotovaru, která se vydělí délkou požadovaného obrobku a následně z celkové ceny dojde k vyčíslení hodnoty jednoho obrobku pomocí vztahu:

$$\text{Počet obrobků z jednoho polotovaru} = \frac{\text{Délka polotovaru}}{\text{Délka obrobku}} = \frac{1000}{150} \cong 6 \text{ ks} \quad (14)$$

$$\text{Cena jednotného obrobku} = \frac{\text{Cena polotovaru}}{\text{Počet obrobku z jednoho polotovaru}} = \frac{6769}{6} \cong 1128 \text{ Kč} \quad (15)$$

Z výkonu stroje a průměrné ceny 1 kWh lze vypočítat provoz stroje na jednu hodinu. Hodnota provozu stroje na minutu: [15], [16]

$$\text{Cena provozu stroje} = \frac{\text{výkon} \cdot \text{cena kWh}}{60} * t_{AS} \text{ [Kč]} \quad (16)$$

Celkové finanční náklady na vyplacení zaměstnance se skládají z hrubé mzdy a zákonných odvodů zaměstnavatele. Vybraný měsíc pro výpočet se skládá ze 160 pracovních hodin. Výpočet hodinové sazby obsluhy na minutu se zjistí ze vztahu: [17], [18]

$$\text{Náklady na obsluhu} = \frac{\text{hrubá mzda} + \text{zákonné odvody}}{\frac{\text{pracovní hodiny}}{60}} * t_{AS} [\text{Kč}] \quad (17)$$

Cenu úbytku kotouče lze spočítat pomocí vztahu:

$$\text{Cena úbytku brusného kotouče} = \frac{\text{pořizovací cena brusného kotouče}}{\text{Užitný objem brusného kotouče}} * V_{Om} [\text{Kč}] \quad (18)$$

	3M Cubitron		Tyrolit strato ultra		
	1. měření	3. měření	1. měření	2. měření	4. měření
$t_{AS} [\text{min}]$	5,26	27,97	27,97	5,26	5,26
<i>Cena provozu stroje [Kč]</i>	0,89	4,62	4,62	0,89	0,89
<i>Náklady na obsluhu [Kč]</i>	26,01	138,33	138,33	26,01	26,01
<i>Cena úbytku brusného kotouče [Kč]</i>	1,63	0,73	0,67	1,9	3,27
<i>Cena polotovaru [Kč]</i>	1128	1128	1128	1128	1128
<i>Celkové finanční náklady [Kč]</i>	1156,53	1271,68	1271,62	1156,8	1158,17

Tabulka 13: Vypočtené hodnoty využité k vypočítání celkových nákladů

Ekonomické vyhodnocení bylo vztaženo na výrobu jednoho obrobku za určitý čas t_{AS} . K výpočtu byly využity hodnoty provozu výrobního stroje, náklady na vyplacení obsluhy a vyčíslený úběr materiálu. Z výsledných hodnot je zřejmé, že z důvodu dlouhých výrobních časů na jeden obrobek je broušení oscilačním způsobem nákladnější než broušení ručním způsobem. Z vypočtených hodnot pro hloubkové broušení vychází nejlépe možnost 1. měření s kotoučem 3M Cubitron, u kterého celkové finanční náklady činí 1156,53 Kč. Nejvíce nákladné vyšlo 3. měření brusným kotoučem 3M Cubitron, u něhož výsledné náklady na výrobu jednoho polotovaru jsou ve výši 1271,68 Kč.

7. Závěr

Zadáním této bakalářské práce bylo seznámení s procesem rovinného broušení nástrojových ocelí. V první teoretické části byla zmíněna historie a vysvětlena podstata procesu broušení a jeho různé metody.

V následující části byla rozebrána správná volba broušicího nástroje s ohledem na výběr vhodného broušicího materiálu, zrnitosti broušicího materiálu, tvrdosti a struktury nástroje a materiálu pojiva. Nedílnou součástí týkající se brusného nástroje je jeho správné upínání a orovnávaní po broušicím procesu.

Důležitá kapitola této bakalářské práce se týká řezných podmínek, jelikož jejich volba má přímý vliv na výslednou jakost broušených ploch. Jejich nevhodné zvolení může neblaze ovlivnit efektivitu procesu, jeho finanční náročnost nebo drsnost povrchu. K předejití špatnému zvolení řezných podmínek jsou sepsány tabulky, nomogramy nebo normativy.

V poslední řadě z teoretické části bylo důležité zmínit materiál obrobku. Mezi její typické charakteristické vlastnosti spadá vysoká tvrdost, houževnatost a prokalitelnost. Podle obsahu legujících prvků se nástrojové oceli rozdělují na legované a nelegované.

Úkolem experimentální části bylo vyhodnocení dvou brusných kotoučů. První testovaný brusný kotouč byl značky 3M Cubitron, druhý testovaný kotouč byl Tyrolit strato ultra. Oba kotouče byly podrobeny několika měřením s různými zadanými hodnotami.

Z naměřených hodnot pomocí vzorců bylo možné vypočítat stykový úhel brusného kotouče a obráběného materiálu, délku stykového oblouku broušicího kotouče s obrobkem, ekvivalentní hloubku třísky, strojní čas a objem odebraného kotouče. Mezi nejdůležitější vypočtené parametry spadá objem odebraného kotouče a strojní čas. Tyto dvě veličiny mají přímý vliv na výsledné celkové finanční náklady.

Nejmenší objemy odebraného materiálu byly naměřeny u oscilačního broušení, jelikož byla zadaná malá hloubka záběru, která nezpůsobovala takové zatížení brusných zrn. Za cenu malého záběru je několikanásobný strojní čas, než u broušení ručním způsobem

Největší úběr materiálu brusného kotouče byl zaznamenán u 4. měření kotoučem Tyrolit strato ultra. U tohoto měření bylo ve snaze potvrdit teorii, kdy zadaná vyšší řezná rychlost zajistí vyšší tvrdost kotouče. Bohužel po výsledném přeměření kotouče bylo zjištěno, že došlo k největšímu objemovému úběru na kotouči a teorie o vyšší tvrdosti způsobené vyšší řeznou rychlostí se nepotvrdila.

Strojní časy stejně jako hodnoty úběru materiálu na brusným kotouči byly využity k celkovému ekonomickému vyhodnocení. K peněžnímu zhodnocení bylo nutné si dohledat informace o výkonu stroje, cený jedné kWh, plat zaměstnance s odvody, které musí vyplácet zaměstnavatel, přibližnou cenu polotovaru a průměrné pořizovací náklady obou brusných kotoučů. Z těchto dohledaných hodnot bylo možné spočítat provoz stroje, náklady na obsluhu, cenu úbytku objemu z brusného kotouče a cenu polotovaru potřebné na výrobu jednoho obrobku. Z výsledků celkových nákladů na výrobu jednoho obrobku je možné vyčíst, že nejlevnější varianta byla získána 1. měřením brusným kotoučem 3M Cubitron ručním způsobem. V závislosti na odebraném materiálu ručním i oscilačním způsobem vychází lépe brusný kotouč 3M Cubitron. V porovnání s druhým brusným kotoučem Tyrolit strato ultra během broušení za stejných podmínek utrpěl menší obrus.

Seznam literatury

- [1] MASLOV, Je. N. *Teorie broušení kovů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1979.
- [2] HLUCHÝ, Miroslav a KOLOUCH, Jan. *Strojírenská technologie 1. 4.*, rev. vyd. Praha: Scientia, 2007. ISBN 978-80-86960-26-5.
- [3] MÁDL, Jan a BARCAL, Jaroslav. *Základy technologie II*. Vyd. 2. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03733-1.
- [4] ROWE, W. Brian. *Principles of Modern Grinding Technology*. 2nd edition. 225 Wyman Street, Waltham, MA 02451, USA: Elsevier, 2014. ISBN 978-0-12-32324271-4.
- [5] ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *Technologie obrábění*. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2013, ISBN 978-80-248-3012-4 Dostupné z: http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_001/
- [6] ŘASA, Jaroslav a GABRIEL, Vladimír. *Strojírenská technologie 3. 2. vyd.* Praha: Scientia, 2005. ISBN 80-7183-337-1.
- [7] BYRNE, Patrick. *Turning, milling and grinding processes*. London: Arnold, 1996. ISBN 03-406-2503-1.
- [8] HUMÁR, Anton. *Technologie I: Technologie obrábění – 1. část* [online]. Brno, 2003 [cit. 2024-08-05]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI_TO-1cast.pdf. Interaktivní multimediální text pro bakalářský a magisterský studijní program. VUT v Brně, fakulta Strojního inženýrství.
- [9] HUMÁR, Anton. *Technologie I: Technologie obrábění – 3. část* [online]. Brno, 2005 [cit. 2024-08-05]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/13479-Technologie-i-technologie- obrabeni-3-cast.html> . Interaktivní multimediální text pro bakalářský a magisterský studijní program. VUT v Brně, fakulta Strojního inženýrství.
- [10] MÍŠEK, Bohumil. *Konstrukční materiály*. Brno: TESYDO, 2019. ISBN 978-80-87102-23-7.
- [11] JERSÁK, Jan. *Základní konvenční technologie obrábění broušení brousicími kotouči* [online]. In: . 06.06.2012 [cit. 2024-08-05]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/14919312-Zakladni-konvencni-technologie-obrabeni-brousenibrousicimi-kotouci.html>
- [12] BARTOŇOVÁ, Renáta. *Technologie broušení*. Online. 2012. Dostupné z: http://moodle2.voskop.eu/download/teu/U01_Technologie_brouseni.pdf. [cit. 2024-08-05].
- [13] ELUC. *Řezná síla*. Online. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1279>. [cit. 2024-08-05].

- [14] Kinematika obrábění. Online. *MM Průmyslové spektrum*. 2012. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/kinematika-obrabeni>. [cit. 2024-08-05].
- [15] Příručka ke stroji BRH 20 CNC. Online. Mikronex. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/84965/F2-BP-2019-Mistr-Jan-priloha-Bruska%20BRH20%20CNC.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. [cit. 2024-08-05].
- [16] EPOJISTENI.CZ. *Cena elektřiny za kWh*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.epojisteni.cz/cena-elektriny-za-kwh/>. [cit. 2024-08-05].
- [17] PERSONÁLKA. *Nabídka práce: Brusič*. Online. 2024. Dostupné z: <https://personalka.cz/prace/brusic>. [cit. 2024-08-05].
- [18] JANKŮ NÁSTROJOVÉ OCELI S.R.O. *Ceník broušené nebo frézované nástrojové oceli*. Online. 2023. Dostupné z: http://www.nastrojove-oceli.cz/rc_images/cenik.pdf. [cit. 2024-08-05].
- [19] SDRUŽENÍ PRO INTEGRACI A MIGRACI. *Povinnosti zaměstnavatele a odvody*. Online. 2011, 2024. Dostupné z: <https://www.migrace.com/cs/poradna/informace-pro-cizince/cizinci-ze-zemi-mimo-eu/pracovni-pomer/zamestnani-mimo-eu-odvody>. [cit. 2024-08-05].
- [20] ELUC. *Broušení*. Online. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1825>. [cit. 2024-08-05].
- [21] Jan Mádl. *Teorie obrábění*. Ediční středisko ČVUT, 1989.
- [22] STROJMOTIV. *Brusky bezhroté*. Online. Dostupné z: <https://strojmotiv.cz/stroje/brusky-bezhrote/>. [cit. 2024-08-05].
- [23] TYROLIT. *Katalog skladových výrobků pro univerzální broušení*. Online. 2016. Dostupné z: https://www.carborundum.cz/upload/katalogy/CZ/2016/TYROLIT_CZ_2016_A5_Univerzalnini.pdf. [cit. 2024-08-05].
- [24] ABRANOVA. *Umělý růžový korund 98A*. Online. 2024. Dostupné z: <https://abranova.cz/umely-ruzovy-korund-legovany-chromem>. [cit. 2024-08-05].
- [25] ARBRNO. *Plochá příruba*. Online. 2026. Dostupné z: <https://www.arbrno.cz/vyrobni-program/priruby/priruba-plocha-priruba-privarovaci/>. [cit. 2024-08-05].
- [26] ELUC. *Chlazení*. Online. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1281>. [cit. 2024-08-05].
- [27] ELUC. *Řezné podmínky*. Online. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1277>. [cit. 2024-08-05].
- [28] JERSÁK, Jan. *Broušení broušícími kotouči*. Online. S. 17. Dostupné z: http://educom.tul.cz/educom/inovace/TOB/VY_03_55-z%C3%A1kladn%C3%AD%20konven%C4%8Dn%C3%AD%20tchgie%20obr%C3%A1b

%C4%9Bn%C3%AD_BROU%C5%A0EN%C3%8D%20BROUS%C3%8DC%C3%8DMI%20KOTOU%C4%8CI_MZ_6.pdf. [cit. 2024-08-05].

- [29] KOČMAN, Karel. Technologie obrábění. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN 80-214-3068-0
- [30] ELUC. *Strojní časy*. Online. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1280>. [cit. 2024-08-05].

Seznam obrázků

- Obr. 1: Struktura brousicího nástroje [20]
- Obr. 2: Tvar zrna brousicího kotouče [6]
- Obr. 3: Bezhrotá bruska [22]
- Obr. 4: Zápichové broušení [6]
- Obr. 5: Rovinné broušení čelem brousicího kotouče [20]
- Obr. 6: Základní tvary brousicích nástrojů [20]
- Obr. 7: Značení tvaru, rozměrů a specifikace brousicích nástrojů podle firmy Tyrolit [23]
- Obr. 8: Tvrdost brousicích materiálů v závislosti na teplotě [4]
- Obr. 9: Umělý růžový korund 98A [24]
- Obr. 10: Plochá příruba [25]
- Obr. 11: Orovnávače [6]
- Obr. 12: Přívod řezné kapaliny do místa broušení [26]
- Obr. 13: Zobrazení řezných pohybů [12]
- Obr. 14: Vliv řezných podmínek na reálnou hloubku řezu [4]
- Obr. 15: Ekvivalentní hloubka řezu [28]
- Obr. 16: Řezné síly při broušení [29]
- Obr. 17: Obrázek výpočtu strojního času pro rovinné broušení [30]
- Obr. 18: Rovinná bruska BRH 20. Foto autor
- Obr. 19: Ovládací panel rovinné brusky. Foto autor
- Obr. 20: Průběh procesu rovinného broušení. Foto autor
- Obr. 21: Výsledný povrch obráběné oceli po nevhodně zvolených řezných podmínkách. Foto autor
- Obr. 22: Využitý kotouč 3M Cubitron. Foto autor
- Obr. 23: Výsledný povrch obrobené oceli po zvolených podmínkách z 2. měření. Foto autor
- Obr. 24: Využitý brusný kotouč Tyrolit strato ultra. Foto autor

Seznam tabulek

Tabulky

Tab. 1: Zrnitost FEPA [23]

Tab. 2: Přesnost a jakost ploch obrobených rovinným broušením [6]

Tab. 3: Rozdělení nástrojových ocelí [10]

Tab. 4: Zadané řezné podmínky pro 1. měření brusným kotoučem 3M Cubitron

Tab. 5: Zadané řezné podmínky pro 2. měření brusným kotoučem 3M Cubitron

Tab. 6: Zadané řezné podmínky pro 3. měření brusným kotoučem 3M Cubitron

Tab. 7: Zadané řezné podmínky pro 1. měření brusným kotoučem Tyrolit strato ultra

Tab. 8: Zadané řezné podmínky pro 2. měření brusným kotoučem Tyrolit strato ultra

Tab. 9: Zadané řezné podmínky pro 3. měření brusným kotoučem Tyrolit strato ultra

Tab. 10: Zadané řezné podmínky pro 4. měření brusným kotoučem Tyrolit strato ultra

Tab. 11: Vypočtené hodnoty na základě hodnot naměřených

Tab. 12: Konkrétní hodnoty vyhodnocovaných ukazatelů

Tab. 13: Vypočtené hodnoty využité k vypočítání celkových nákladů

Seznam grafů

Graf 1: Grafické porovnání objemu odebraného materiálu z brusného kotouče

Graf 2: Grafické porovnání velikosti stykového úhlu

Graf 3: Grafické porovnání délky stykového oblouku broušícího kotouče s obrobkem

Graf 4: Grafické porovnání strojního času

Graf 5: Grafické porovnání reálného naměřeného času a času vypočteného

Graf 6: Grafické porovnání ekvivalentní tloušťky třísky