

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Pracovní podmínky a silové účinky při broušení

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



Autor: Tomáš KAMENSKÝ

Studijní program: B 2342 Teoretický základ strojního inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Pavel Zeman, Ph.D.

Konzultant: Ing. Jaroslav Kovalčík, Ph.D.

Praha, 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kamenský** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **482638**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Pracovní podmínky a silové účinky při broušení

Název bakalářské práce anglicky:

Working conditions and force effects in grinding

Pokyny pro vypracování:

1. Průběh a metody broušení
2. Nástroje a pracovní podmínky pro broušení
3. Silové účinky při broušení a jejich stanovení
4. Volba pracovních podmínek dle materiálu obrobku
5. Shmutí poznatků

Seznam doporučené literatury:

Doporučená literatura:

- [1] MÁDL, J.: Teorie obrábění. Fakulta strojní, ČVUT Praha, 1990. 156 s.
- [2] MÁDL, J.: Experimentální metody v teorii obrábění. Fakulta strojní, ČVUT Praha, 1988. 153 s.
- [3] Maslov, J. N.: Teorie broušení kovů, Praha: SNTL, 1979.
- [4] Malkin, S., Changseng, G.: Grinding Technology, New York: Industrial Press, 2008.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Pavel Zeman, Ph.D., ústav výrobních strojů a zařízení FS

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

Ing. Jaroslav Kovalčík, Ph.D., 12135

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2021** Termín odevzdání bakalářské práce: **29.07.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Pavel Zeman, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

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

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

_____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu použité literatury.

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

V Praze dne 29. 07. 2020

.....

podpis

Poděkování

Tímto děkuji vedoucímu mé práce, Ing. Pavlovi Zemanovi, Ph.D. a konzultantovi, Ing. Jaroslavu Kovalčíkovi, Ph.D, za příkladné a ochotné vedení práce a předávání rad při jejím vypracování.

Dále děkuji své přítelkyni, mé rodině a všem blízkým za podporu při tvorbě bakalářské práce a za to, že byli mou oporou při celém trvání mého studia.

Anotace

Tato bakalářská práce je zaměřena na technologii broušení, síly vznikající v procesu broušení, volbu brusného kotouče a pracovních podmínek dle materiálu obrobku. V úvodních kapitolách práce je popsána technologie broušení, brusné kotouče a pracovní podmínky a jednotlivé metody broušení. Hlavním cílem práce je popsat silové účinky a pracovní podmínky dle materiálu obrobku. Poslední kapitola je věnována volbě brusného kotouče a pracovních podmínek s praktickou ukázkou.

Klíčová slova

Broušení, brusný kotouč, silové účinky při broušení, pracovní podmínky, metody broušení

Annotation

This bachelor thesis focuses on grinding technology, forces generated in the grinding process, choice of grinding wheel and working conditions according to the workpiece material. In the introductory chapters of the thesis the grinding technology, grinding wheels and working conditions and the different grinding methods are described. The main objective of the thesis is to describe the force effects and working conditions according to the workpiece material. The last chapter is devoted to the choice of grinding wheel and working conditions with a practical demonstration.

Keywords

Grinding, grinding wheel, grinding force effects, working conditions, grinding methods

Obsah

Obsah	7
Seznam použitých zkratk, značek a veličin.....	9
1 Úvod.....	12
2 Základní popis technologie broušení	13
2.1 Úvod	13
2.2 Tvorba třísky.....	13
2.2.1 Mechanika tvorby třísky.....	13
2.2.2 Druhy třísek a faktory mající vliv na tvar vzniklé třísky	14
2.3 Geometrie záběru	15
3 Nástroje a pracovní podmínky	16
3.1 Úvod	16
3.2 Materiál zrn	17
3.3 Pojivo.....	18
3.4 Zrnitost	19
3.5 Tvrdost	20
3.6 Struktura	20
3.7 Koncentrace	20
3.8 Značení, upínání a vyvažování kotoučů.....	21
3.9 Pracovní podmínky.....	21
4 Metody Broušení.....	26
4.1 Úvod	26
4.2 Základní rozdělení metod broušení	26
4.3 Popis jednotlivých metod broušení	27
4.3.1 Obvodové broušení do kulata vnějších ploch	27
4.3.2 Obvodové broušení dokulata vnitřních ploch.....	29
4.3.3 Rovinné broušení	31
4.3.4 Tvarové broušení.....	33
5 Silové účinky při broušení	34
5.1 Úvod	34
5.2 Silový rozklad.....	34
5.3 Parametry ovlivňující vliv silových účinků.....	35
5.4 Měření sil při broušení	38

5.5	Metody výpočtu řezné síly při broušení.....	40
6	Volba pracovních podmínek dle materiálu obrobku	44
6.1	Úvod	44
6.2	Rozbor materiálu obrobku	45
6.3	Rozbor výkresové dokumentace	46
6.4	Volba metody broušení a stroje	46
6.5	Volba brusiva a vlastností brusného kotouče na základě materiálu obrobku	47
6.5.1	Nelegované a nízkolegované oceli	47
6.5.2	Vysoce legované oceli	48
6.5.3	Nerezová ocel.....	49
6.5.4	Litina.....	50
6.5.5	Titan a jeho slitiny	50
6.5.6	Barevné kovy.....	51
6.5.7	Tvrdokov.....	51
6.6	Volba pracovních podmínek	51
6.7	Možné vady při broušení a jejich příčiny	54
6.8	Ekonomické zhodnocení procesu broušení	55
6.9	Praktická ukázka volby brusného kotouče a pracovních podmínek	59
7	Závěr.....	69
	Seznam obrázků	70
	Seznam tabulek.....	71
	Seznam použitého software.....	76
	Seznam příloh.....	77

Seznam použitých zkratk, značek a veličin

Seznam použitých chemických prvků a chemických sloučenin

Značka	Chemický prvek/ chemická sloučenina
Al ₂ O ₃	Oxid hlinitý
C	Uhlík
Cr	Chrom
Cu	Měď
CBN	Kubický nitrid boru
Mn	Mangan
Mo	Molybden
Ni	Nikl
P	Fosfor
S	Síra
Si	Křemík
SiO ₂	Oxid křemičitý
SiC	Karbid křemíku

Seznam použitých veličin

Veličina	Jednotka	Popis
α_n	°	Normální úhel hřbetu
γ_n	°	Normální úhel čela
δ_n	°	Normální úhel řezu
λ_{Ke}	mm	Efektivní vzdálenost zrn
μ	–	Poměr sil při broušení
φ	°	Úhel náběhu
ρ_z	μm	Zaoblení vrcholu zrn
a_e	mm	Radiální hloubka řezu
a_{max}	mm	Tloušťka střední části třísky

a_p	mm	Axiální hloubka řezu
B	mm	Šířka brusného kotouče
B_b	mm	Příčná dráha nástroje
b	mm	Příčná délka obrobku
D_s	mm	Průměr brusného kotouče
d_w	mm	Průměr obrobku
F	N	Síla řezání
F_c	N	Řezná síla
F_{c1}	N	Řezná síla na jedno zrno
F_f	N	Síla posuvu
F_p	N	Pasivní síla
f_a	mm	Axiální posuv
f_r	mm	Radiální posuv brusného kotouče
h_{eq}	mm	Ekvivalentní tloušťka broušení
i	-	Počet řezů
K	-	Korekční faktor
k_c	$N \cdot mm^{-2}$	Měrná řezná síla
$k_{c1,1}$	$N \cdot mm^{-2}$	Měrná řezná síla pro plochu odřezávané vrstvy 1 mm^2
L	mm	Podélná dráha kotouče
l	mm	Podélná délka obrobku
m_c	-	Materiálová konstanta určující vliv tloušťky odřezávané vrstvy na změnu měrné řezné síly
N	Kč	Výrobní náklady
N_n	Kč	Náklady na nástroje
N_s	Kč	Náklady na strojní práci
N_{vn}	Kč	Náklady na výměnu nástroje
n	Dvojjzdvih $\cdot \text{min}^{-1}$	Počet dvojjzdvihů
n_{ok}	$\text{Ot} \cdot \text{min}^{-1}$	Otáčky opěrného kotouče

n_{pk}	$Ot.min^{-1}$	Otáčky podávacího kotouče
n_s	$Ot.min^{-1}$	Otáčky brusného kotouče
n_{uk}	$Ot.min^{-1}$	Otáčky upínacího kotouče
P	W	Celkový výkon obráběcího stroje
P_c	W	Řezný výkon
P_o	W	Výkon nezatíženého obráběcího stroje
R_a	μm	Aritmetická odchylka od profilu
R_m	MPa	Mez pevnosti v tahu
R_e	MPa	Minimální mez kluzu
T_u	μm	Specifická hloubka řezu
t_{AS}	min	Strojní čas
v_c	$mm.s^{-1}$	Řezná rychlost
v_{fa}	$mm.ot^{-1}$	Axiální rychlost posuvu podél osy obrobku
v_{fr}	$mm.ot^{-1}$	Radiální rychlost stolu
v_{ft}	$mm.min^{-1}$	Tangenciální rychlost stolu
v_v	$mm.s^{-1}$	Rychlost brusného kotouče kolem osy obrobku
v_w	$mm.s^{-1}$	Rychlost obrobku
z	-	Počet zrn v záběru
z_h	mm	Přídavek na broušení

1 Úvod

Technologie broušení se řadí mezi dokončovací metody obrábění, která dosahuje vysoké přesnosti, kdy se průměrná aritmetická hodnota drsnosti povrchu (R_a) pohybuje v řádech setin mikrometru. V dnešní době se broušení zařadí mezi hlavní výrobní procesy a tvoří cca 20-25 % výrobních výdajů. Téměř všechny výrobky, které běžně používáme byly v nějaké fázi své výroby broušeny, nebo byly vytvořeny pouze broušením. Oproti ostatním technologiím obrábění se broušení liší svým nástrojem, kterým je brusný kotouč. Ten je složen ze zrn, které umožňují řezání do materiálu, a pojivem, které spojuje zrna v určitý tvar. Složitost broušení spočívá ve velkém množství proměnných brusného kotouče nebo jeho modifikaci (vlastnosti a geometrie zrna, rozložení zrn na pracovním povrchu, vlastnosti pojiva, tvrdost apod.). [1] [2]

Cílem této práce je popsat silové účinky při broušení, co je ovlivňuje, způsoby jejich měření a výpočtu. Dále navrhnout volbu brusného kotouče a pracovních podmínek dle materiálu, povrchové kvality a tvaru obrobku. Práce začíná tím, že je nejprve vysvětlena základní podstata technologie broušení, mechanika tvorby třísky při broušení a geometrie řezání.

Následuje kapitola o brusných nástrojích, materiálech zrn, druzích pojiva, vlastnostech brusných kotoučů, jejich značení a vyvažování kotoučů. V této kapitole jsou rovněž rozebrány pracovní podmínky při broušení.

Další kapitola se věnuje rozdělení metod broušení, používaným metodám broušení, jejich kinematice. Jednotlivé metody jsou doplněny příklady, pro jaké činnosti se používají.

V následující kapitole jsou rozebrány síly při broušení, jejich rozklad, co všechno síly ovlivňuje, jak je můžeme měřit a metody výpočtu.

Poslední kapitola pojednává o tom, jak se volí brusný kotouč, jaké řezné podmínky zvolit pro různé materiály a praktická ukázka volby pro jednoduché součásti.

2 Základní popis technologie broušení

2.1 Úvod

U broušení se jedná o rychlostní mikrořezání povrchových vrstev obrobku jemnými zrnými brusiva, které jsou spojeny pojivem v pracovní nástroj. Broušení se vyznačuje vysokou produktivitou za časovou jednotku, vysokou přesností rozměrů, geometrickou přesností tvaru, vysokou kvalitou povrchu a možností obrábění velmi tvrdých materiálů [1]

V principu jde o proces podobný ostatním technologiím obrábění, jelikož vytváření třísek na řezných plochách obráběcími nástroji probíhá vždy stejně. Existují však určité odlišnosti od ostatních způsobů a to:

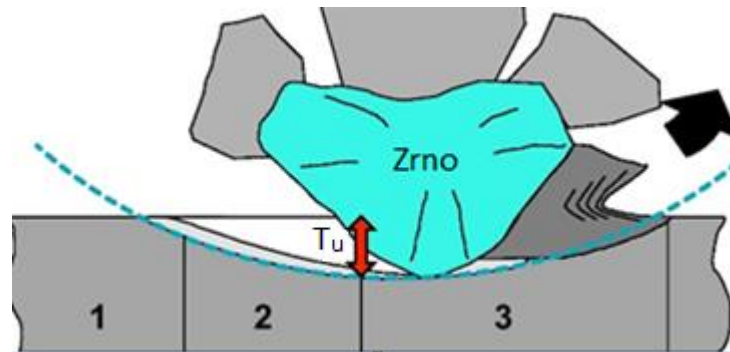
- velký počet zrn rozmístěných na pracovní ploše kotouče,
- nesouvislý povrch brusného kotouče,
- odlišná výška zrn brusiva,
- nepravidelný tvar zrn a zaoblení vrcholů, které mají záporný úhel čela,
- velká tvrdost a tepelná odolnost zrn,
- velké obvodové rychlosti a malá hloubka řezu,
- vysoké teploty v místě řezu. [1]

2.2 Tvorba třísky

2.2.1 Mechanika tvorby třísky

Základní mechanika tvorby třísky je pro všechny řezné procesy v podstatě stejná a může být zjednodušena pravoúhlým řezáním. U broušení je důležitá tloušťka materiálu odebíraného jedním brusným zrnem. Je to vzdálenost mezi plochami řezu vytvářenými dvěma následujícími záběry břitů sousedních zrn a charakterizuje zatížení brusného zrna. Na této tloušťce závisí mnoho parametrů ovlivňující provozní parametry jako např. otupení zrn, řezná síla připadající na jedno zrno, drsnost broušené plochy, okamžitá teplota v místě působení zrna. Zvětší-li se tloušťka materiálu odebíraná jedním zrnem, pronikají zrna do obrobku hlouběji a zrna s pojivem jsou více opotřebována. Jak je vidět na Obr. 1, tvorba třísky probíhá ve třech fázích. V první fázi dochází k elastické deformaci materiálu vznikající při prvním kontaktu mezi zrnem a materiálem. Druhá fáze elasticko-plastická deformace začíná při zvětšující se hloubce řezu. Třetí fáze začne po dosažení specifické hloubky řezu (T_u), viz Obr. 1, kdy se začne odstraňovat tříska

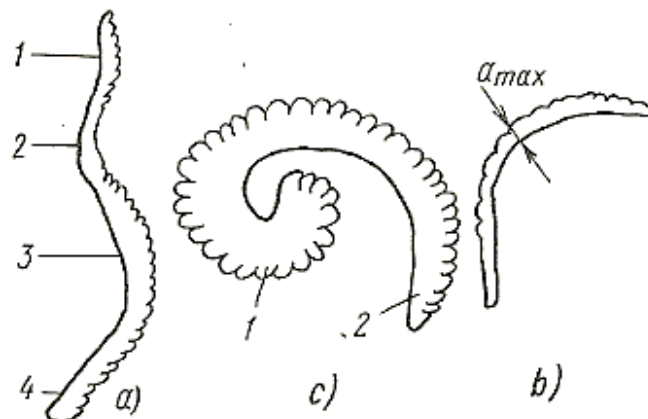
z povrchu. V důsledku plastické deformace dochází k pěchování třísky při jejím odchodu z místa řezu, což má za následek rozdíl mezi průřezem vzniklé třísky a průřezem odřezávané vrstvy. [1] [3] [4] [5]



Obr. 1: Fáze tvorby třísky [4].

2.2.2 Druhy třísek a faktory mající vliv na tvar vzniklé třísky

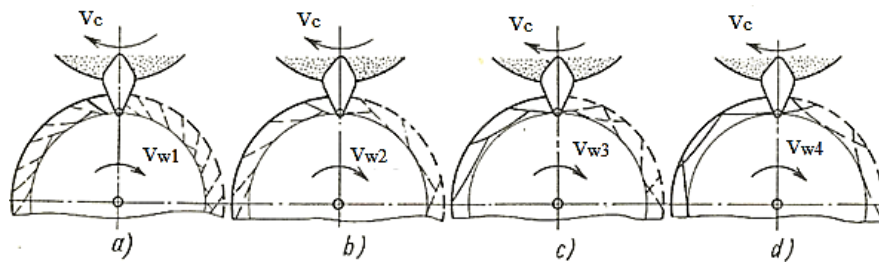
Třísky by měly by zaujímat co nejmenší objem a neměly by být příliš dlouhé. Nepravidelné rozložení zrn brusiva na pracovní ploše kotouče způsobuje odlišnou konfiguraci a rozměry třísek odebírané zrna, viz Obr. 2. Při broušení se vyskytují tři druhy třísek a to: páskovitá, zavinutá a segmentovitá. Při konstantní řezné rychlosti a stále se zvyšující obvodové rychlosti obrobku přechází tříska ze zavinutého tvaru na segmentovitý tvar, která je nejtlustší ve své střední části (a_{max}), viz Obr. 3. [1] [5]



Obr. 2: Druhy třísek vznikající při broušení

a) páskovitá, b) zavinutá, c) segmentovitá [1].

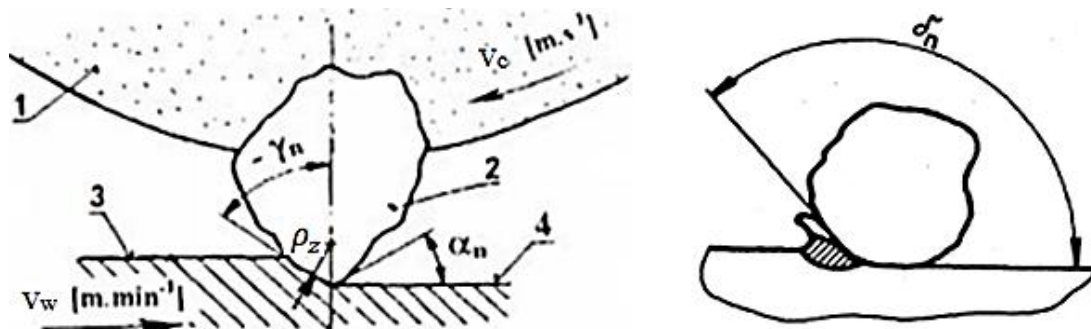
Tvar a rozměry třísek jsou způsobeny nepravidelným rozložením zrn na povrchu brusného kotouče a závisí rovněž na zvolených řezných podmínkách, např. na poměru obvodových rychlostí v_w/v_c .



Obr. 3: Změna tvaru zavlnuté třísky na segmentovitou s rosoucí rychlostí obrobku rychlosti jsou seřazeny vzestupně [1].

2.3 Geometrie záběru

Zrna brusiva mají nepravidelný tvar mnohostěnů se zaoblenými vrcholy. Zaoblení jsou velmi malá, avšak je potřeba nezanedbat je, protože tloušťky třísek ubíranými zrny jsou srovnatelné se zaoblením zrna. Zaoblením vrcholů zrn (ρ_z) na nich vznikají záporné úhly, což zvyšuje dynamickou pevnost a jejich odolnost proti silám, které na ně působí. Normální úhel čela (γ_n) je vždy negativní a normální úhel hřbetu (α_n) velký, viz Obr. 4 vlevo. [1] [6]



Obr. 4: Záběr brusného zrna do materiálu obrobku (vlevo) [7] a znázorněný normálního úhlu řezu (vpravo) [8].

Zaoblením břitu vznikají v pásmu tenkých třísek tupější normální úhly řezu (δ_n), viz Obr. 4 vpravo. Čím menší je hloubka řezu, tj. čím blíže je vrstva deformovaného obrobku břitu nástroje, tím větší je úhel řezu. [1]

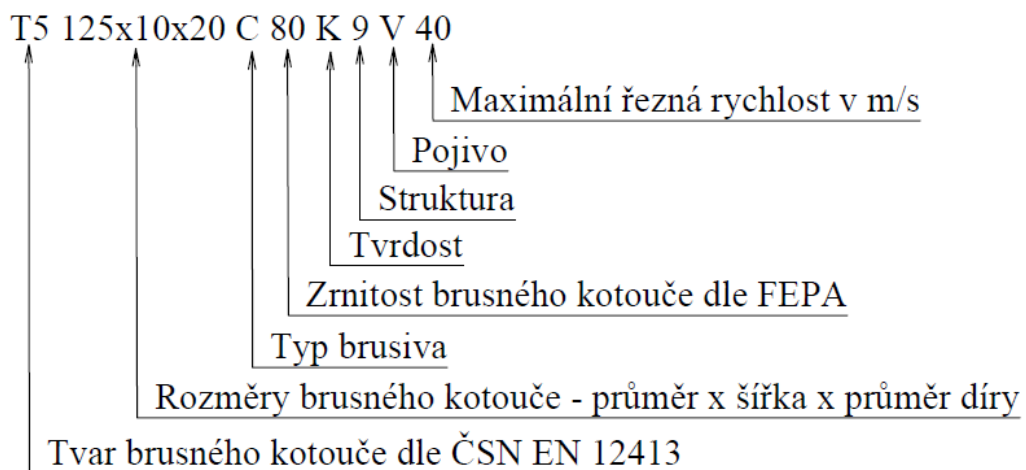
Skutečný úhel čela je závislý na zaoblení vrcholu zrn a tloušťce ubírané vrstvy v určitém bodě. Je-li poloměr zaoblení břitu větší než tloušťka ubírané vrstvy, začne před oddělením třísky rezný nástroj po povrchu obrobku klouzat. Při tupém úhlu řezu se deformační práce téměř nemění. Vrcholy zrn kotoučů mají vždy různou radiální vzdálenost od ideální válcové plochy, což způsobí jejich různé zatížení. Nejvíce zatížená zrna jsou vystupující nad ideální válcový povrch. Snížená zrna působí až po přirozeném opotřebení kotouče nebo po jeho orovnaní. [1]

3 Nástroje a pracovní podmínky

3.1 Úvod

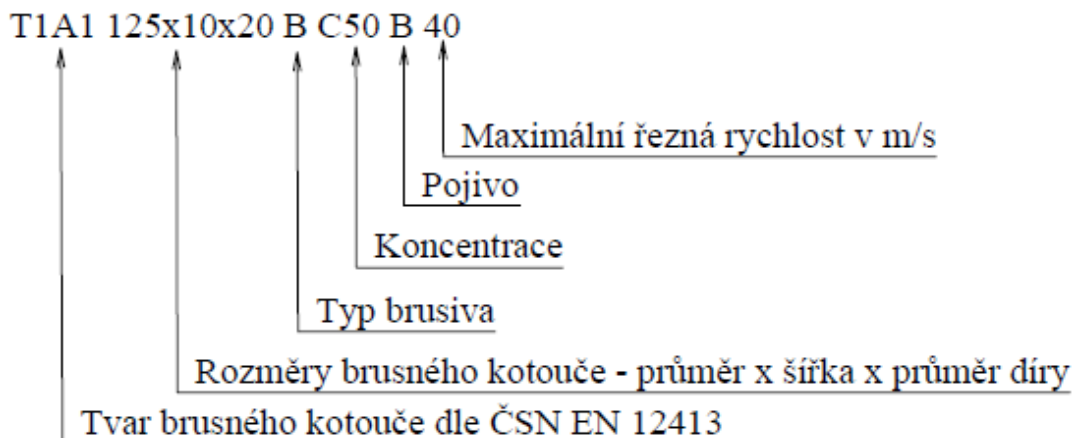
Výběr kotouče a řezného prostředí je naprosto klíčový pro výrobu. Mají velký vliv na silové poměry, které vznikají při řezném procesu a také významným způsobem ovlivňují kvalitu obrobené vrstvy. V následujících částech této kapitoly budou shrnuty poznatky o materiálu zrna, pojivu, o typech a základních vlastnostech brousicích kotoučů, a nakonec také o pracovních podmínkách. [9] [10] [11]

Pro přehlednější orientaci o složení a vlastnostech kotoučů je na nich zobrazeno jméno výrobce, číslo normy, rozměry, a především informace vlastnostech brusného kotouče, které se značí kódem. Příkladem uvádím značení brusného kotouče firmy TYROLIT. Brusné kotouče z běžné keramiky se značí dle Obr. 5.



Obr. 5: Značení brusných kotoučů z běžné keramiky firmy TYROLIT [12].

Brusné kotouče z diamantu nebo kubického nitridu boru jsou značeny dle Obr. 6.



Obr. 6: Značení brusných kotoučů z kubického nitridu boru a diamantu dle firmy TYROLIT [12].

Pro specifikaci brusného kotouče je důležitý materiál zrn, materiál pojiva, zrnitost (koncentrace), tvrdost a struktura. Jednotlivé vlastnosti zde budou rozebrány.

3.2 Materiál zrn

Odstraňování materiálu při broušení je způsobeno stykem zrn a broušeného materiálu. Na materiál zrn jsou tedy kladeny požadavky na velkou tvrdost a houževnatost, vysokou tepelnou odolnost a chemickou odolnost.

Mezi základní nepoužívanější materiály zrn, které budou následně popsány, patří diamant, kubický nitrid boru, umělý korund a karbid křemíku. Materiály bývají značeny písmenem a číslicí na brusném kotouči, pro ukázkou uvádím značení materiálu zrn firmy TYROLIT, viz příloha č.8. [10]

Diamant

Používá se pro broušení skla, keramiky, přírodních a syntetických kamenů. Jedná se o nejtvrďší známý materiál (jeho tvrdost je 100 HRC). Jeho největší výhodou je zachování své tvrdosti při vysokých teplotách a jeho tepelná stabilita až do 760 °C, odolnost proti mechanickému opotřebení a příznivé tepelné vlastnosti, které pomáhají snížit teplotu broušení. Nevýhodou je nevhodnost broušení ocelí a slitin na bázi niklu. Rozpustnost uhlíku v nízkouhlíkovém železu a oceli způsobuje rychlé opotřebení brusiva. [10] [13]

Kubický nitrid boru (CBN)

Jedná se o alotropní krystalickou formu dusitanu boritého, jehož tvrdost téměř odpovídá diamantu. Mezi největší výhody tohoto materiálu patří jeho tvrdost, chemická odolnost vůči slitinám železa a tepelná odolnost při 1900 °C, která je vyšší než u diamantu. Lze je použít pro vysoké rychlosti 30,5 – 61 m.s⁻¹. Do 1 300 °C obsahuje vrstvu oxidu boritého, která zabraňuje další oxidaci. Tato vrstva se rozpouští ve vodě, tudíž se doporučuje použít olejových emulzí, nebo emulzí na vodní bázi. Je široce využíván při přesném broušení vysoce legovaných nástrojových a rychlořezných ocelí. Jeho nevýhodou je vysoká pořizovací cena. [9] [13] [14]

Umělý korund (Al₂O₃)

Je založený na bázi umělého korundu nebo na bázi karbidu křemíku. Umělý korund (oxid hlinitý) je zástupcem syntetických brusiv. Syntetický oxid hlinitý je pro účely broušení používán ve své modifikaci α, tedy s šesterečnou krystalickou mřížku. Tato sloučenina se

navíc vyskytuje v různém stupni krystalizace a v různém stavu čistoty. Zrna jsou ostrá nebo hranatá v závislosti na čistotě a přípravě. Bílý oxid hlinitý je nejčistším zrnem. Hranatá zrna mají větší odolnost proti nárazu a jsou vhodné pro hrubovací operace. Ostrá zrna mají větší trvanlivost, protože zrna se méně otupují a vylamují. Jeho výhodou je velká škála použití pro železné materiály, včetně ocelí, a nižší pořizovací cena. [2] [13]

Karbid křemíku (SiC)

Dělí se dle barvy na zelený a černý. Ve srovnání s běžnými brusivy má nejvyšší stupeň tvrdosti. Nevýhodou je jeho křehkost. Zelený karbid křemíku je drobný a ostrý, díky čemuž je dobře brusný. Jeho tvrdost roste s klesající zrnitostí. Oproti korundu je schopen lépe vyrovnávat teplotní rozdíly v zrnech. Je velmi dobře chemicky stabilní. Opotřebovává se rychleji při broušení kovů, které mají afinitu vůči uhlíku (zejména železo a nikl). Používá se pro broušení méně tvárných materiálů s nižší pevností v tahu jako je keramika nebo hliník, ale i díky své drobnosti a schopnosti vyrovnávat tepelné rozdíly je vhodný pro broušení titanu, nebo tvrdokovů. [10] [13]

3.3 Pojivo

Nejdůležitější funkcí pojiva je spojovat brusná zrna během broušení. Další důležitou funkcí je vznik pórů mezi pojivem a zrny, které vytváří místo na přívod chladicí kapaliny a odvod třísek z materiálu obrobku. Volbou pojiva, jeho množstvím, složením i výrobním procesem lze příznivě ovlivnit vlastnosti kotouče. Mělo by plnit tyto funkce:

- vylamovat již opotřebovaná zrna a umožnit tím vystoupit nová ostrá zrna,
- zajistit dostatečný odvod tepla. [13]

Keramické pojivo

Keramické pojivo se připravují ze směsi skleněných částí, jílu, živce nebo boraxu. Vazba je mnohem tvrdší než u organického pojiva, ale podstatně měkčí než u kovového. Je křehký, a tedy poměrně citlivý na náraz, teplotně odolný, chemicky odolný vůči oleji a vodě. Je velmi flexibilní pro různé typy materiálu obrobků. Jeho největší výhodou je možnost výroby různých profilů nástroje. Nejčastěji se využívá jako pojivo pro zrna kubického nitridu boru. Většina nástrojů pro přesné broušení se vyrábí za použití keramického pojiva, a to zejména z oxidu hlinitého. [10] [13]

Kovové pojivo

Kovová pojiva se využívají hlavně pro superabraziva. Diamant nebo kubický nitrid boru lze nanést jednovrstvě nebo jako vícevrstvé brusivo. Jednovrstvá kola jsou značně drahá, kvůli přesnému nastavení zrn na povrchu kola, ale mají větší životnost pro broušení nejtvrdějších materiálů. Oproti ostatním pojivům vykazují větší tepelnou vodivost. Jsou velmi odolné vůči opotřebení. Velmi obtížné nasazení, kde je potřeba klást velký důraz na přesnost. Větší třecí teplo. [9] [10] [13]

Organické pojivo

Jsou pružnější než ostatní typy pojiv. Pružnost je užitečná pro bezpečnost při vysokých rychlostech, neobvyklém zatížení nebo pro dosažení více lesklého povrchu. Nejvíce se využívají běžnými brusivy, ale i se superabrazivy pro dosažení velmi nízké hodnoty Ra. Největší nevýhodou je jejich trvanlivost, a to již před použitím. Je tedy velmi důležité sledovat datum trvanlivosti. Jako pojící materiály se používají šelak, pryž a umělá pryskyřice. Pryskyřice se využívá při hrubování, a pro přerušované řezy. Šelak se využije hlavně pro dokončovací práce, jelikož jsou měkčí a pružnější. [10] [13]

3.4 Zrnitost

Drsnost povrchu (Ra) se s hrubším zrnem zvyšuje. Brusné kotouče s jemnějším zrnem jsou při stejném objemu, jako hrubší objemnější a mají větší nároky na upínací prostor kotoučů. Zrnitost se přesně stanoví prosíváním přes síta, jejichž otvory jsou různých velikostí. Čím je číslo menší, tím je kotouč hrubší, viz Tab. 1. Pro konkrétní případy se význam velikosti zrn liší a je tedy velmi obtížné specifikovat jejich limity, ale obecně platí že:

- křehký a tvrdý materiál vyžaduje jemnější zrna,
- pro větší úběr materiálu se volí hrubší zrna. [13] [15]

Tab. 1: Rozdělení zrnitosti dle FEPA [16].

Popis zrnitosti	Označení zrnitosti
7÷12	Velmi hrubá
14÷30	Hrubá
36÷60	Střední
70÷120	Jemná

150÷240	Velmi jemná
280÷600	Zvlášť jemná
800÷1200	Extra jemná

3.5 Tvrdost

Tvrdost patří mezi nejdůležitější vlastnost brusných kotoučů. Charakterizuje odpor brusných zrn proti vylomení z nástroje. Je to tedy míra houževnatosti a pružnosti pojivových můstků mezi zrny brusiva. Vyjadřuje tedy trvanlivost kol. Souvisí s tím i uvolňování otupených brusných zrn především u měkkých kotoučů. Podstatné je, aby se tvrdost zachovala dostatečně velká i při vysokých teplotách a aby brusivo chemicky nereagovalo s materiálem obrobku. Tvrdost brusiv se snižuje s teplotou (s výjimkou SiO_2 , který více tvrdne s vzrůstající teplotou). V ideálním případě, pokud se zvolí správná tvrdost, tak brusná zrna budou vylomena, když dosáhnou ideální stupeň otupení. Tvrdost zrna se nerovná tvrdosti kola. Tvrdá kola se používají pro měkký materiál a naopak. Někdy mohou podmínky použité při aplikaci způsobit, že se kolo jeví jako měkkčí. Příkladem je vyšší pracovní rychlost, nižší rychlost otáčení kola a menší průměr kola. Tvrdost se značí písmeny abecedy, kde se tvrdost zvyšuje v abecedním pořadí. [9] [13] [15] [17]

3.6 Struktura

Struktura je vlastnost, která vyjadřuje vzdálenost mezi brousicími zrny. Brusné kotouče s větší pórovitostí lépe odstraňují třísku a poskytují lepší přístup pro chladicí kapaliny. Struktura se označuje čísly od 0 do 25, kde číslo menší než 4 vyznačuje velmi hutnou strukturu a číslo vyšší než 14 pórovitější strukturu kola. Pro tvrdé a křehké materiály se volí brusné kotouče s nižší strukturou. Na houževnaté materiály je vhodné zvolit pórovité kotouče, které slouží i pro broušení součástí které se nesmí zahřívat. [13] [18]

3.7 Koncentrace

Jedná se o hmotnostní podíl zrn brusiva v 1 cm^3 funkční vrstvy kotouče. Využívá se pouze u značení kubického nitridu boru a diamantu. Značí se čísly od 25 do 200 po 25. Střední hodnota se využívá ve většině brousicích operací. Pro vnější broušení je typická hodnota 100 a pro vnitřní se využívá o něco vyšší hodnota 150. Nízká koncentrace vykazuje dobré

samoostřící vlastnosti, zvyšuje výkon, snižuje vliv tření, ale zhoršuje kvalitu povrchu a životnost kotouče. Vysoká koncentrace má opačný vliv než nízká. [13] [18]

3.8 Značení, upínání a vyvažování kotoučů

Kotouče se značí typem a rozměry, viz příloha č.9, a volí se dle konkrétních potřeb dané výrobní součásti a metody broušení. Většina broušících kotoučů větších průměrů se upínají pomocí upínacích přírub, kde jsou mechanicky sevřeny. Průměr přírub musí být stejný a dosahuje minimálně 1/3 průměru kotouče. Mezi kotouč a příruby se vkládají pružné podložky z kůže, pryže nebo papíru. Kotouče malých průměrů se upínají za válcovou stopku, nebo se upínají za díru. [7] [18]

Při nárocích na klidný chod je třeba broušící kotouče vyvažovat. Při nevyvážení kotouče vznikají vynucené kmity, které zhoršují kvalitu povrchu broušené součásti. Statické vyvažování se provádí na vyvažovacím stojánku, kde se představují vyvažovací tělíska v drážkách upínacích přírub. Při nárocích na přesnou výrobu a větší obvodové rychlosti větší než 50 ms^{-1} se kotouče s šířkou větší než 30 mm musí vyvažovat dynamicky, na vyvažovacím zařízení, kde se ruší vliv momentových dvojic nevyvážených hmot. Některé stroje jsou již od výrobce vybaveny vyvažovacím zařízením, které umožňuje vyvažovat kotouče přímo za chodu brusky. [7] [18]

3.9 Pracovní podmínky

Řezná rychlost

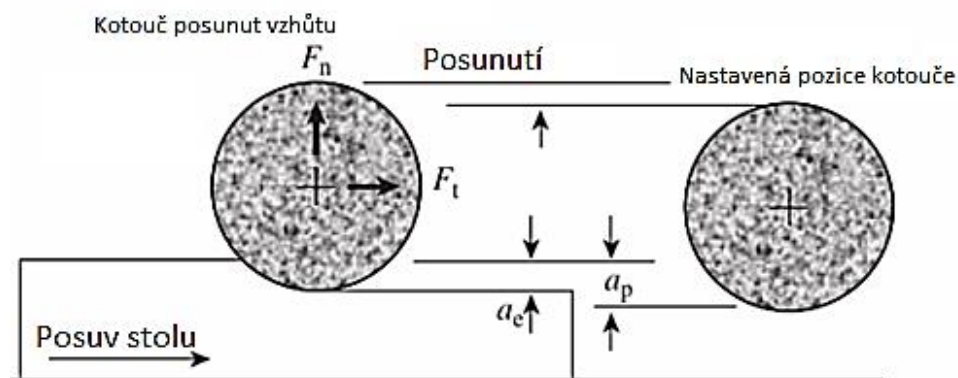
Označujeme tím rychlost, jakou se pohybuje nástroj a je to zároveň i maximální pracovní rychlost. Společně s rychlostí posuvu má rozhodující vliv na čas obrábění, tedy na vyrobené množství za jednotku času a na dosaženou povrchovou kvalitu. Se zvyšující se rychlostí ovšem roste i teplota zóny obrábění. Z toho důvodu je nutné používat chladící kapalinu, jinak vzniká větší opotřebení kotouče a snížená životnost kotouče. Optimální řezná rychlost se volí dle materiálu a povrchové kvality obrobku, způsobu broušení, vlastností brusného kotouče a řezného prostředí. Je vyjádřena pomocí průměru brusného kotouče a otáček brusného kotouče, viz vztah (1) [7]. Řezná rychlost bývá uvedena v katalogu brusných kotoučů, nebo je brusný kotouč opatřen barevným proužkem dle normy ČSN EN 12413, který určuje maximální použitelnou řeznou rychlost, viz příloha č.10. [9] [11] [18]

$$v_c = \frac{\pi \cdot D_s \cdot n_s}{60 \cdot 10^3} \quad (1)$$

Radiální loubka řezu

Při broušení se volí velmi malé hodnoty tohoto parametru, a to v rámci tisícín a setin milimetru. Hodnoty se liší dle zvolené metody broušení. Má vliv na síly vznikající při broušení, kvalitu povrchové vrstvy obrobku, životnost brusného kotouče a účinnost celého procesu. [9] [10] [13]

Nejzákladnější parametr broušení je reálná hloubka řezu. Je menší oproti hloubce, která je nastavena nebo naprogramována obsluhou, viz Obr. 7.



Obr. 7: Rozdíl mezi reálnou a nastavenou hloubkou řezu [13].

Vzhledem k tomu, že je složité určit hloubku řezu jednotlivých zrn, kvůli nedefinované geometrii, tak při výpočtech broušení se využívá teoretická hodnota ekvivalentní tloušťka broušení. Při jejím určení se vychází z obrobku materiálu, který na jedné straně do oblasti řezání vstupuje a na druhé straně z něho vychází. Se zvýšenou rychlostí obrobku a rostoucí radiální hloubkou řezu, roste i ekvivalentní tloušťka broušení. Se zvětšující se řeznou rychlostí naopak klesá. Větší ekvivalentní tloušťka broušení znamená větší napětí na brusných zrnech. Tento jev vysvětluje, proč je řezná rychlost násobně vyšší než rychlost obrobku. Pomáhá nám určit řezné síly a odpory, měrnou práci i výkon. Pro čelní broušení se vypočte pomocí efektivní vzdálenosti zrn, řezné rychlosti, rychlosti obrobku, radiální hloubky řezu a průměru brusného kotouče, viz vztah (2) [19]. [10] [13] [20]

$$h_{eq} = \frac{v_w \cdot \lambda_{Ke}}{v_c} \cdot \sqrt{\frac{a_e}{D_s}} \quad (2)$$

Pro vnější i vnitřní broušení se ekvivalentní tloušťka broušení vypočte na základě efektivní vzdálenosti zrn, řezné rychlosti, rychlosti obrobku, radiální hloubky řezu, průměru brusného kotouče a průměru obrobku, viz vztah (3) [19]. Převrácené hodnoty průměrů se pro vnější broušení sčítají a pro vnitřní odečítají. [19]

$$h_{eq} = \frac{v_w \cdot \lambda_{Ke}}{v_c} \cdot \sqrt{a_e \cdot \left(\frac{1}{D_s} \pm \frac{1}{d_w}\right)} \quad (3)$$

Efektivní vzdálenost zrn je funkcí radiální hloubky řezu a zrnitosti brusného kotouče. Určí se dle Tab. 2. [19]

Tab. 2: Určení efektivní vzdálenosti zrn jako funkce zrnitosti a radiální hloubky řezu [19].

Zrnitost	Radiální hloubka řezu a_e						
	Dokončování				Hrubování		
	0,003	0,004	0,005	0,006	0,01	0,02	0,03
60	39	38	37	36	33	23	15
80	47	46	45	44	40	31	24
100	54	53	52	51	48	38	30
120	60	59	58	57	53	44	37
150	64	63	62	61	56	48	40

Axiální posuv

Axiální posuv je dráha, o kterou se posune brusný kotouč oproti obrobku so strany. Hodnota axiálního posuvu závisí na metodě broušení a určí se pomocí šířky brusného kotouče. Se zvyšujícím se axiálním posuvem se zlepšuje odvod tepla, ale zároveň se zvětšuje velikost sil při broušení. [7] [20]

Rychlost obrobku

Zvýšením rychlosti obrobku docílíme lepšího odvodu tepla. Při větších rychlostech se naopak zhoršuje parametr drsnosti obrobenej plochy (R_a), kvůli kratší době doteku obrobenej součásti a brusného kotouče, a zvětšují se síly v procesu. Při broušení dokulata se vypočte pomocí otáček obrobku (n_w) a průměru obrobku (d_w), viz vztah (4). [7]

$$v_w = \frac{\pi \cdot d_w \cdot n_w}{60 \cdot 10^3} \quad (4)$$

Řezné prostředí

Vlivem tření vzniká při broušení velké množství tepla, jehož značná část je odváděna z místa řezu materiálem obrobku. Primárním účinkem procesní kapaliny je tedy chlazení. Při broušení speciálních tvarů, jako jsou závity nebo ozubená kola, se používají řezné oleje. Používá se emulzí oleje a vody, minerální oleje, syntetické oleje a vodné roztoky. Procesní kapalina slouží k řadě účelům jako:

- nárůstu trvanlivosti břitu;
- zlepšení jakosti povrchu;
- snížení řezných sil a příkonu obrábění;
- snížení tepelných deformací obrobku;
- usnadnění odstraňování třísek.

Oleje

Díky jejich skvělým mazacím schopnostem, viz Tab. 3, a vysoké teplotě varu, jsou vhodné zejména pro vysokorychlostní broušení. Oproti emulzím na vodní bázi mají vyšší životnost a snižují opotřebení brusných kol. Jejich nevýhodou je tvorba olejové mlhy, která vzniká při vysokých řezných rychlostech, a jejich hořlavost, takže stroje musí být uzavřené z bezpečnostních důvodů. [10] [13]

Emulze

Pokud je potřeba nástroj více chladit, než mazat používá se vodní emulze. Množství oleje je nižší než 10 %. Největší výhoda emulzí je jejich tepelná vodivost a kapacita, viz Tab. 3, která je přibližně 4x větší než u olejů. Rovněž absorbuje velký objem tepla v procesu

odpařování. Nevýhodou je menší životnost emulze, špatné mazání a vznik koroze. [10]
[13]

Vodné roztoky

Hlavní složkou vodných roztoků je voda, která se vyznačuje velmi dobrým chladícím účinkem. Pro potlačení nežádoucích vlastností vody (korozivnost, obsah solí a bakterie) jsou přidávány do vody další látky (uhličitan sodný, dusitan a dusičnan sodný, borax, křemičitan sodný, triethanolamin), čímž vznikají vodné roztoky, které je ještě možné dále aditivovat. Hlavním účinkem vodných roztoků na řezný proces je především chladící účinek. Aditivované roztoky se svými vlastnostmi více přibližují emulzím.

Tab. 3: Porovnání vlastností vody a používaných olejů [10].

	Minerální olej	Voda
Měrná tepelná kapacita [J.(g*K)⁻¹]	1,9	4,2
Tepelná vodivost [W.(m*K)⁻¹]	0,13	0,6
Viskozita [mm².s⁻¹]	5-20	0,66

4 Metody Broušení

4.1 Úvod

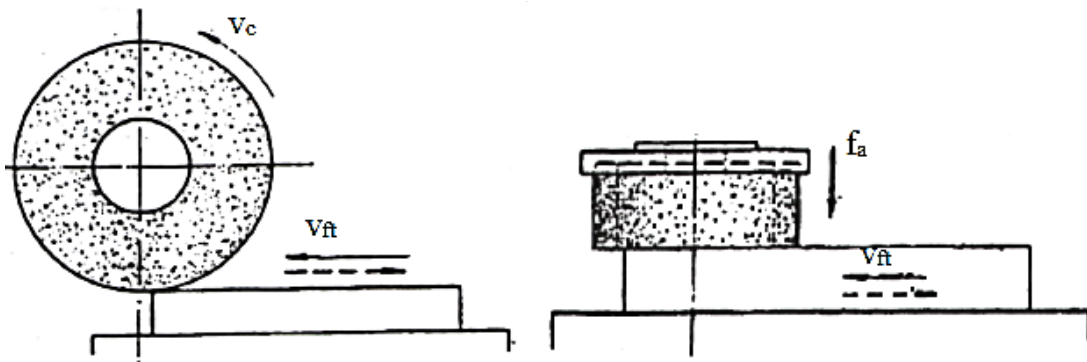
Volba metody závisí na konkrétním typu a požadované kvalitě povrchu daného obrobku. Využívá se řada metod broušení rovinných, rotačních na konvenčních i číslicově řízených strojích. [18]

4.2 Základní rozdělení metod broušení

Dle reference [20] rozdělujeme broušení dle aktivní části broušícího kotouče a dle tvaru obrobenej plochy.

Dle aktivní části broušícího kotouče:

- obvodové broušení, viz Obr. 8 vlevo,
- čelní broušení, viz Obr. 8 vpravo. [15]



Obr. 8: Obvodové (vlevo) a čelní (vpravo) broušení [15].

Dle tvaru obrobenej plochy:

- rovinné broušení,
- broušení dokulata,
- broušení na otáčivém stole,
- tvarové broušení,
- kopírovací broušení,
- broušení tvarovými broušícími kotouči,
- obvodové broušení,
- čelní broušení. [20]

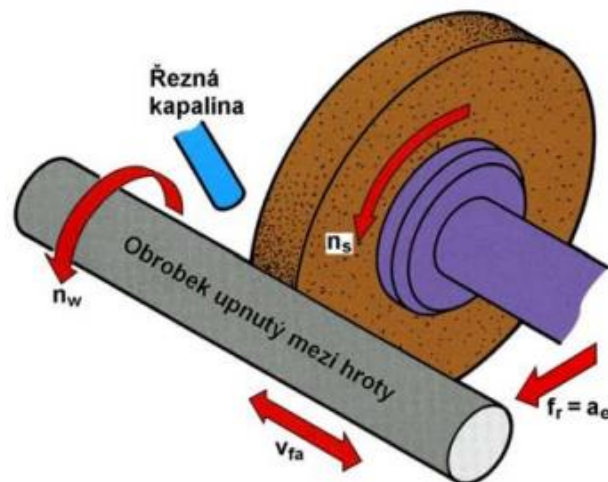
Další rozdělení rovinného, čelního a broušení dokulata je zobrazeno v příloze č.11.

4.3 Popis jednotlivých metod broušení

4.3.1 Obvodové broušení do kulata vnějších ploch

Axiální obvodové broušení vnějších ploch „dokulata“

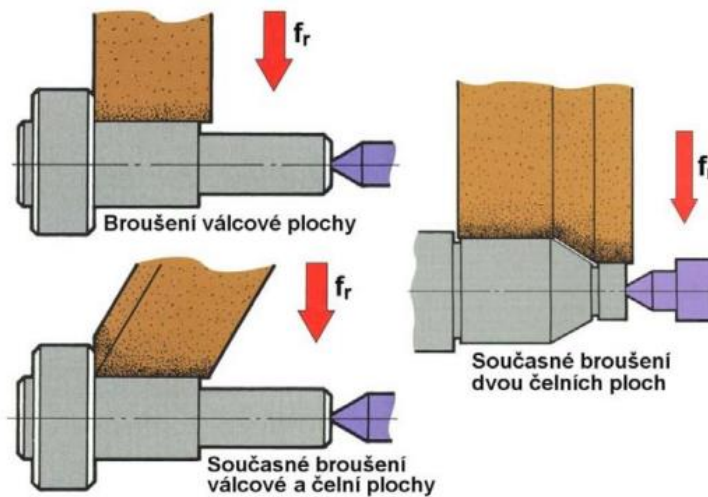
Tento způsob je často využíván především při obrábění dlouhých rotačních součástek kuželového nebo válcového tvaru. Obrobek se otáčí mezi hroty (n_w), nebo je upnut ve sklíčidle, otáčí se ve směru otáčení kotouče a zároveň koná posuvový pohyb rovnoběžný s osou obrobku (v_{fa}) nebo obrobek koná pouze otáčivý pohyb (n_w) a nástroj koná posuvový pohyb podél osy obrobku (v_{fa}), viz Obr. 9. Radiální posuv kotouče (f_r) zajišťuje úběr materiálu obrobku. Při tomto způsobu broušení se volí velmi malý příčný posuv. Patří mezi nejproduktivnější metody broušení. Nevýhodou je vysoká spotřeba brusných kotoučů. Kotouč je potřeba srovnat a opakovat postup obrábění s odstraněním korekce. [6] [15] [19]



Obr. 9: Hlubkové obvodové broušení vnějších ploch „dokulata“ [15].

Radiální (zapichovací) obvodové broušení vnějších ploch „dokulata“

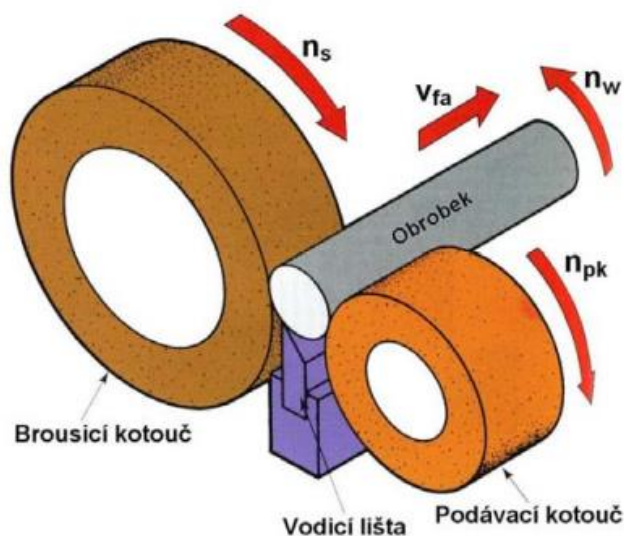
Hlavní řezný pohyb vykonává brusný kotouč. Využívá se širokých kotoučů, které brousí celou plochu obrobku najednou. Je velmi důležité mít tuhý obrobek do délky maximálně 350 mm. Úběr materiálu je zajištěn pomocí radiálního posuvu (f_r). Je možné využít i šikmý posuv, pokud se současně brousí několik ploch. Největší využití této metody je u zkosení hřídelů, kde se upíná obrobek mezi hroty, viz Obr. 10. [6] [15] [19]



Obr. 10: Radiální obvodové broušení vnějších ploch [15].

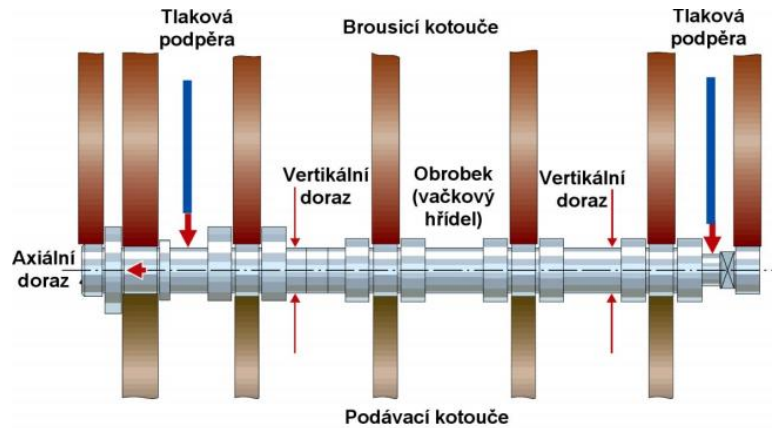
Bezhraté broušení

Obrobek není upnutý, ale vložen mezi dva kotouče, z nichž jeden je podávající a druhý brusný, viz Obr. 11. Obrobek je podpírán vodící lištou. Vodorovné osy obou kotoučů jsou v jedné rovině a osa obrobku je nad touto rovinou. Otáčky brusného kotouče (n_s) a podávacího kotouče (n_{pk}) mají stejný smysl otáčení. Otáčky obrobku (n_w) jsou v opačném smyslu otáčení a obrobek zároveň zajišťuje posuvový pohyb rovnoběžný s osou obrobku (v_{fa}). Obrobek se otáčí stejnou obvodovou rychlostí jako podávací kotouč. Tento způsob broušení je velmi využíván v sériové výrobě. Často je využíván při broušení součástí valivých ložisek. Rychlost posuvu je dána úhlem naklonění podávajícího kotouče. [6] [7] [15] [19]



Obr. 11 Bezhraté průběžné broušení [15].

Dalším způsobem je bezhroté zapichovací broušení, viz Obr. 12, které se používá u součástí, které mají nákrůžek, u kuželových nebo tvarových ploch, popřípadě i u sousých válcových ploch bez středících důlků. [15]

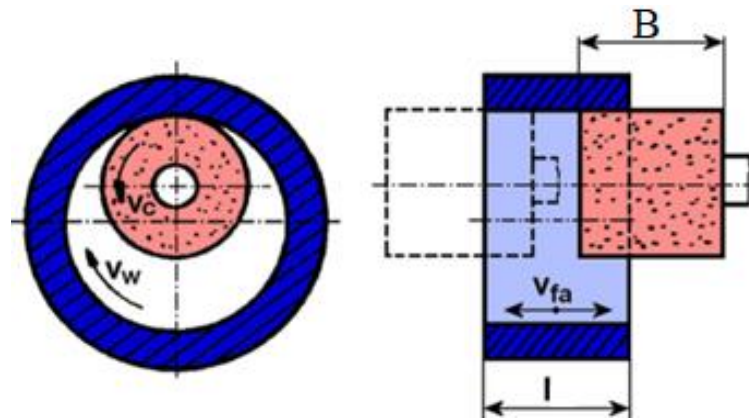


Obr. 12: Bezhroté zapichovací broušení válcových ploch [15].

4.3.2 Obvodové broušení dokulata vnitřních ploch

Obvodové axiální broušení vnitřních ploch a „dokulata“

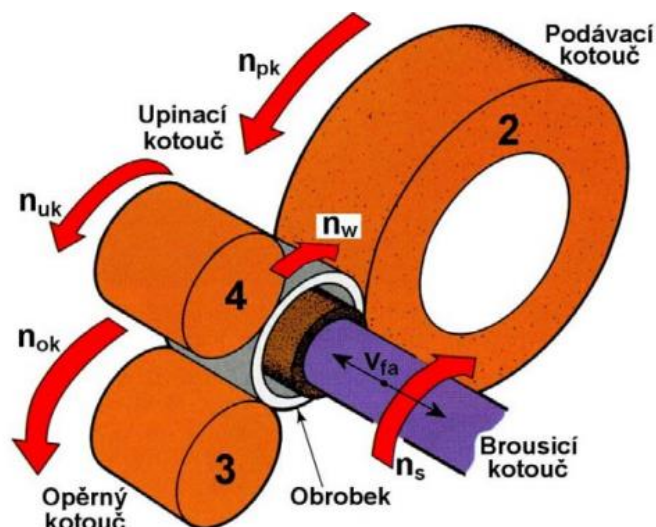
Kotouč se otáčí uvnitř obráběné díry otáčkami, které odpovídají řezné rychlosti (v_c) a posouvá se ve směru osy obrobku axiální rychlostí (v_{fa}). Obrobek se otáčí obvodovou rychlostí (v_w) kolem své osy proti směru pohybu brousícího kotouče, viz Obr. 13, a posouvá ve směru osy. Pomocí vnitřního broušení se obrábí především díry. Maximální velikost brousícího kotouče je 0,9násobek průměru broušené díry. Z toho vyplývá, že u malých děr je nutné použít velmi malé průměry brusných kotoučů. Z ekonomického hlediska se pro broušení krátkých děr doporučuje volit šířku kotouče (B) stejnou, jako je šířka obrobku (l). Dochází k poměrně velkému namáhání brousících zrn. Kotouč se velmi rychle opotřebovává, a tím ztrácí řeznou schopnost i geometrický tvar. Podmínky vnitřního broušení jsou z tohoto důvodu nepříznivé, a proto se používají jen v případě, kdy nelze použít jiný způsob výroby přesné díry. Při použití malého kotouče je nutné zajistit velmi vysoké otáčky. Z toho vyplývá nutnost volby nízkých řezných rychlostí, kvůli malému průměru kotouče, a tím se zhoršuje kvalita povrchu a efektivita výroby. [6] [15] [19]



Obr. 13: Axiální broušení vnitřních válcových ploch [15].

Bezhraté broušení

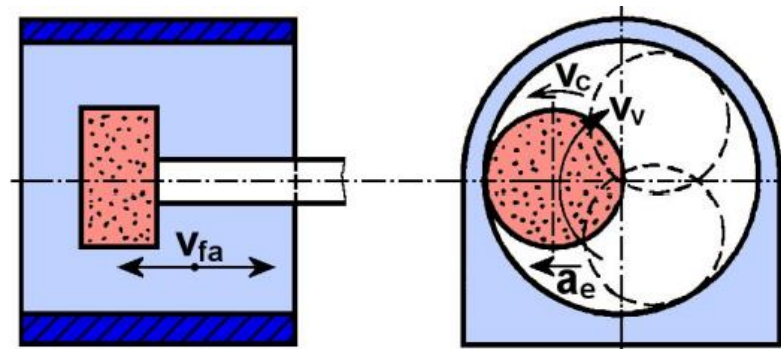
Podobá se vnitřnímu broušení, ale rozdíl je v upínání součásti. Při tomto způsobu je součást otáčena podávajícím kotoučem a vedena dvěma kotouči anebo podpěrnými lištami, viz Obr. 14. Otáčení obrobku (n_w) určuje podávací kotouč 2 (n_{pk}), opěrný kotouč 3 se otáčí (n_{ok}) ve stejném směru jako po zajišťuje polohu součásti a upínací kotouč se otáčí (n_{uk}) ve stejném smyslu jako předchozí dva kotouče a přitlačuje broušený obrobek ke kotoučům 2 a 3 a tím ji upíná. Řeznou rychlost brusného kotouče určují jeho otáčky (n_s) a zároveň vykonává pohyb ve směru osy obrobku axiální rychlostí (v_{fa}). Tento způsob lze použít u součástí s vnějším válcovými plochami souosými s vnitřním broušeným povrchem. Při bezhratém vnitřním broušení je možné dosáhnout větší přesnosti ve srovnání s axiálním vnitřním broušením a je využíváno v hromadné a sériové výrobě. [6] [15]



Obr. 14: Bezhraté obvodové broušení vnitřních ploch „dokulata“ [15].

Planetové broušení

Používá se pro otvory velkých a těžkých obrobků, které jsou upnuté do sklíčidla a je téměř nemožné zajistit rotaci kolem broušené díry. Obrobek stojí a brusný nástroj koná všechny pracovní pohyby – otáčí se okolo vlastní osy (v_c), obíhá okolo osy obrobku (v_v) a současně se posouvá ve směru osy broušeného otvoru (v_{fa}) (v některých případech axiální pohyb zajišťuje obrobek), viz Obr. 15. Přesnost planetového broušení je nižší z důvodu malé tuhosti vřeten. [6] [15]

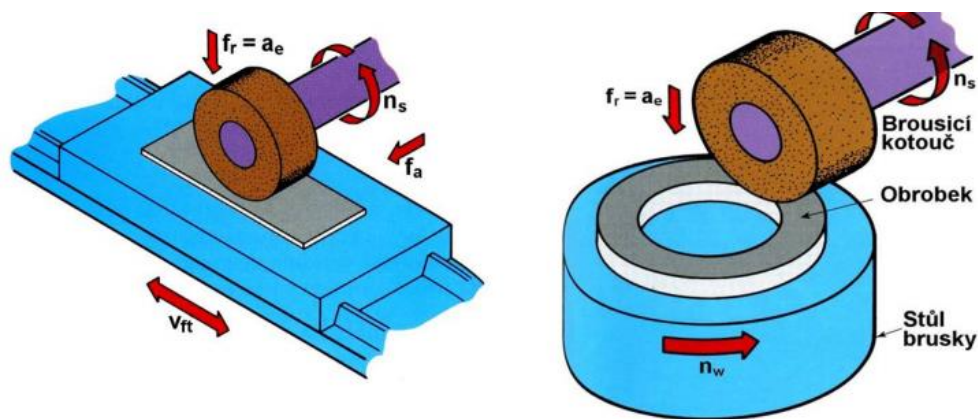


Obr. 15: Planetové broušení vnitřních válcových ploch [15].

4.3.3 Rovinné broušení

Obvodové rovinné broušení

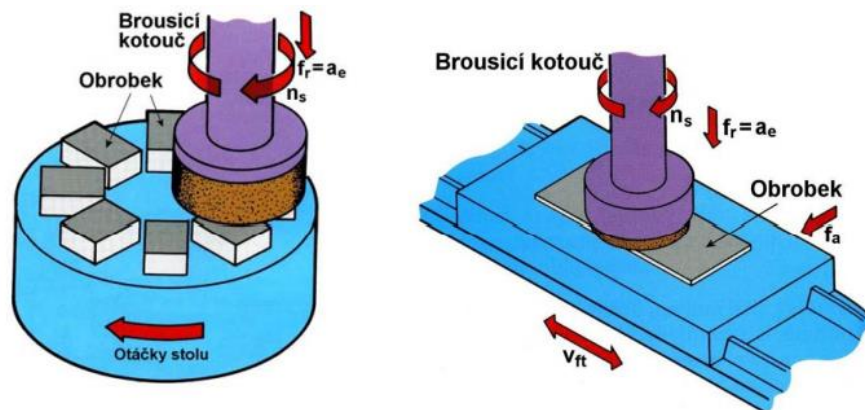
obvodové rovinné broušení je nejpřesnější způsob broušení rovinných ploch, jelikož broušení probíhá s relativně úzkým kotoučem a vlivem tepla se obrobek méně zatěžuje. Otáčky brusného kotouče (n_s) udávají jeho řeznou rychlost, obrobek vykonává přímočarý pohyb, nebo v méně častých případech otáčivý. Při přímočarém pohybu vykonává obrobek podélný vratný pohyb tangenciální rychlostí (v_{ft}). V úvratích se stůl brusky (nebo brusný kotouč) posune axiálně vzhledem k obrobku (f_a). Hloubka broušení se nastavuje pomocí radiálního posuvu (f_r), která se mění po odbroušení celé plochy, viz Obr. 16 vlevo. Při rotační pohybu zůstává brusný kotouč na jednom místě a obrobek vykonává rotační pohyb (n_w), viz Obr. 16 vpravo. U tvrdých materiálů ho lze použít i místo složitějšího frézování. Používá se při výrobě nástrojů, měřidel, přípravků. [6] [15] [19]



Obr. 16: Posuvný pohyb obrobku (vlevo) a Rotační pohyb obrobku (vpravo) [15].

Čelní broušení

Při tomto způsobu broušení je obvykle průměr kotouče větší, než je šířka broušené plochy. Stejně jako u obvodového broušení, tak i u čelního broušení může obrobek vykonávat pohyb otáčivý, viz Obr. 17 vlevo, nebo přímočarý, viz Obr. 17 vpravo. Otáčky brusného kotouče (n_s) odpovídají požadované řezné rychlosti a radiální posuv (f_r) brusného kotouče zajišťuje požadovaný úběr materiálu. Při přímočarém pohybu koná obrobek podélný vratný pohyb tangenciální posuvovou rychlostí (v_{ft}). Axiální posuv (f_a) odebírá materiál obrobku v příčném směru. Pro broušení širších ploch se používá broušení čelem kotouče. Kontaktní plocha je mnohem větší než při obvodovém, což zaručuje větší výkonnost tohoto způsobu. Přímocharý pohyb stolu se využívá pro sériovou a hromadnou výrobu malých součástí. Při broušení kotouči větších rozměrů se obvykle používají segmentové hlavice. Výhodou těchto hlavice je, že lépe dokážou využít brusný materiál, lépe se odstraňuje tříska, procesní kapalina má lepší přístup k místu broušení a broušená součást se méně zahřívá. [15] [19]



Obr. 17: Otáčivý pohyb obrobku (vlevo) a přímočarý pohyb obrobku (vpravo) [15].

4.3.4 Tvarové broušení

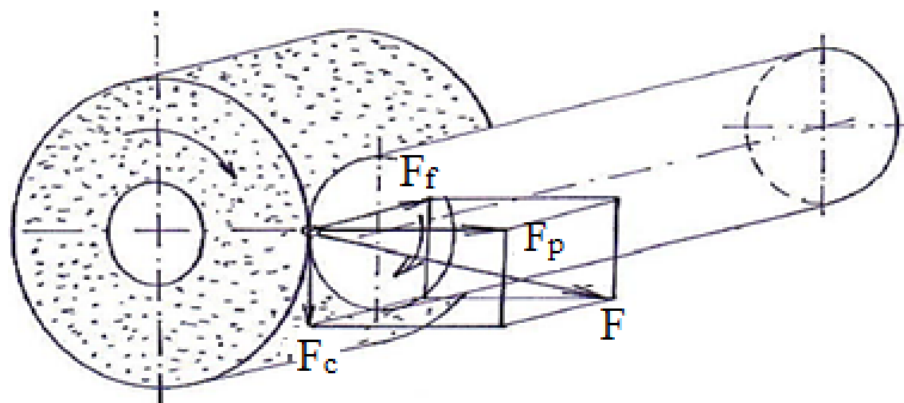
Tvary se brousí tvarovými kotouči nebo kotouči běžných tvarů kopírováním. Jednoduché profily jako drážky a úhly se vytváří pomocí běžných orovnávacích nástavců. Při tomto způsobu broušení vykonává pracovní pohyb obrobek nebo brusný kotouč na speciálně upravených CNC hrotových, bezhrotých i rovinných bruskách. [6] [15] [19]

5 Silové účinky při broušení

5.1 Úvod

Znalost velikosti silových účinků nám dává informace o tom, jak probíhá řezný proces a jak proces působí na soustavu stroj – nástroj – obrobek – přípravek a dynamickou stabilitu řezného procesu. Taktéž nám síly umožní určit příkon stroje, zajistit účinnost řezného procesu, určit pevnost, trvanlivost a životnost nástroje, posoudit tepelných jevů vznikajících při broušení, zvolit vhodné řezné podmínky a posoudit přesnost i jakost obrobenej plochy. Síly při broušení úzce souvisejí také s brusnou teplotou, která ovlivňuje nežádoucí tepelné poškození broušené plochy (tj. zbytková napětí v tahu, fázové transformace materiálu). [5] [21] [22]

5.2 Silový rozklad



Obr. 18: Rozklad síly F na jednotlivé složky [23].

Na brusný kotouč působí odstředivé a řezné síly. Při záběru brusného kotouče působí malé množství zrn a každé zrno působí při různé hloubce odřezávané vrstvy. Na součást působí výsledná síla řezání F , která je součtem elementárních sil od zrn. Tato výsledná síla řezání se rozkládá na tři složky, viz Obr. 18.:

- řezná síla F_c – leží ve směru řezné rychlosti,
- síla posuvu F_f – působí ve směru podélného posuvu (kolmo na rovinu otáčení kotouče),
- pasivní síla F_p – je kolmá k broušené ploše. [15] [23]

Celková síla řezání se vypočte jako součet druhých mocnin jednotlivých složek síly, viz vztah (5). Řezná síla se používá k výpočtu výkonu na vřetení. Pomocí síly posuvu se vypočítá výkon potřebný na posuv a pasivní síla k výpočtu tuhosti soustavy stroj-obrobek-nástroj, tedy k přesnosti broušení. Vzhledem k tomu, že zrna mají záporný úhel

čela, tak pasivní síla je vždy větší než řezná síla, a to přibližně 1,5 až 3krát. Síla posuvu je mnohem menší než řezná síla a v procesu broušení je tedy nejmenší. [23]

$$F^2 = F_c^2 + F_p^2 + F_f^2 \quad (5)$$

Poměr sil broušení

Tento parametr nám dokáže nepřímou pomocí k rozeznání účinnosti řezného procesu a je definovaný jako podíl řezné a pasivní složky síly, viz vztah (6) [13].

$$\mu = \frac{F_c}{F_p} \quad (6)$$

Při použití správně nabroušeného brusného kotouče je tento poměr vysoký. S postupným vylamováním zrn a otupením kotouče poměr klesá. [13]

5.3 Parametry ovlivňující vliv silových účinků

Materiál obrobku

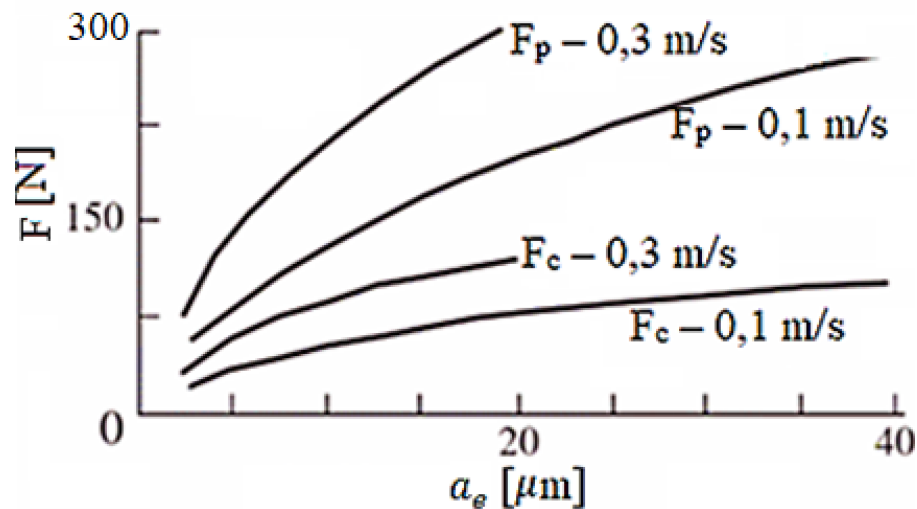
Materiál obrobku a jeho mechanické vlastnosti mají velký význam na síly i samotný proces. Nejčastěji se síly porovnávají pomocí tvrdosti materiálů, jelikož je méně nákladné tyto zkoušky provést. Je proto zásadní znát vlastnosti broušeného materiálu. [9]

Posuv

Se zvětšujícím se posuvem se síly zvětšují, zhoršuje se drsnost povrchu (R_a), snižuje se životnost brusného kotouče a klesá poměr sil. Při vhodně zvoleném procesu můžeme zlepšit účinnost procesu. [13]

Rychlost obrobku

Rychlost obrobku zvětšuje ekvivalentní tloušťku, a tedy i plochu odřezávané vrstvy, viz vztah (2) a (3), a tím i řeznou sílu. Z experimentu pro čelní broušení s korundovým kolem (19A60L7V) o průměru 170 mm, obrobkem z šedé litiny, chlazený pomocí 2% syntetické emulze, řeznou rychlost (v_c) $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, rychlostí posuvu stolu (v_w) $0,1$ a $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, lze vidět že při použití větší rychlosti obrobku je větší řezná i pasivní síla, viz Obr. 19. Při vyšší volbě rychlosti obrobku, než je vhodná se v brusném procesu objevuje chvění a brusný proces je nestabilní. [13]



Obr. 19: Vliv obvodové rychlosti obrobku na velikost sil [13].

Řezná rychlost

Oproti posuvu má nárůst rychlosti brusného kotouče opačný efekt. Jejím zvýšením se zmenší plocha odřezávané vrstvy, tím se síly zmenší a zlepší se kvalita povrchu obrobku. Vyšší rychlost kotouče nám umožňuje zvětšit posuv při zachování efektivity, ale se zvýšenou rychlostí výroby. [13]

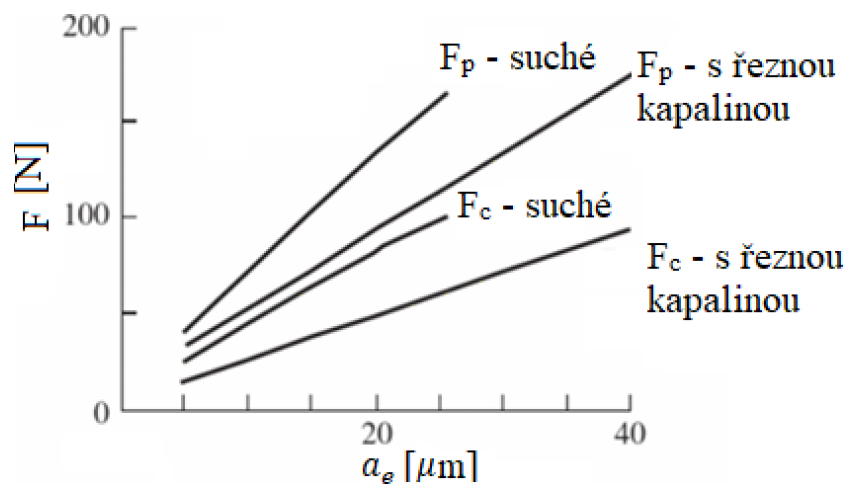
Řezný nástroj

Vlastnosti brusného kotouče mají největší vliv na síly a vhodným výběrem je můžeme výrazně zmenšit. Výběrem vhodného brusného kotouče bychom měli tedy vždy začínat. Čím větší je počet zrn kotouče, tím větší síly vznikají. S větší pórovitostí řezná síla působící na jedno zrno roste, ale celková síla klesá. Při použití tvrdých kotoučů se síly zvětšují. Elektrokorundové kotouče vykazují menší síly než korundové, z důvodu jiného tvaru a ostroty zrn, menšího množství pojiva a menších třecích sil na elektrokorundových kotoučích. Se zvětšujícím se otupením kotouče síly vzrůstají zhruba 2 až 2,5krát. S menší zrnitostí se zmenšuje síla připadající na jedno zrno, ale celková síla se zvyšuje. Použití kotoučů s organickým pojivem vyazuje větší síly než podobné kotouče s keramickým pojivem. Orovnání brusného kotouče diamantem zvětšuje velikost řezné síly. Naopak, orovnění brusného kotouče odvalováním se velikost řezné síly zmenší. [13] [22] [23]

Řezné prostředí

Při hrubovacích operacích je primárním požadavkem na řezné prostředí především snížení opotřebení břitů nástroje a zmenšení příkonu obráběcího stroje prostřednictvím

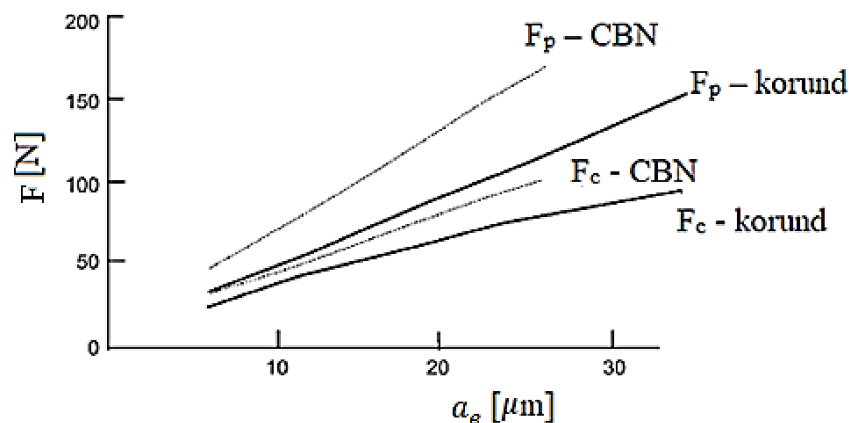
poklesu velikosti sil při obrábění. Doporučuje se tedy používat vodné roztoky, které mají chladičí účinek. Snížení velikosti sil je docilováno také vysoce aditivovanými emulzemi či řeznými oleji. Řezné oleje však mají negativní účinek na trvanlivost břitu nástroje. Použití těchto kapalin se doporučuje hlavně při nižších řezných rychlostech. Broušení na sucho při malém posuvu a velké řezné rychlosti vykazuje nižší hodnoty sil. Z experimentu pro čelní broušení pomocí brusného kola z CBN (B91ABN200) o průměru 174mm, obrobku z oceli 12 060 při řezné rychlosti (v_c) 30 m.s^{-1} a rychlosti posuvu stolu (v_w) $0,1 \text{ m.s}^{-1}$, lze pozorovat že za použití 2% syntetické emulze jsou síly při broušení menší než při suchém broušení, viz Obr. 20. Význam procesní kapaliny roste s klesající zrnitostí brusného kotouče. [13] [23] [24]



Obr. 20: Závislost síly na radiální hloubce řezu u broušení na sucho a za použití řezné kapaliny [13].

Radiální hloubka řezu

Radiální hloubka řezu má výrazný vliv na velikost řezných sil při broušení. S rostoucí radiální hloubkou řezu se zvětšuje plocha odřezávané vrstvy a tím i síly. Z experimentu prováděný pro korundový (19A60L7) a CBN (B91ABN200) brusný kotouč o průměru 170 a 174 mm při řezné rychlosti 30 m.s^{-1} , rychlosti obrobku $0,1 \text{ m.s}^{-1}$ a obrobek z oceli 12 060 bez použití řezné kapaliny lze pozorovat, že řezná (F_c) i pasivní (F_p) síla roste prakticky lineárně s radiální hloubkou řezu, viz Obr. 21. Při její volbě je nutné být opatrný. Při malých radiálních hloubkách řezu je jejich vliv na velikost sil při broušení malý. [22]



Obr. 21: Závislost řezné síly na radiální hloubce řezu [9].

5.4 Měření sil při broušení

5.4.1 Nepřímá metoda

Metoda vychází ze vztahu pro řezný výkon při obrábění, který udává součin řezné síly a řezné rychlosti, viz vztah (7). [25]

$$P_c = F_c \cdot v_c \quad (7)$$

Ze vztahu plyne, že touto metodou lze stanovit pouze řeznou sílu. Pro měření výkonu elektromotoru brusky se využívá wattmetrů, které nám oproti jiným metodám měření výkonu dávají přímý údaj. Typy wattmetrů a jejich zapojení se volí podle požadované přesnosti měření. [25]

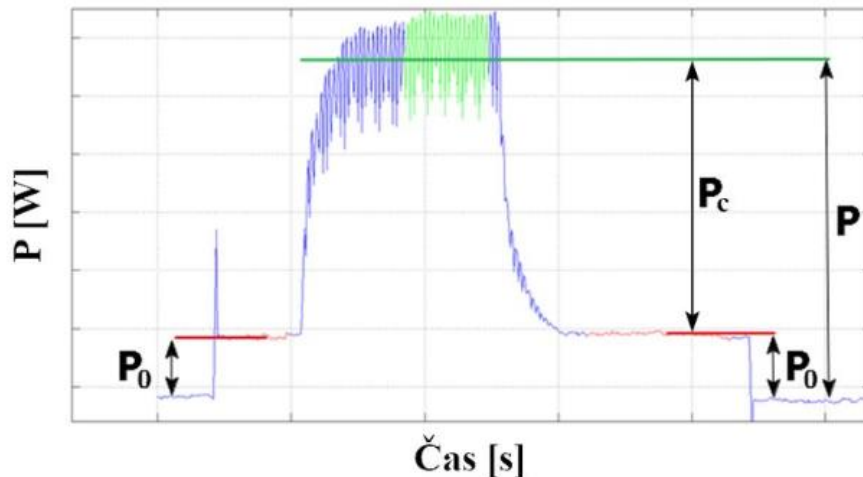
Pro určení řezné síly vycházíme z užitečného výkonu, potřebného k vlastnímu řezání. Jako první se změří výkon nezatíženého stroje, tzv. výkon naprázdno, a následně se změří celkový výkon obráběcího stroje. Příklad měření výkonu na čase je uveden na Obr. 22. Řezný výkon se tedy stanoví jako rozdíl celkového výkonu obráběcího stroje a výkonu nezatíženého obráběcího stroje, viz vztah (8). [25]

$$P_c = P - P_o \quad (8)$$

Následně se stanoví řezná síla jako podíl užitečného výkonu a řezné rychlosti, viz vztah (9). [25]

$$F_c = \frac{P_c}{v_c} \quad (9)$$

Největší výhodou této metody je nenáročnost na drahé přístroje, jednoduchost provedení a možnost využití v jakékoliv metodě obrábění. Nevýhodou je, že při měření nezapočítáváme rozdílnou účinnost stroje při chodu naprázdno a při zátěži, což omezuje přesnost měření. Dále se zanedbává vliv ostatních složek sil. [25]



Obr. 22: Měření výkonu v závislosti na čase [26].

5.4.2 Přímé metody

Zakládá na měření deformací během obrábění pomocí dynamometrů v soustavě stoj – nástroj – obrobek. Od dynamometru požadujeme, aby měřil sledovanou veličinu v určitém rozsahu a aby byla zaručena nezávislost měřící veličiny na provozních vlastnostech přístroje, stálost měření s časem a reprodukovatelnost naměřených hodnot. [27]

Piezoelektrický dynamometr

Pro snímání deformace se využívá piezoelektrického jevu, který charakterizuje vznik elektrického náboje na povrchu některých krystalů při mechanickém zatížení. Velikost náboje při zatěžování je přímo úměrná velikosti působící síly. Při poklesu zatížení se velikost náboje lineárně snižuje, dokud nevymizí při nulovém zatížení. Piezoelektrický dynamometr je určen pro měření všech tří silových složek. Dělí se dle způsobu použití na rotační a stacionární. Na Obr. 23 vlevo je zobrazeno schéma měření, kde je rotační dynamometr umístěn na stroji nad brusným kotoučem, a na Obr. 24 vlevo schéma měření pro stacionární dynamometr. V dnešní době jsou nejvhodnější dynamometry firmy KISTLER, konstruované přímo pro broušení, viz Obr. 23 vpravo a Obr. 24 vpravo. [27]



Obr. 23: Schéma měření pomocí rotačního piezoelektrického dynamometru (vlevo) [28] a piezoelektrický dynamometr firmy Kistler typu 9171A [29].



Obr. 24: Zapojení stacionárního piezoelektrického dynamometru (vlevo) [27] a piezoelektrický dynamometr typu 9257B firmy KISTLER (vpravo) [30].

5.5 Metody výpočtu řezné síly při broušení

Při řezání brusným zrnem je velmi malá tloušťka odřezávané vrstvy, velký poloměr ostří a velký úhel řezu. Toto ovlivňuje především oblast primární plastické deformace, a tedy i měrný řezný odpor. [8]

5.5.1 Výpočet na základě empirických vztahů

Jedná se o experimentální určení řezné síly, které dává přesnou hodnotu řezné síly, ale určení jednotlivých exponentů vyžaduje konkrétní experiment a tím se stává tato metoda ekonomicky náročná. Vztah (10) řezné síly pro broušení vnějších rotačních ploch a rovinných ploch je v mocninném tvaru, kde jsou řezné podmínky – radiální hloubka řezu, posuv na otáčku, rychlost obrobku. [8]

$$F_c = k_{F_c} \cdot a_e^{x_{F_c}} \cdot f_a^{y_{F_c}} \cdot v_w^{z_{F_c}} \quad (10)$$

Literatura [18] uvádí vztah pro obvodové tangenciální broušení rovinných ploch v mocninném tvaru kde jsou řezné podmínky – radiální hloubka řezu, axiální posuv stolu brusky na jednu otáčku a řezná rychlost.

$$F_c = k_{F_c} \cdot a_e^{x_{F_c}} \cdot f_a^{y_{F_c}} \cdot v_c^{z_{F_c}} \quad (11)$$

Vztah (12) řezné síly při bezhrotém broušení a broušení vnitřních rotačních ploch je v mocninném tvaru, kde jsou jak řezné podmínky (radiální hloubka řezu, posuv na otáčku, rychlost obrobku), tak i průměr obrobku. [8]

$$F_c = k_{F_c} \cdot a_e^{x_{F_c}} \cdot f_a^{y_{F_c}} \cdot v_w^{z_{F_c}} \cdot D_w^{v_{F_c}} \quad (12)$$

Hodnoty empirických konstant závisí na metodě broušení, a zvoleného typu kotouče. Tyto vztahy lze i využít pro orientační výpočet řezné, kde se za empirické hodnoty konstant dosazují hodnoty pro kotouč z umělého korundu s keramickým pojivem (nejběžněji používaná kombinace) o střední tvrdosti a zrnitosti. Hodnoty těchto konstant jsou uvedeny v příloze č.12. Při výpočtu pomocí těchto koeficientů si musíme uvědomit, že tento vztah nebere v potaz vliv broušeného materiálu na hodnotu řezné síly, ale zohlední pouze kinematiku dané metody. [8]

5.5.2 Výpočet na základě měrné řezné síly

Výpočet na základě měrné řezné síly je oproti experimentálnímu určení cenově nenáročný, ale jeho výstupem je pouze orientační hodnota řezné síly. Při této metodě vycházíme z objemu materiálu odebíraného celým objemem brusného kotouče za dobu jeho pootočení o určitý úhel. Nejprve se stanoví řezná síla na jedno zrno na základě ekvivalentní tloušťky broušení, axiálního posuvu a hodnoty měrné řezné síly, viz vztah (13) [11]. [8] [11]

$$F_{1c} = k_c \cdot h_{eq} \cdot f_a \quad (13)$$

Ekvivalentní tloušťka broušení se vypočte dle zvolené metody broušení, axiální posuv se zvolí dle požadavků na kvalitu obrobené plochy a měrná řezná síla se určí buď hrubým odhadem jako $k_c = (20 \div 30)$ meze pevnosti (literatura [8] uvádí $(20 \div 35)$ meze pevnosti) nebo dle literatury [18] lze použít hodnoty 10 000 ÷ 35 000 MPa pro oceli a 4 000 ÷ 12 000 MPa pro litiny, kde vyšší hodnoty platí pro broušení na čisto a nižší pro hrubovací

operace. Přesněji lze měrnou řeznou sílu určit na základě Pregerova vztahu, který je ovlivněn korekčním faktorem (K), měrnou řeznou silou ($k_{c1,1}$), materiálovou konstantou (m_c) a ekvivalentní tloušťkou broušení (h_{eq}), viz vztah (14) [19]. [8]

$$k_c = k_{c1,1} \cdot h_{eq}^{-m_c} \cdot K \quad (14)$$

Korekční faktor (K) je funkcí ekvivalentní tloušťky broušení (h_{eq}) a zrnitosti brusného kotouče. Určí se pomocí reference č.2. [19]

Následně se vypočte úhel náběhu. Pro rovinné broušení obvodem kotouče se určí pomocí radiální hloubky řezu a průměru brusného kotouče, viz vztah (15). [19]

$$\cos \varphi = 1 - \frac{2a_e}{D_s} \quad (15)$$

Pro obvodové broušení pomocí hloubky řezu, průměru brusného kotouče a průměru obrobku, viz vztah (16). [19]

$$\varphi \approx \frac{360^\circ}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{a_e}{D_s \cdot \left(1 + \frac{D_s}{d}\right)}} \quad (16)$$

Poté se vypočte počet zrn v záběru, který se stanoví na základě průměru brusného kotouče, úhlu náběhu a efektivní vzdálenosti zrn, viz vztah [19]

$$z = \frac{D_s \cdot \varphi \cdot \pi}{\lambda_{Ke} \cdot 360^\circ} \quad (17)$$

Výsledná řezná síla se stanoví jako součin počtu zrn v záběru a řezné síly připadající na jedno zrno, viz (18). [23]

$$F_c = F_{1c} \cdot z \quad (18)$$

5.5.3 Výpočet pasivní a posuvové síly

Pasivní složku síly i sílu od posuvu můžeme určit pomocí znalosti silových poměrů. Optimální poměr řezné síly k pasivní by se měl pohybovat v rozmezí 0,33 až 0,66. Pasivní složku síly tedy můžeme vypočítat dle vztahu (19). [8]

$$F_p = K_1 \cdot F_c \quad (19)$$

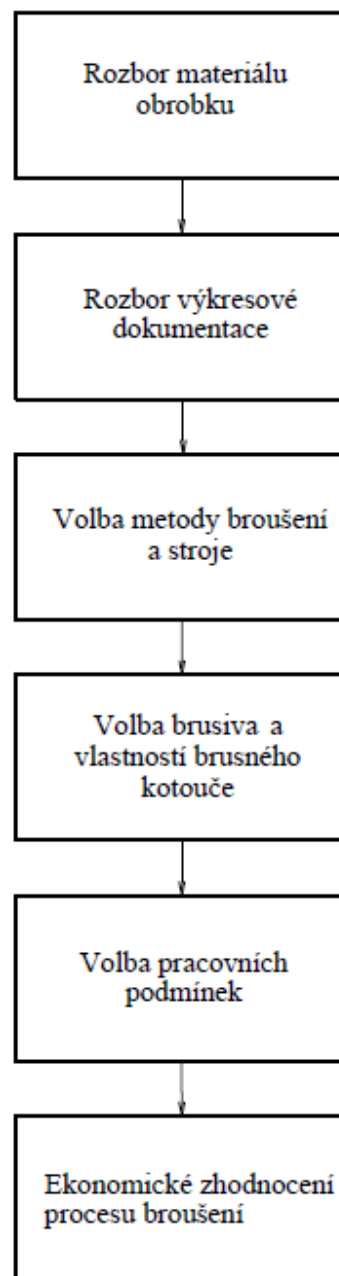
Stejným způsobem se vypočte síla posuvu, jen s tím rozdílem, že poměr řezné složky ke složce posuvu je větší než jedna a v některých případech se i tato složka zanedbává. Vypočte se dle následujícího vztahu (20) [11]. [8] [11]

$$F_f = K_2 \cdot F_c \quad (20)$$

6 Volba pracovních podmínek dle materiálu obrobku

6.1 Úvod

Volba pracovních podmínek pro broušení je zcela zásadní pro dosaženou kvalitu povrchu obrobku, tak i pro celkovou ekonomičnost procesu. Celá tato volba je znázorněna na Obr. 25. V následujících kapitolách budou jednotlivé kroky vysvětleny a ukázány praktické volby pro různé materiály obrobku a metody broušení.



Obr. 25: Vývojový diagram volby pracovních podmínek.

6.2 Rozbor materiálu obrobku

Znalost typu materiálu obrobku a jeho mechanických vlastností, včetně tvrdosti je pro celý proces zásadní. Díky této znalosti jsme schopni zvolit brusný kotouč s vhodnými vlastnostmi a zlepšit tím jeho trvanlivost.

Rozsah materiálů vhodných pro broušení je poměrně velký. Lze je rozdělit takto:

Tvárné materiály

Jedná se o základní kovy a kovové povlaky. Tvárné materiály mají rozdílné strukturní vlastnosti a složení, tudíž nelze sjednotit volbu pracovních podmínek a vlastností kotouče. [9]

Při broušení měkkých kovů vznikají menší síly působící na zrna brusného kotouče a obrobek má tendenci vytvářet dlouhé třísky. Dlouhé třísky ucpávají póry brusného kotouče, což vede k rychlému otupení brusných zrn a zhoršení povrchové kvality obrobku. Z tohoto pohledu velmi měkký materiál nemusí mít nutně dobrou obrobitelnost a musíme tomu přizpůsobit volbu vlastností kotouče zejména z hlediska pórovitosti kotouče. [9]

Naopak při broušení tvrdých kovů, na které je zejména kladen požadavek na zachování tvrdosti při vysokých teplotách, působí na zrna brusného kotouče velké síly, což má za následek rychlé opotřebení zrn, rozměrovou nestálost, nutnost častějšího orovnávání brusného kotouče a obrobitelnost je velmi špatná. Patří sem vysoce legované oceli, titan a jeho slitiny a vysoko pevnostní litiny. Pro tyto kovy se využívá větších řezných rychlostí (celková řezná síla se zvětší, ale na jednotlivá zrna se zmenší), větší pórovitost brusných kol pro lepší odvod třísek anebo lze využít brusné kotouče z kubického nitridu boru, které jsou velmi tvrdé a rozměrově stálé. [9]

Křehké materiály

Mezi tyto materiály můžeme zařadit krystalické materiály, keramiku, optická skla atd. [9]

Přechodné materiály

Přechodné materiály leží mezi křehkými a tvárnými materiály. Patří sem kompozity, polymery a další materiály. [9]

6.3 Rozbor výkresové dokumentace

Dle požadované kvality povrchu součásti uvedené na výkrese musíme vyhodnotit nároky kladené na brusný kotouč, která z hlediska nástroje závisí na zrnitosti kotouče. Pomocí Tab. 4 lze zvolit správnou zrnitost brusného kotouče pro požadovanou drsnost povrchu Ra. Větší zrnitost brusného kotouče snadněji odstraňuje zbytky odbrušovaného materiálu. [31]

Tab. 4: Volba zrnitosti dle požadované kvality povrchu obrobku [32].

Kvalita povrchu	Zrnitost dle FEPA									
	Ra [μm]	36	46	60	80	100	120	150	180	220
1,1	*									
0,8	*	*								
0,7		*								
0,5		*	*							
0,4			*							
0,35			*	*						
0,25				*						
0,2				*	*					
0,17					*					
0,14					*	*				
0,12						*	*			
0,1							*	*		
0,08								*	*	
0,05										*

6.4 Volba metody broušení a stroje

Při volbě metody broušení musíme vyhodnotit, jestli je broušená součást rotační nebo rovinná. Vždy musíme vědět pro jaké aplikace bude vyráběná součást použita, tedy jejich nárok na rozměrovou a geometrickou přesnost. Pomocí Tab. 5 jsme schopni vyhodnotit, jestli zvolená metoda je schopna dosáhnout požadované přesnosti. Zároveň volba metody určuje, jaké tvary brusných kotoučů můžeme využít. [19]

Tab. 5: Dosažitelná přesnost jednotlivých metod broušení [19].

Metoda broušení	Rovinné čelní	Rovinné obvodové	Tvarové	Vnější obvodové	Vnitřní obvodové	Bezhruté
Dosažitelná přesnost IT	8 ÷ 9	5 ÷ 6	4 ÷ 5	6 ÷ 8	8 ÷ 10	4 ÷ 6

Volba metody nám vždy určí, jakou brusku musíme použít. Výběr stroje rozhodne o tom, jaké rozměry brusného kotouče budeme muset použít. V technologickém návrhu bychom vždy měli ověřit, jestli námi zvolené pracovní podmínky dokáže vybraná bruska výkonově zvládnout.

6.5 Volba brusiva a vlastností brusného kotouče na základě materiálu obrobku

Správná volba brusiva a vlastností kotouče závisí především na materiálu obrobku a jeho vlastnostech, dále i na použité metodě broušení. Obrobitelnost materiálů se zhoršuje s vyšší tvrdostí a mezí pevnosti v tahu materiálu obrobku. Správným výběrem brusného kotouče ovlivníme kvalitu obrobené plochy, čas dané operace, a tedy i ekonomičnost celkového procesu. Existují určité zásady, kterých se při výběru brusného kotouče musíme držet:

- pro větší úběr materiálu se volí brusný kotouč s hrubší zrnitostí,
- pro tvrdý obráběný materiál se volí měkčí brusný kotouč,
- pro obráběné materiály se sklonem k mazlavosti (měď, mosaz, hliník apod.) se volí brusný kotouč s hrubou zrnitostí,
- pro obráběné materiály citlivé na teplotní změny se volí měkčí brusný kotouč,
- při broušení přerušovaných ploch se volí tvrdší brusný kotouč,
- pro broušení obvodem kotouče se volí tvrdší kotouč než při broušení čelem kotouče,
- čím větší je styčná plocha mezi brousicím kotoučem a obrobkem, tím hrubší se volí zrnitost a nižší tvrdost brusného kotouče,
- pro větší rychlosti posuvu se volí tvrdší kotouč. [31]

Pro rovinné broušení se volí kotouče měkčí od tvrdosti F do K se strukturou 9 až 13 a pro vnější a vnitřní obvodové broušení se volí kotouče tvrdší od K do Z se strukturou od 1 do 9. [19]

6.5.1 Nelegované a nízkolegované oceli

Obrobitelnost nekalených nelegovaných a nízkolegovaných ocelí nejvíce závisí na obsahu uhlíku, kde se zvyšujícím procentem obsahu se zhorčuje obrobitelnost. Ukázka volby je znázorněna v Tab. 6. [9]

Tab. 6: Volba brusiva a vlastností brusného kotouče pro nekalné nelegované a nízkolegované oceli [12].

Brusivo	Tvrдость	Zrnitost	Struktura	Pojivo
Bílý korund	J ÷ P	22 ÷ 80	5 ÷ 13	Keramické
Růžový korund	J ÷ K	60 ÷ 80	9	Keramické
Směs růžového a zirkonového korundu	J	120	9	Keramické
Hnědý korund	L ÷ Q	12 ÷ 100	4 ÷ 10	Keramické

Obrobitelnost kalené oceli závisí na její struktuře vzniklé po tepelném zpracování. Možnosti volby jsou v Tab. 7. Obecně se pro tyto oceli nejčastěji volí bílý a hnědý korund, který je cenově velmi dostupný a volit kvalitnější brusné kotouče by nebylo ekonomicky výhodné. Kvalitnější zirkonový korund a jeho směsi se používají zejména při broušení vnitřních válcových ploch. [9]

Tab. 7: Typy brusiva a jeho vlastností pro kalené nelegované a nízkolegované oceli [12].

Brusivo	Tvrдость	Zrnitost	Struktura	Pojivo
Bílý korund	H ÷ K	46 ÷ 120	5 ÷ 9	Keramické
Směs růžového a zirkonového korundu	J	80 ÷ 120	9	Keramické
Zirkonový korund	I ÷ K	60 ÷ 80	5 ÷ 6	Keramické

6.5.2 Vysoce legované oceli

U vysoce legovaných ocelí závisí obrobitelnost na vlastnostech legujících prvků, které ovlivňují jejich mechanické vlastnosti. Pro kalené vysoce legované oceli závisí jejich obrobitelnost na vzniklé struktuře po tepelném zpracování. Ukázka volby pro vysoce legované oceli nekalené je v

Tab. 8 a pro kalené v Tab. 9. Méně tvrdší brusiva se používají pro měkčí typy ocelí. Pro nejtvrdší vysoce legované oceli vykazuje nejlepší vlastnosti kubický nitrid boru, který dovoluje větší úběr materiálu a je velmi rozměrově stálí. Jeho nevýhodou je ovšem cena. Dobrý úběr materiálu zajišťují rovněž kotouče ze směsi korundů, které jsou oproti brusným kotoučům z CBN levnější. Křemíkové brusné kotouče se využívají pro nitridované oceli. [9]

Tab. 8: Volba brusiva pro nekalené vysoce legované oceli [12].

Brusivo	Tvrdost	Zrnitost	Struktura	Pojivo
Bílý korund	H ÷ K	46 ÷ 120	8 ÷ 9	Keramické
Směs růžového a zirkonového korundu	J	80 ÷ 120	9	Keramické
Směs mikrokrytalického a bílého korundu	J	60	10	Keramické

Tab. 9: Možnosti volby brusiva a vlastností brusného kotouče pro vysoce legované oceli kalené [12].

Brusivo	Tvrdost	Zrnitost	Struktura	Pojivo
Bílý korund	H ÷ K	46 ÷ 120	5 ÷ 9	Keramické
Směs mikrokrytalického a bílého korundu	I ÷ K	46 ÷ 120	6 ÷ 11	Keramické
Zirkonový korund	H ÷ K	46 ÷ 120	5 ÷ 9	Keramické
Kubický nitrid boru	-	126	C50 ÷ C75	Kovové
Zelený karbid křemíku	F ÷ I	46 ÷ 180	5 ÷ 8	Keramické
Směs bílého a rubínového korundu	H ÷ J	46 ÷ 100	5 ÷ 9	Keramické
Směs růžového a zirkonového korundu	J	80 ÷ 120	9	Keramické

6.5.3 Nerezová ocel

Nerezové oceli mají nízkou tepelnou vodivost, třísky nepravidelných tvarů a vyšší adhezi materiálu. Díky těmto vlastnostem dochází ke zvýšení sil při broušení a vyššímu opotřebení brusného kotouče. Pro nerezovou ocel se využívají kvalitnější typy korundu a jejich směsi. Dovolují větší úběr materiálu než méně kvalitní korundy. Tvrdost kotoučů bývá menší kvůli tvrdosti nerezové oceli. Příklady volby brusiva a vlastností kotouče jsou znázorněny v Tab. 10. [33]

Tab. 10: Typy brusiva a vlastností brusného kotouče pro nerezové oceli [12] [31].

Brusivo	Tvrdost	Zrnitost	Struktura	Pojivo
----------------	----------------	-----------------	------------------	---------------

Směs růžového a zirkonového korundu	I	54	9	Keramické
Zirkonový korund	H ÷ J	46 ÷ 100	5 ÷ 9	Keramické
Směs mikrokrystalického a bílého korundu	I ÷ K	46 ÷ 80	8 ÷ 11	Keramické
Růžový korund	J ÷ M	46 ÷ 80	8 ÷ 9	Keramické

6.5.4 Litina

Obrobitelnost litiny je lepší než u legovaných ocelí a závisí na množství a struktuře uhlíku. Při broušení litiny se utváří krátké třísky, menší síly a vyšší životnost nástroje. Přesná volba vlastností brusného kotouče závisí na typu broušené litiny. Nižší tvrdosti se volí pro bílé litiny. Kotouče z karbidu křemíku jsou velmi vhodné k broušení litin a odlitků díky svým vlastnostem. Zelený karbid, který má nižší tvrdost, se volí pro především pro rovinné broušení. Struktura bývá převážně otevřená. Možnosti volby brusného kotouče jsou znázorněny v Tab. 11. [10]

Tab. 11: Typ brusiva a rozsah vlastností používaných pro broušení litin [12] [31].

Brusivo	Tvrdost	Zrnitost	Struktura	Pojivo
Zelený karbid křemíku	I ÷ L	24 ÷ 80	9 ÷ 12	Keramické
Černý karbid křemíku	K ÷ Q	24 ÷ 60	5 ÷ 12	Keramické, pryskyřičné

6.5.5 Titan a jeho slitiny

Titan a slitiny titanu mají vysokou pevnost v tahu ($R_m = 900-1400 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$) a nízkou hustotu ($4,5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$). Rovněž jsou velmi dobře tepelně odolné až do teploty cca $500 \text{ }^\circ\text{C}$. Všechny tyto vlastnosti velmi zhoršují obrobitelnost. Jako brusivo se používá zelený karbid křemíku především kvůli své drobivosti, který udržuje zrna brusiva stále ostré. S tímto efektem ovšem souvisí velká tvarová nestálost, snížení životnosti a nutnost častějšího orovnávaní brusného kotouče. Ukázka volby kotouče je znázorněna v Tab. 12. [10]

Tab. 12: Volba vlastností brusného kotouče pro broušení titanu a jeho slitin [31].

Brusivo	Tvrdost	Zrnitost	Struktura	Pojivo
Zelený karbid křemíku	I ÷ M	24 ÷ 240	8 ÷ 12	Keramické

6.5.6 Barevné kovy

I přesto, že tvrdost barevných kovů není příliš vysoká, tak jejich obrobiteľnosť není dobrá kvůli jejich mazlavosti. Pokud by byl zvolen hutný brusný kotouč, tak třísky obrobku by začali kotouč ucpávat, zrna brusiva by se nevylamovala a na kotouči by zůstala otupená zrna. Všechny tyto chyby by vedly ke zhoršení povrchové vrstvy obrobku. Díky dobrému vyrovnávání tepelných rozdílů jsou nejlepší variantou pro broušení barevných kovů kotouče z karbidu křemíku. Zelený karbid křemíku se volí pro rovinné broušení. Možnosti volby brusného kotouče jsou znázorněny v Tab. 13. [10]

Tab. 13: Kotouče pro broušení barevných kovů [31].

Brusivo	Tvrdost	Zrnitost	Struktura	Pojivo
Zelený karbid křemíku	I ÷ M	24 ÷ 80	9 ÷ 12	Keramické
Černý karbid křemíku	K ÷ M	40 ÷ 80	7 ÷ 9	Keramické

6.5.7 Tvrdokov

Nejdůležitější vlastností tvrdokovů jsou vysoká pevnost, tvrdost, houževnatost a nízká tepelná roztažnost. Při broušení mají dobrou obrobiteľnosť. Pro broušení je nejčastěji využíván diamant, který je výhodný pro svoji nízkou míru opotřebení a vysokou stálost rozměrů. Brusné kotouče z karbidu křemíku se používají spíše pro sekundární aplikace a kvůli velké tvrdosti tvrdokovů se volí měkké kotouče. Diamantové kotouče oproti křemíkovým umožňují větší úběr materiálu, ale jsou podstatně dražší. Možnosti volby a rozsahy jsou znázorněny v Tab. 14. [34]

Tab. 14: Volba brusného kotouče a jeho vlastností pro broušení tvrdokovů [12] [31].

Brusivo	Tvrdost	Zrnitost	Struktura	Pojivo
Diamant	-	126	C75	Pryskyřičné
Zelený karbid křemíku	F ÷ M	40 ÷ 150	5 ÷ 10	Keramické

6.6 Volba pracovních podmínek

Volba pracovních podmínek při broušení závisí, jak na materiálu obrobku, tak i na použité metodě broušení a vlastnostech brusného kotouče. Správnou volbou těchto podmínek dosáhneme požadované kvality výroby, ale i ekonomičnosti celého procesu.

6.6.1 Řezná rychlost

Řezná rychlost závisí jak na metodě broušení, tak i na materiálu obrobku. Její volba má vliv na velikost řezné síly i na celkový strojní čas. Brusné kotouče jsou u výrobců dodávány s barevným pruhem, který označuje jejich maximální rychlost. Ta se ovšem nedá použít pro každý materiál obrobku a zvolenou metodu broušení. Maximální hodnoty pro jednotlivé materiály obrobku a metody broušení jsou v Tab. 15. [20]

Tab. 15: Maximální řezná rychlost v závislosti na metodě broušení a použitém materiálu [19].

Materiál obrobku	Vnější obvodové broušení	Vnitřní obvodové broušení	Rovinné broušení obvodem kotouče	Rovinné čelní broušení
	v _c [m.s ⁻¹]			
Nelegované a nízkolegované oceli	30	25	30	25
Vysoce legované oceli	35	25	30	25
Nerezová ocel	35	25	30	25
Litina	25	25	30	25
Titan	25	25	30	25
Barevné kovy	30	25	25	-
Tvrdokov	8	8	8	25

6.6.2 Axiální posuv stolu brusky

Volba axiálního posuvu je závislá na šířce brusného kotouče (B). Pro broušení obvodem kotouče se volí nižší posuv než u čelního broušení. Metodika výpočtu axiálního posuvu pro litiny a oceli je znázorněna v Tab. 16. [18]

Tab. 16: Volba axiálního pro litiny a oceli pro metody broušení [7] [18].

Metoda obrábění	Broušení obvodem kotouče	Obvodové rovinné broušení
	Podélný posuv [mm.ot ⁻¹]	Boční posuv [mm.dvojzdvih ⁻¹]
Hrubovací operace	$(0,6 \div 0,85) \cdot B$	$(0,67 \div 0,8) \cdot B$
Dokončovací operace	$(0,25 \div 0,5) \cdot B$	$(0,2 \div 0,3) \cdot B$

6.6.3 Radiální hloubka řezu

Radiální hloubka řezu závisí na zvolené metodě broušení, požadované kvalitě povrchu a vlastnostech broušeného materiálu. Pro malé hodnoty Ra a tvrdé materiály volíme nižší hodnoty z Tab. 17. Radiální hloubka řezu při čelním broušení obvodem kotouče se pro kotouče z kubického nitridu boru a diamantu určí jako 1/10 hodnoty zrnitosti brusného kotouče. U bezhrotého broušení je pro hrubovací operace radiální hloubka řezu ovlivněna průměrem obrobku, kde se nižší hodnoty radiální hloubky řezu volí pro menší průměr. Po dokončení čelního broušení je vhodné nechat brusný kotouč vyjiskřit zhruba na 1 až 3 záběry. [12] [18] [19]

Tab. 17: Volba radiální hloubky řezu na zvolené metodě broušení pro kotouče z korundu a karbidu křemíku pro oceli a litiny [18] [19].

Metoda obrábění	Broušení vnějších válcových ploch	Rovinné broušení obvodem kotouče	Tvarové broušení	Rovinné broušení čelem kotouče	Bezhroté broušení	Broušení vnitřních válcových ploch
	a_e [mm.záběr ⁻¹]					
Hrubovací operace	0,01 ÷ 0,08	0,01 ÷ 0,03	0,006 ÷ 0,02	0,01 ÷ 0,04	0,015 ÷ 0,04	0,04 ÷ 0,4
Dokončovací operace	0,001 ÷ 0,008	0,002 ÷ 0,008	0,003 ÷ 0,006	0,005 ÷ 0,01	0,005 ÷ 0,01	0,005 ÷ 0,02

6.6.4 Řezné prostředí

Broušení je proces, při kterém vlivem tření vzniká velké množství tepla a je nutné pomocí řezného prostředí odvádět z místa řezu třísky vznikající při broušení a zároveň chladit brusný kotouč a obrobek. Minerální oleje se nesmí používat pro kotouče s pryskyřičným pojivem. Jde zejména o to, jak velké množství tepla v procesu vzniká. Pro hrubování se volí emulze a roztoky, které mají chladicí efekt. Dokončovací operace, kde jsou vysoké nároky na kvalitu obrobené plochy, se provádí pomocí olejů. Názorná volba řezného prostředí pro různé materiálu obrobku je uvedena v Tab. 18. [19]

Tab. 18: Volba řezného prostředí pro různé aplikace [19].

Řezné prostředí	Typ procesu	Materiály
Vodní roztoky	Nízké požadavky na kvalitu obrobené plochy	Oceli a litiny
Emulze	Při procesech, kde vzniká velké množství tepla a je potřeba brusný kotouč a obrobek chladit	Všechny kovy
Minerální oleje	Při zhoršených podmínkách obrábění a větším požadavkem na kvalitu obrobené plochy	Oceli a lehké kovy
Petrolej	Vysoké požadavky na kvalitu obrobené plochy	Oceli a barevné kovy

6.7 Možné vady při broušení a jejich příčiny

Při broušení mohou vznikat určité indikace, podle kterých můžeme poznat, že i přes veškerou snahu byl zvolen brusný kotouč s nedostatečnými vlastnostmi pro daný materiál obrobku. Pomocí Tab. 19 můžeme tyto chyby rozeznat a určit příčinu jejich vzniku.

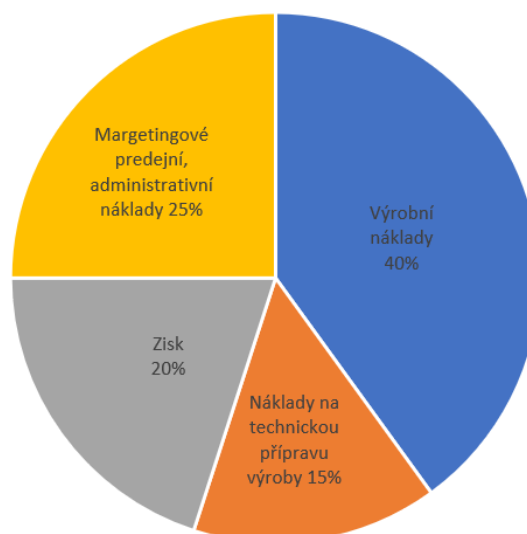
Tab. 19: Možné chyby a příčiny vznikající při broušení [31].

Chyba	Příčina
Zamazávání a pálení brusného kotouče	Špatně orovnaný brusný kotouč Příliš vysoká řezná rychlost Jemná zrnitost brusného kotouče Příliš tvrdý brusný kotouč

Rychlé opotřebenání brusného kotouče	Měkký brusný kotouč
Brusný kotouč má příliš malý úběr	Tvrký brusný kotouč Jemná zrnitost brusného kotouče
Vznik stop po chvění na obrobku	Tvrký brusný kotouč Špatně vyvážený kotouč

6.8 Ekonomické zhodnocení procesu broušení

Spolu s návrhem operace broušení je vhodné udělat první kalkulaci nákladů broušení na základě známých údajů. Výrobní náklady tvoří největší část z ceny strojírenských výrobků, viz Obr. 26. Snížením výrobních nákladů se sníží i cena výrobků. Výroba by tedy měla probíhat za použití optimálních pracovních podmínek. Jedná se o všechny faktory, které utváří daný obráběcí proces. U broušení jde např. o výběr kotouče a jeho parametrů, orovnávaní brusného kotouče, řezné podmínky, tvarovou stálost brusného kotouče, dobu obrábění brusným kotoučem, řezné prostředí apod. Pokud bude předběžně navrhnutý proces neekonomický, je nutné se uchýlit k optimalizaci řezných podmínek. Vstupním podkladem pro optimalizaci řezných podmínek při broušení je brusný kotouč. Optimalizaci provádíme s ohledem na jejich dostupnost na trhu nebo ve firmě. Při optimalizaci se vždy vracíme k jednomu z kroků z Obr. 25 a proces realizujeme. Proces můžeme dále upravovat například pro jiný stroj nebo materiál obrobku. [35]



Obr. 26 Cena strojírenského výrobku [35].

Pro optimalizaci řezných podmínek je nutný vstup řady dat, které jsou závislé na výrobních podmínkách daného podniku, proto tedy budou různé pro daný provoz a výrobní zařízení. Pro optimalizaci nástrojů a řezných podmínek lze využít softwary, které ale udávají pouze směrná doporučení a není možné zadat konkrétní výrobní podmínky podniku. [35]

Pro optimalizaci řezných podmínek při práci s jedním brusným kotoučem vycházíme ze čtyř možných kritérií optimálnosti a to:

- z hlediska výrobních nákladů,
- z hlediska produktivity,
- z hlediska zisku,
- z hlediska úběru materiálu. [35]

Základním a nejpoužívanějším kritériem je kritérium minimálních výrobních nákladů. Obrábění dle kritéria maximální produktivity znamená vyrábět maximální počet kusů za určitý čas. Analogicky funguje i kritérium maximálního zisku. Tyto dvě kritéria by se měla využívat pouze v krajních případech, především pokud je podnik vázán termínem a možným finančním postihem ze strany odběratele. [35]

Skladba výrobních nákladů

Výrobní náklady lze vyjádřit jako součet nákladů na strojní práci na operační úsek, nákladů na nástroje vztahené na operační úsek a náklady na výměnu, resp. orovnění brusného kotouče, viz vztah (21). [35]

$$N = N_s + N_n + N_{vn} \quad (21)$$

Pro stanovení řezných podmínek vycházíme z normativů, nebo doporučení výrobce nástroje. Náklady na strojní práci jsou z hlediska brusného kotouče ovlivňovaný strojním časem. Náklady na nástroje ovlivňují cena brusného kotouče, jeho trvanlivost, stojní čas, čas a počet orovnění brusného kotouče. [35]

Náklady na stroj

Náklady na stroj jsou ovlivněny cenou stroje, náklady na jeho provoz, dobou broušení a potřebou vyšší kvalifikovanosti obsluhy, z čehož plyne vyšší mzda. Ceny brusek jsou

oproti frézám, nebo soustruhům vyšší, tudíž i cena výrobků je ovlivněna jejich odpisy. [35]

Náklady na nástroj

Do nákladů na nástroj se odráží cena brusného kotouče, počet výměn brusného kotouče, doba broušení, trvanlivost brusného kotouče, čas a počet orovnávaní a mzda pracovníka. Brusné kotouče jsou rovněž cenově nákladnější. Zejména cena kotoučů z kubického nitridu boru a diamantu je vysoká a závisí na velikosti kotouče. Cena brusných kotouče z korundu a karbidu křemíku je závislá především na jejich čistotě a rozměrech. Obecně je řádově levnější než kotouče CBN a diamantu. Orovnače pro brusné kotouče se vyrábí nejběžněji z diamantu. Jejich cena je nízká a jejich životnost je velká. Čas orovnávaní je v řádu minut. Při broušení tvrdých materiálů se četnost orovnávaní zvyšuje. [35]

Náklady na výměnu nástroje

Náklady na výměnu nástroje se spočítají pomocí času výměny nástroje, odpisů stroje a mzdy seřizovače. Vyměněný brusný kotouč je vždy nutné vyvážit, kvůli zamezení vzniku házení, ke kterému dochází při vysokých otáčkách brusného vřetena. Čas vyvažování je v řádu minut. [35]

V předvýrobní fázi procesu známe všechny parametry pro náklady na stroj a na výměnu nástroje. Pro výpočet nákladů na nástroj neznáme zejména trvanlivost brusného kotouče a jeho počet orovnávaní. Literatura [1] například uvádí hodnoty trvanlivosti pro různé typy brusných kotoučů a různé řezné rychlosti. Trvanlivost a počet orovnávaní lze rovněž určit z předchozích zkušeností s brusným kotoučem. Pro konkrétní proces je ale velmi náročné predikovat trvanlivost a počet orovnávaní bez předchozí zkušenosti.

Při výběru vhodného brusného kotouče hledáme minimum výrobních nákladů. Brusné kotouče z kubického nitridu boru dovolují zvolit větší úběr materiálu, mají velmi vysokou stálost rozměrů díky nízké míře opotřebení. Jejich cena je ale mnohem vyšší oproti korundovým nebo křemíkovým kotoučům, takže ne vždy i přes jejich výborné vlastnosti bude jejich volba ekonomicky výhodná. [12]

Pro kalkulaci nákladů na broušení je nutné určit strojní čas procesu. Pro výpočet strojního času je nejprve nutné určit dráhu brusného kotouče. Pro vnější obvodové broušení se vypočte pomocí délky obrobku (l) a šířky brusného kotouče (B), viz vztah (22). [19]

$$L = l - \frac{1}{3}B \quad (22)$$

Pro rovinné broušení obvodem kotouče se musí určit délka v příčném i podélném směru. Příčná délka se určí, za pomoci šířky brusného kotouče (B) a šířky obrobku (b), viz vztah (23). [19]

$$B_b = b + \frac{2}{3}B \quad (23)$$

Podélná délka (L) se vyjádří na základě délky obrobku (l), délky náběhu a přeběhu, viz vztah (24). [19]

$$L = 0,08 \cdot l + l \quad (24)$$

Poté se vypočte počet řezů (i) z přídavku na broušení (z_h) a radiální hloubky řezu (a_e). Číslo 8 představuje přejezdů na vyjiskření povrchu, viz vztah (25). [19]

$$i = \frac{z_h}{2 \cdot a_e} + 8 \quad (25)$$

Pro rovinné broušení obvodem kotouče je rovněž nutné určit počet dvojjzdvihů za minutu (n), který se vypočte pomocí rychlosti obrobku (v_w) a podélné délky broušení (L), viz vztah (26). [19]

$$n = \frac{v_w}{2 \cdot L} \quad (26)$$

Strojní čas vnějšího obvodového broušení (t_{AS}) se určí na základě dráhy brusného kotouče (L), počtu řezů (i), podélného posuvu za otáčku (f_a) a otáček obrobku (n_w), viz vztah (27). [19]

$$t_{AS} = \frac{L \cdot i}{f_a \cdot n_w} \quad (27)$$

Pomocí vztahu (28) lze určit strojní čas rovinného broušení obvodem kotouče z příčné délky (B_b), počtu řezů (i), příčného posuvu (f_a) a počtu dvojjzdvihů za minutu (n). [19]

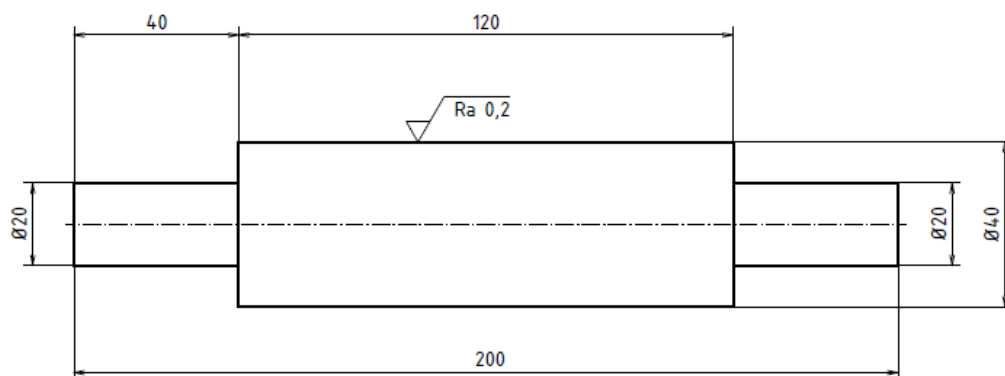
$$t_{AS} = \frac{B_b \cdot i}{f_a \cdot n} \quad (28)$$

6.9 Praktická ukázka volby brusného kotouče a pracovních podmínek

V této podkapitole je na příkladu jednoduché rotační a rovinné součásti demonstrován postup volby brusného kotouče a pracovních podmínek. Tyto součásti byly vybrány jako dva nejčastěji vyráběné typy součástí. Po návrhu je vypočtena řezná síla a řezný výkon pro výkonovou kontrolu stoje. Na závěr proběhne výpočet strojního času a ekonomické zhodnocení celého procesu.

6.9.1 Rotační součást

Zadaný obrobek má být vyroben z materiálu C45E o kvalitě povrchu Ra 0,35 μm a tvrdosti 55 HRC. Příklad na broušení je 0,3 mm. Požadovaný tvar a rozměry jsou na Obr. 27.



Obr. 27: Tvar, rozměry a drsnost povrchu obrobku.

1. Rozbor materiálu

Obrobek je z oceli C45E dle ČSN EN 10083-1. Tato ocel má mez pevnosti v tahu (R_m) 630-780 MPa a minimální mez kluzu (R_e) 370 MPa. Jedná se o nelegovanou ocel pro výrobu méně namáhaných strojních dílů v zušlechtěném stavu. Složení oceli je znázorněno v Tab. 20. [36]

Tab. 20: Obsah prvků v oceli 30CrNiMo8 v [%] [36].

C	Si max	Mn	P max	S max	Cr max	Mo max	Ni max	Cr+Mo+Ni
0,42÷0,5	0,4	0,5÷0,8	0,03	0,035	0,4	0,1	0,4	Max. 0,63

2. Rozbor výkresové dokumentace

Dle Obr. 27 je požadovaná kvalita povrchu v hodnotě Ra 0,2 μm . Jedná se tedy o součást s větším požadavkem na kvalitu obrobené plochy a je tedy nutné volit menší zrnitost brusného kotouče. Pomocí Tab. 4 byl zvolen brusný kotouč o zrnitosti 80 dle FEPA.

3. Volba metody broušení a stroje

Jelikož se jedná o rotační vyráběnou součást volíme metody pro obvodové broušení. Jako nejvíce vhodná metoda se jeví axiální obvodové broušení vnějších ploch „dokulata“, kde je možné obrobek upnout mezi hroty. Pro tuto metodu je doporučený tvar kotouče 1.

Pro metodu byla zvolena bruska firmy MIKRONEX typu BUA 16 CNC, viz Obr. 28: Bruska BUA 16 CNC. Základní technické parametry stroje jsou uvedeny v Tab. 21. Pro brusný kotouč volím rozměry 200x25x76.

Tab. 21: Technické parametry brusky BUA 16 CNC [37].

Max. oběžný průměr [mm]	160
Vzdálenost mezi hroty [mm]	250
Brusný kotouč [mm]	250x76x20
Otáčky brusného vřetene [ot.min⁻¹]	2450, 3920
Otáčky pracovního vřetene [ot.min⁻¹]	250-355-500-710
Výkon hlavního motoru [kW]	1,1
Hmotnost stroje [kg]	1500



Obr. 28: Bruska BUA 16 CNC [37].

4. Volba brusného kotouče

Materiál obrobku je z nelegované ušlechtilé oceli a volba brusiva je provedena z Tab. 6. Pro porovnání volím dva typy brusiva. Jako první jsem zvolil brusný kotouč z bílého korundu, který není cenově nákladný. Druhý typ byl zvolen kotouč s brusivem ze směsi mikrokrystalického a růžového korundu, který je velmi kvalitní a z korundových kotoučů umožňuje největší úběr materiálu. Cenově není příliš odlišný od brusného kotouče z bílého korundu. Dle použité metody je struktura obou kotoučů 5 (polohutná struktura). Jelikož se jedná o tvrdší materiál, tak brusný kotouč musí být zvolen měkčí. Konkrétní volba kotouče firmy TYROLIT je uvedena v Tab. 22.

Tab. 22: Volba brusiva a vlastností kotouče pro zadaný materiál obrobku. [12]

Brusivo	Tvrдость	Zrnitost	Struktura	Pojivo
89A	J	80	5	Keramické
454A	J	80	5	Keramické

5. Volba pracovních podmínek

Řezná rychlost

Pomocí rovnice (1) vypočteme pro zadané parametry hodnotu řezné rychlosti, která bude pro oba brusné kotouče stejná.

$$v_c = \frac{\pi \cdot D_s \cdot n_s}{60 \cdot 10^3} = \frac{\pi \cdot 200 \cdot 2450}{60 \cdot 10^3} = 25,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Vypočtená hodnota řezné rychlosti nepřesahuje maximální hodnoty řezné rychlosti pro nelegované oceli $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ z Tab. 15.

Axiální posuv stolu brusky

Jelikož jsou rozměry obou brusných kotoučů totožné, hodnoty posuvu budou zvoleny shodné. Dle Tab. 16 byl zvolen posuv pro hrubování $f_a = 15 \text{ mm}\cdot\text{ot}^{-1}$ a pro dokončovací operaci $f_a = 10 \text{ mm}\cdot\text{ot}^{-1}$.

Rychlost obrobku

Rychlost obrobku určíme pomocí vztahu (4). Otáčky pracovního vřetene (n_w) budou nastaveny na základě možností stroje z Tab. 21 $250 \text{ mm}\cdot\text{ot}^{-1}$.

$$v_w = \frac{\pi \cdot d_w \cdot n_w}{60 \cdot 10^3} = \frac{\pi \cdot 30 \cdot 250}{60 \cdot 10^3} = 0,32 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

Radiální hloubka řezu

Jednotlivé hodnoty radiální hloubky řezu byly zvoleny dle Tab. 17. Pro brusný kotouč z bílého korundu byla zvolena radiální hloubka řezu pro hrubování $a_e = 0,02 \text{ mm}$ a dokončovací operaci $a_e = 0,004 \text{ mm}$. Pro brusný kotouč ze směsi mikrokrytalického a růžového korundu lze zvolit oproti jiným korundovým kotoučům větší radiální hloubku řezu. Byla zvolena hodnota pro hrubování $a_e = 0,035 \text{ mm}$ a pro dokončovací operaci $a_e = 0,006 \text{ mm}$.

Řezné prostředí

Jako řezné prostředí byla zvolena emulze, kvůli větším radiálním hloubkám řezu a nutnosti chlazení obrobku a brusného kotouče.

6. Výpočet řezného výkonu

Ve výpočtech uvádím brusný kotouč z bílého korundu s indexem k1 a kotouč ze směsi mikrokrytalického a růžového korundu indexem k2.

Hrubovací operace

Řezná síla je pro brusný kotouč z brusiva 454A téměř čtyřnásobně větší oproti prvnímu kotouči, což je způsobeno větší zvolenou radiální hloubkou řezu. Strojní čas brusného kotouče k2 je menší než kotouče k1. Navržený stroj vyhovuje pro zvolené pracovní

podmínky. Výpočty hodnot jsou uvedeny v příloze č.3. Výsledné hodnoty jednotlivých parametrů jsou uvedeny v Tab. 23.

Tab. 23: Početní výsledky obou kotoučů při hrubovací operaci.

	k₁	k₂
λ_{Ke} [mm]	31	20
h_{eq} [mm]	0,016	0,009
K [-]	0,7	1,24
k_c [N.mm⁻²]	2 937	5 323,3
F_{c1} [N]	467	718,6
φ [°]	0,41	0,55
z [-]	0,02	0,048
F_c [N]	9,34	34,5
P_c [W]	240	886,7
t_{AS} [min]	0,5	0,4

Dokončovací operace

Řezná síla i strojní čas obou kotoučů je při dokončovací operaci srovnatelný. Výpočty hodnot jsou uvedeny v příloze č.4. Výsledné hodnoty jednotlivých parametrů jsou uvedeny v Tab. 24.

Tab. 24: Početní výsledky obou kotoučů při dokončovací operaci.

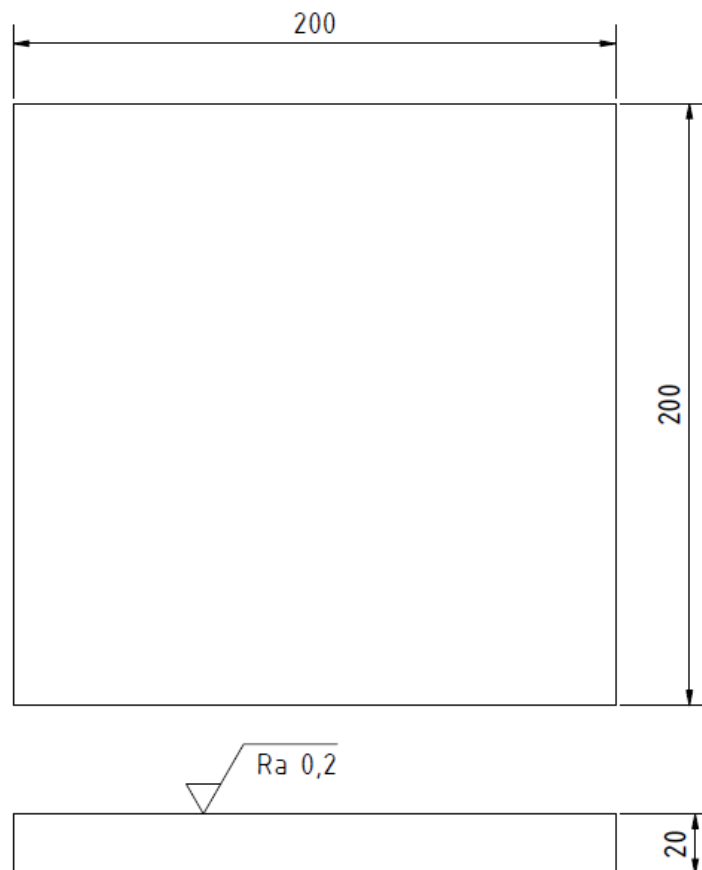
	k₁	k₂
λ_{Ke} [mm]	46	44
h_{eq} [mm]	0,0071	0,0083
K [-]	1,9	1,5
k_c [N.mm⁻²]	8 432	6 512,9
F_{c1} [N]	598,7	540,6
φ [°]	0,19	0,23
z [-]	0,0072	0,0091
F_c [N]	4,3	4,92
P_c [W]	110,5	126,4
t_{AS} [min]	0,45	0,4

7. Ekonomické zhodnocení procesu broušení

Z hlediska nákladů na stroj lze oba kotouče porovnat pomocí strojního času (t_{AS}), stroj i pracovník jsou pro oba kotouče shodné. Trvanlivost brusného kotouče z brusiva 89A byla delší, kvůli zvolené menší radiální hloubce řezu, tudíž brusný kotouč z brusiva 454A by byl častěji orovnáván. Cena obou brusných kotoučů je srovnatelná. Náklady na výměnu nástroje by byly pro oba kotouče stejné. Z důvodu kratšího strojního času by byl vybrán kotouč z brusiva 454A, který rovněž dovoluje větší úběr materiálu.

6.9.2 Rovinná součást

Obrobek má být vyroben z litiny ENG-GJL-250 o kvalitě povrchu $Ra\ 0,2\ \mu\text{m}$ a s přídavkem na broušení $0,3\ \text{mm}$. Tvar a rozměry obrobku jsou znázorněny na Obr. 29



Obr. 29: Tvar, rozměry a drsnost povrchu obrobku

1. Rozbor materiálu obrobku

Jedná se o litinu s lamelovým grafitem, která se vyznačuje velmi dobrou obrobitelností, pevností v tlaku i tepelnou vodivostí. Tento materiál má mez pevnosti v tahu (R_m) $250\ \div$

350 MPa). Využívá se pro strojní lože, převodové skříně nebo obráběcí stroje. Chemické složení v % je v Tab. 25. [38]

Tab. 25: Chemické složení litiny EN-GJL-250 [38].

C	Si	Mn	P	S	Cu
3,2 ÷ 3,5	2,5 ÷ 2,7	0,5 ÷ 0,8	0,1 ÷ 0,2	0,1	0,1 ÷ 0,6

2. Rozbor výkresové dokumentace

Dle Tab. 4 byla zvolena zrnitost brusného kotouče 80 pro požadovanou kvalitu povrchové vrstvy Ra 0,2 μm .

3. Volba metody broušení a stroje

Pro obrobek lze použít rovinné čelní a obvodové broušení. Jelikož obrobek má mít velkou kvalitu povrchu, je nejvýhodnější zvolit rovinné obvodové broušení, které je přesnější, viz Tab. 5. Pro rovinné obvodové broušení volím tvar kotouče 1. Pro tuto metodu volím brusku BRH 20 CNC. Její základní technické parametry jsou uvedeny v Tab. 26. Rozměry kotouče byly zvoleny 200x25x76 mm.

Tab. 26: Technické parametry brusky BRH 20 CNC [39].

Rozměr pracovního stolu [mm]	200 x 600
Podélný posuv stolu [mm]	600
Příčný posuv stolu [mm]	250
Brusný kotouč [mm]	250x76x20
Otáčky brusného vřetene [ot.min⁻¹]	2670, 3820
Výkon hlavního motoru [kW]	2,2
Hmotnost stroje [kg]	1850



Obr. 30: Bruska BRH 20 CNC [39].

4. Volba brusného kotouče

Materiál obrobku je z litiny a volba brusiva je tedy provedena z Tab. 11. Jako brusivo byl zvolen zelený karbid křemíku, který je vhodný pro rovinné broušení. Pro tuto metodu je doporučeno volit měkčí kotouče s otevřenou strukturou. Konkrétní volba kotouče firmy TYROLIT je uvedena v Tab. 27.

Tab. 27: Volba brusiva a vlastností kotouče pro rovinnou součást [12].

Brusivo	Tvrдост	Zrnitost	Struktura	Pojivo
Zelený karbid křemíku	I	80	10	Keramické

5. Volba pracovních podmínek

Řezná rychlost

Pomocí rovnice (1) vypočteme pro zadané parametry hodnotu řezné rychlosti. Otáčky brusného vřetene (n_s) budou zvoleny dle Tab. 26 2670 ot.min⁻¹.

$$v_c = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{60 \cdot 10^3} = \frac{\pi \cdot 200 \cdot 2670}{60 \cdot 10^3} = 28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Vypočtená hodnota řezné rychlosti nepřesahuje doporučenou hodnotu řezné rychlosti pro litiny 30 m.s⁻¹ z Tab. 15.

Rychlost obrobku

Na brusce bude nastavena rychlost posuvu stolu dle doporučených hodnot z reference [7], tj. $v_{ft} = v_w = 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Axiální posuv stolu brusky

Dle Tab. 16 byl zvolen boční posuv pro hrubování $f_a = 12,5 \text{ mm.dvozdvih}^{-1}$ a pro dokončovací operaci $f_a = 7,5 \text{ mm.dvozdvih}^{-1}$.

Radiální hloubka řezu

Dle Tab. 17 byla zvolena radiální hloubka řezu pro hrubování $a_e = 0,02 \text{ mm}$ a pro dokončovací operaci $a_e = 0,008 \text{ mm}$.

Řezné prostředí

Pro dobrou tepelnou vodivost tohoto materiálu a chlazení brusného kotouče bude obrobek chlazen pomocí emulze.

6. Výpočet řezného výkonu a strojního času

Provedené výpočty jsou uvedeny v příloze č.5. Jednotlivé výsledky a parametry jsou uvedeny v Tab. 34.

Tab. 34: Výsledky a použité parametry pro rovinnou součást.

	Hrubování	Dokončení
$\lambda_{Ke} \text{ [mm]}$	31	42
$h_{eq} \text{ [mm]}$	0,0031	0,0027
K [-]	3,25	3,4
$k_c \text{ [N.mm}^{-2}\text{]}$	16 927,3	18 356,2
$F_{c1} \text{ [N]}$	655,9	371,7
$\varphi \text{ [}^\circ\text{]}$	1,146	0,72
Z [-]	0,089	0,03
$F_c \text{ [N]}$	58,4	11,5
$P_c \text{ [W]}$	1 635,2	322
$t_{AS} \text{ [min]}$	6,9	7,7

7. Ekonomické zhodnocení procesu broušení

Navržený stroj výkonově vyhovuje nastaveným pracovním podmínkám. Pro tuto operaci vychází poměrně dlouhý strojní čas, což by vedlo ke zvýšení nákladů na stroj a na nástroj.

Cena brusných kotoučů z karbidu křemíku je navíc vyšší než oproti korundovým. Náklady na výměny nástroje by rovněž byly vysoké z důvodů drobivosti brusiva z karbidu křemíku, což udržuje brusný kotouč dostatečně ostrý, ovšem rychle ztrácí rozměry a byl by častěji vyměňován.

7 Závěr

Hlavním cílem této práce bylo popsat způsoby stanovení silových účinků při broušení, provést rozbor pracovních podmínek a jejich vlivu na proces a popsat postup navrhování procesu broušení dle materiálu obrobku, zejména s ohledem na volbu brusného kotouče.

První část práce se věnuje základnímu popisu technologie broušení, mechanice tvorbě třísky, druhům třísek a faktorům mající vliv na jejich tvar. Rovněž zde byla popsána geometrie řezání při broušení.

Druhá část práce se zabývá vlastnostmi, typy a značením brusných kotoučů. Dále byly v této kapitole rovněž rozebrány pracovní podmínky a jejich vliv na proces broušení.

Další část práce se zabývá silovými účinky při broušení. Nejprve je zde popsán silový rozklad s definicí jednotlivých sil vznikajících při broušení. Dále jsou zde uvedeny parametry mající vliv na velikost silových účinků. Jsou zde rovněž popsány přímé a nepřímé metody měření sil při broušení. Na závěr této kapitoly jsou popsány metody výpočtu řezné síly při broušení. Dle mého názoru se výpočty dají nejlépe provést pomocí výpočtu na základě měrné řezné síly a Pregrova vztahu.

Poslední část práce je věnovaná konkrétní volbě brusného kotouče a pracovních podmínek dle materiálu obrobku a použité metody broušení. Je zde popsána a názorně ukázána volba brusného kotouče, vliv vybraných materiálů na proces broušení a jsou popsány možnosti volby vlastností brusného kotouče pro tyto materiály. Tato část se rovněž věnuje zhodnocení procesu z ekonomického hlediska. Na závěr je ukázána praktická volba brusného kotouče, kontrolní výpočet řezného výkonu pro zvolený stroj a výpočet strojního času.

Seznam obrázků

Obr. 1: Fáze tvorby třísky [4].....	14
Obr. 2: Druhy třísek vznikající při broušení.....	14
Obr. 3: Změna tvaru zavínuté třísky na segmentovitou s rosoucí rychlostí obrobku	15
Obr. 4: Záběr brusného zrna do materiálu obrobku (vlevo) [7] a znázorněný normálního úhlu řezu (vpravo) [8].....	15
Obr. 5: Značení brusných kotoučů z běžné keramiky firmy TYROLIT [12].	16
Obr. 6: Značení brusných kotoučů z kubického nitridu boru a diamantu dle firmy TYROLIT [12].	16
Obr. 7: Rozdíl mezi reálnou a nastavenou hloubkou řezu [13].....	22
Obr. 8: Obvodové (vlevo) a čelní (vpravo) broušení [15].	26
Obr. 9: Hloubkové obvodové broušení vnějších ploch „dokolata“ [15].	27
Obr. 10: Radiální obvodové broušení vnějších ploch [15].	28
Obr. 11: Bezhraté průběžné broušení [15].	28
Obr. 12: Bezhraté zapichovací broušení válcových ploch [15].	29
Obr. 13: Axiální broušení vnitřních válcových ploch [15].	30
Obr. 14: Bezhraté obvodové broušení vnitřních ploch „dokolata“ [15].	30
Obr. 15: Planetové broušení vnitřních válcových ploch [15].	31
Obr. 16: Posuvný pohyb obrobku (vlevo) a Rotační pohyb obrobku (vpravo) [15].	32
Obr. 17: Otáčivý pohyb obrobku (vlevo) a přímočarý pohyb obrobku (vpravo) [15].	32
Obr. 18: Rozklad síly F na jednotlivé složky [23].	34
Obr. 19: Vliv obvodové rychlosti obrobku na velikost sil [13].	36
Obr. 20: Závislost síly na radiální hloubce řezu u broušení na sucho a za použití řezné kapaliny [13].	37
Obr. 21: Závislost řezné síly na radiální hloubce řezu [9].	38
Obr. 22: Měření výkonu v závislosti na čase [26].	39
Obr. 23: Schéma měření pomocí rotačního piezoelektrického dynamometru (vlevo) [28] a piezoelektrický dynamometr firmy Kistler typu 9171A [29].	40
Obr. 24: Zapojení stacionárního piezoelektrického dynamometru (vlevo) [27] a piezoelektrický dynamometr typu 9257B firmy KISTLER (vpravo) [30].	40
Obr. 25: Vývojový diagram volby pracovních podmínek.	44
Obr. 26: Cena strojírenského výrobku [35].	55
Obr. 27: Tvar, rozměry a drsnost povrchu obrobku.....	59
Obr. 28: Bruska BUA 16 CNC [37].	61
Obr. 29: Tvar, rozměry a drsnost povrchu obrobku.....	64
Obr. 30: Bruska BRH 20 CNC [39].	66

Seznam tabulek

Tab. 1: Rozdělení zrnitosti dle FEPA [16].	19
Tab. 2: Určení efektivní vzdálenosti zrn jako funkce zrnitosti a radiální.....	23
Tab. 3: Porovnání vlastností vody a používaných olejů [10].	25
Tab. 4: Volba zrnitosti dle požadované kvality povrchu obrobku [32].	46
Tab. 5: Dosažitelná přesnost jednotlivých metod broušení [19].	46
Tab. 6: Volba brusiva a vlastností brusného kotouče pro nekalné nelegované a nízkolegované oceli [12].	48
Tab. 7: Typy brusiva a jeho vlastností pro kalené nelegované a nízkolegované oceli [12].	48
Tab. 8: Volba brusiva pro nekalené vysoce legované oceli [12].	49
Tab. 9: Možnosti volby brusiva a vlastností brusného kotouče pro vysoce legované oceli kalené [12].	49
Tab. 10: Typy brusiva a vlastností brusného kotouče pro nerezové oceli [12] [31].	49
Tab. 11: Typ brusiva a rozsah vlastností používaných pro broušení litin [12] [31].	50
Tab. 12: Volba vlastností brusného kotouče pro broušení titanu a jeho slitin [31].	50
Tab. 13: Kotouče pro broušení barevných kovů [31].	51
Tab. 14: Volba brusného kotouče a jeho vlastností pro broušení tvrdokovů [12] [31].	51
Tab. 15: Maximální řezná rychlost v závislosti na metodě broušení a použitém materiálu [19].	52
Tab. 16: Volba axiálního pro litiny a oceli pro metody broušení [7] [18].	53
Tab. 17: Volba radiální hloubky řezu na zvolené metodě broušení pro kotouče z korundu a karbidu křemíku pro oceli a litiny [18] [19].	53
Tab. 18: Volba řezného prostředí pro různé aplikace [19].	54
Tab. 19: Možné chyby a příčiny vznikající při broušení [31].	54
Tab. 20: Obsah prvků v oceli 30CrNiMo8 v [%] [36].	59
Tab. 21: Technické parametry brusky BUA 16 CNC [37].	60
Tab. 22: Volba brusiva a vlastností kotouče pro zadaný materiál obrobku. [12]	61
Tab. 23: Početní výsledky obou kotoučů při hrubovací operaci.	63
Tab. 24: Početní výsledky obou kotoučů při dokončovací operaci.	63
Tab. 25: Chemické složení litiny EN-GJL-250 [38].	65
Tab. 26: Technické parametry brusky BRH 20 CNC [39].	65
Tab. 27: Volba brusiva a vlastností kotouče pro rovinnou součást [12].	66

Citovaná literatura

- [1] MASLOV, Je. N. *Teorie broušení kovů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1979. ISBN neuvedeno.
- [2] MALKIN, S. a Changsheng GUO. *Grinding technology: theory and application of machining with abrasives*. 2nd ed. New York: Industrial Press, 2008. ISBN 978-0-8311-3247-7.
- [3] MÁDL, Jan. *Mechanical Technology Material-Removal Processes*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1996. ISBN neuvedeno.
- [4] *Journal of materials processing technology: Analysis of the grain shape influence on the chip formation in grinding*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 2015, 60-68. ISSN 0924-0136. Dostupné také z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013615300480>
- [5] ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *Experimentální metody v obrábění: učební text*. Ostrava: VŠB-TUO, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2012. ISBN 978-80-248-2533-5.
- [6] DRÁB, Vojtěch. *Technologie I*. 2.vyd. Liberec: Vysoká škola strojní a textilní, 1985. ISBN neuvedeno.
- [7] KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. Brno: CERM, 2001. ISBN 80-214-1996-2.
- [8] MÁDL, Jan. *Teorie obrábění*. Dotisk. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1990. ISBN Neuvedeno.
- [9] MARINESCU, Ioan D., W. Brian ROWE, Boris DIMITROV a Ichiro INASAKI. *Tribology of abrasive machining processes*. Norwich, NY: William Andrew Pub., 2004. ISBN 0-8155-1490-5.
- [10] KLOCKE, Fritz. *Manufacturing Processes 2: Grinding, Honing, Lapping*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009, 433 s. ISBN 978-3-642-10076-5.
- [11] JERSÁK, Jan. *Základní konvenční technologie obrábění broušení brousicími kotouči* [online]. In: . 06.06.2012 [cit. 2021-5-29]. Dostupné z:
<https://docplayer.cz/14919312-Zakladni-konvencni-technologie-obrabeni-brouseni-brousicimi-kotouci.html>
- [12] *Katalog skladových výrobků pro precizní broušení* [online]. TYROLIT CEE, 2020 [cit. 2021-1-6]. Dostupné z:
<https://mam.swarovski.com/pinaccess/pinaccess.do?pinCode=uPwp4zqGydAz>
- [13] ROWE, W. Brian. *Principles of Modern Grinding Technology*. 2.vyd. William Andrew, 2013, 480 s. ISBN 9780323242714.
- [14] LOW, It-Meng. *Advances in ceramic matrix composites: Cubic boron nitride-containing ceramic matrix composites for cutting tools*. Second edition. Duxford, United Kingdom: Woodhead Publishing, an imprint of Elsevier, [2014], 655-671s. Woodhead Publishing

- series in composites science and engineering. ISBN 9780081021668. Dostupné také z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081021668000268>.
- [15] BRYCHTA, Josef. *Nové směry v progresivním obrábění* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2007 [cit. 2021-5-16]. ISBN 978-80-248-1505-3. Dostupné z: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO/texty.pdf>
- [16] ŠTAJNOCHR, Lubomír. *Broušení nástrojů. 2., přeprac. vyd.* Praha: Grada, 2004. Profi & hobby. ISBN 80-247-0742-X.
- [17] *Tvrдость brusného kotouče* [online]. KLINGSPOR Brusivo, spol. s r.o. [cit. 2021-4]. Dostupné z: <https://www.klingspor.cz/znalosti-o-brouseni/tvrдост-brusneho-kotouce>
- [18] HUMÁR, Anton. *Technologie 1 - 3. část* [online]. In: . 2005, 57 s [cit. 2021-3-6]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/13479-Technologie-i-technologie-obrabeni-3-cast.html>.
- [19] TSCHÄTSCH, Heinz. *Applied machining technology*. Dordrecht: Springer, 2007. ISBN 978-3-642-01006-4.
- [20] BARTOŇOVÁ, Renata. *Technologie broušení* [online]. In: . [cit. 2021-015-03]. Dostupné z: http://moodle2.voskop.eu/download/teu/U01_Technologie_brouseni.pdf
- [21] GAZDA, Jaromír. *TEORIE OBRÁBĚNÍ: Řezné síly při obrábění*. Liberec: VŠST, 1992. ISBN 80-7083-110-3.
- [22] *International Journal of Mechanical Sciences: Detailed modeling of cutting forces in grinding process considering variable stages of grain-workpiece micro interactions*. 2017. Elmsford: Pergamon Press, 1960-. ISSN 0020-7403. Dostupné také z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020740316308268>
- [23] VASILKO, Karol. *Analytická teória trieskového obrábania*. Prešov: COFIN Prešov, 2007, 338 s. ISBN 978-80-8073-759-7.
- [24] *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering: Effect of Coolant on Cutting Forces and Surface Roughness in Grinding of CSM GFRP* [online]. 2012, 1478-1483 s [cit. 2021-7-5]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/Effect-of-Coolant-on-Cutting-Forces-and-Surface-in-Chockalingam-Kok/c36a01582588d2d4f4a2b4f7405cfd6e90a2637a>
- [25] *8. Měření složek* [online]. In: . VŠB [cit. 2021-7-5]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_08.pdf
- [26] KOVALČÍK, Jaroslav. *Predikce silových parametrů řezného procesu při frézování* [online]. Praha, 2020 [cit. 2021-10-6]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/91031>. Disertační práce. České vysoké učení v Praze, Fakulta strojní, Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie.
-

- [27] 9. *Přímé měření sil a momentů* [online]. In: . VŠB [cit. 2021-7-5]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_09.pdf
- [28] Rotating Multi-Component Dynamometer up to 12000 1/min. *KISTLER* [online]. Kistler Group [cit. 2021-5]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/en/product/type-9171a/?application=40>
- [29] *Advanced Materials Research: Development of Three-Dimensional Dynamometer for Wafer Grinder* [online]. 2010 [cit. 2021-5]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/250359664_Development_of_Three-Dimensional_Dynamometer_for_Wafer_Grinder.
- [30] *Applied Surface Science: Effect of fiber orientations on surface grinding process of unidirectional C/SiC composites*. Amsterdam: Elsevier B.V., 2016, 424-431. ISSN 0169-4332. Dostupné také z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433216001793>
- [31] *Katalog skladových výrobků pro univerzální broušení* [online]. In: . TYROLIT CEE, 2019 [cit. 2021-10-6]. Dostupné z: https://www.tyrolit.cz/fileadmin/Documents/Trade/Catalogues/TYROLIT_2019_A5_CZ_1_7_OB.pdf
- [32] *Průmyslové aplikace – Norton katalog* [online]. In: . Saint-Gobain Abrasives, 2019 [cit. 2021-23-6]. Dostupné z: https://www.brusivo-nastroje.cz/katalogy/norton/Norton_Industrial_MRO_Czech_2018_v05_1.pdf#page=1.
- [33] DE VOS, Patrick. Příručka pro technology: Proces obrábění v nerezových ocelích - závěrečné tipy. *MM: Průmyslové spektrum* [online].
MM Průmyslové spektrum, 2012 [cit. 2021-6]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-proces-obrabeni-v-nerezovych-ocelich-zaverecne-tipy>
- [34] BÖHLKE, Wolfgang. Tvrdokov: vysoce odolný materiál proti opotřebení. *MM: Průmyslové spektrum* [online]. MM Průmyslové spektrum [cit. 2021-6]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/tvrdokov-vysoce-odolny-material-proti-opotrebeni>
- [35] MÁDL, Jan a Ivo KVASNIČKA. *Optimalizace obráběcího procesu*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1998. ISBN 80-01-001864-6.
- [36] Přehled vlastností oceli C45E. *BBolzano* [online]. Kladno: Bohdan Bolzano [cit. 2021-6]. Dostupné z: <https://bbolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/tycove-oceli-uhlikove-konstrukcni-a-legovane/oceli-k-zuslechtovani-podle-en-10083-1/prehled-vlastnosti-oceli-c45>
-

- [37] Universální hrotová bruska: BUA 16 CNC. *Mikronex* [online]. Na Úlehli 1286/16 Praha 4: MIKRONEX [cit. 2021-6]. Dostupné z: <http://www.mikronex.cz/BUA16CNC.pdf>
- [38] Litina s lamelovým grafitem. *Kipp* [online]. HEINRICH KIPP WERK GmbH & Co [cit. 2021-6]. Dostupné z: <https://www.kipp.cz/cz/cs/Slu%C5%BEby/P%C5%99ehled-materi%C3%A1l%C5%AF/Litina/pid.1097.1108.1244.9811.9815/Litina-s-lamelov%C3%BDm-grafitem.html>
- [39] Universální bruska na plocho: BUA 20 CNC. *Mikronex* [online]. Na Úlehli 1286/16 Praha 4: MIKRONEX [cit. 2021-6]. Dostupné z: <http://www.mikronex.cz/BRH20CNC.pdf>

Seznam použitého software

1. Microsoft Word
2. Microsoft Excel
3. Autodesk Inventor 2020

Seznam příloh

Příloha č.1: Tabulka pro určení měrné řezné síly dle materiálu obrobku.
Příloha č.2: Graf pro určení korekčního faktoru dle ekvivalentní tloušťky broušení pro zrnitost 80 dle FEPA.
Příloha č.3: Výpočet řezného výkonu a strojního času hrubovací operace pro brusné kotouče z bílého korundu a směsi mikrokrystalického a růžového korundu.
Příloha č.3: Výpočet řezného výkonu a strojního času dokončovací operace pro brusné kotouče z bílého korundu a směsi mikrokrystalického a růžového korundu.
Příloha č.4: Výpočet řezného výkonu a strojního času hrubovací a dokončovací operace pro brusný kotouč ze zeleného karbidu křemíku.
Příloha č.5: Graf pro určení efektivní vzdálenosti zrn hrubovacích operací pro zrnitost 80 pomocí hloubky řezu.
Příloha č.6: Graf pro určení efektivní vzdálenosti zrn dokončovacích operací pro zrnitost 80 pomocí hloubky řezu.
Příloha č.7: Efektivní vzdálenost zrn pro výpočet ekvivalentní tloušťky broušení při dokončovacích operacích.

Příloha č.8:

Tabulka značení materiálu zrn na brusných kotoučích firmy TYROLIT.

Příloha č.9:

Tabulka značení vybraných tvarů a rozměrů brusných kotoučů z ČSN EN 12413.

Příloha č.10:

Tabulka rozdělení řezné rychlosti dle barevného značení brusných kotoučů dle ČSN EN 12413.

Příloha č.11:

Tabulka rozdělení rovinného, čelního broušení a broušení dokulata.

Příloha č.12:

Tabulka hodnot empirických konstant pro vybrané metody broušení.

Příloha č.1: Tabulka materiálových konstant ($k_{c1.1}$, m_c) pro určení měrné řezné síly, viz reference [19].

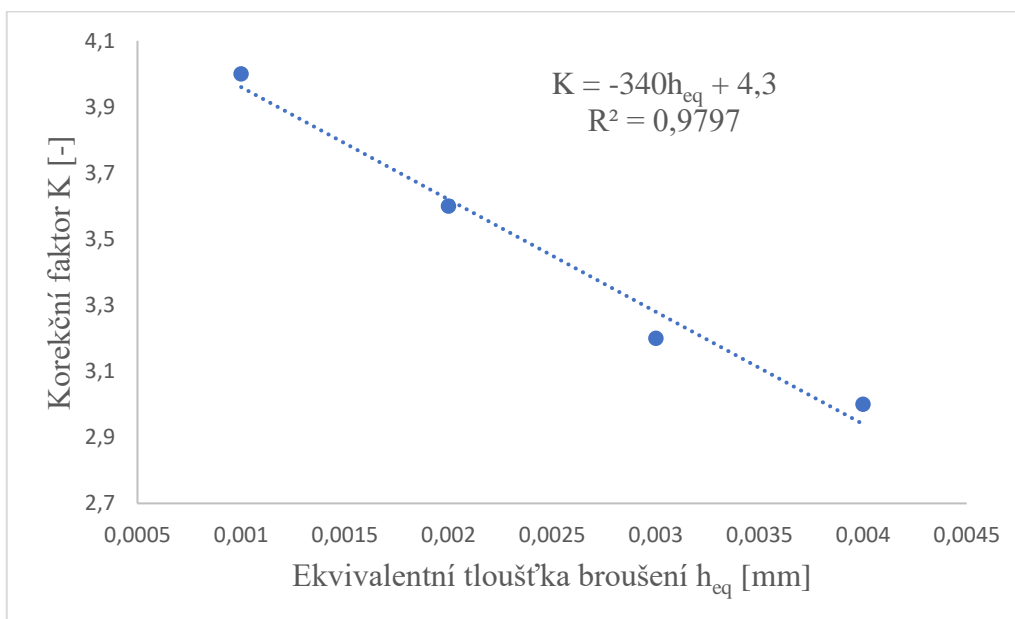
Materiál	$k_{c1.1}$ V N/mm	m_c
S 235 JR	1780	0,17
E 295	1990	0,26
E 335	2110	0,17
E 360	2260	0,30
C 15	1820	0,22
C 35	1860	0,20
C 45, C 45 E	2220	0,14
C 60 E	2130	0,18
16 MnCr 5	2100	0,26
18 CrNi 6	2260	0,30
34 CrMo 4	2240	0,21
GJL 150	1020	0,25
GJL 250	1160	0,26
GE 260	1780	0,17
Bílá litina	2060	0,19
Mosaz	780	0,18

Příloha č.2: Korekční faktor pro výpočet měrné řezné síly při broušení.

Hodnoty korekčního faktoru pro různé hodnoty ekvivalentní tloušťky a pro různé zrnitosti, viz reference [19]:

Zrnitost	Ekvivalentní tloušťka broušení h_{eq} [mm]			
	0,001	0,002	0,003	0,004
40	5,1	4,3	4	3,6
60	4,5	3,9	3,5	3,2
80	4	3,6	3,2	3
120	3,4	3	2,8	2,5
180	3	2,6	2,4	2,2
280	2,5	2,2	2	1,9

Graf závislosti korekčního faktoru na ekvivalentní tloušťce sestavený na základě dat z výše uvedené tabulky pro brousící kotouč o zrnitosti 80 dle FEPA, který byl použit v kapitole 6.9 pro výpočty silových účinků při broušení.



Příloha č.3: Výpočet řezného výkonu a strojního času hrubovací operace pro brusné kotouče z bílého korundu (k1) a směsi mikrokrystalického a růžového korundu (k2).

Efektivní vzdálenosti zrn pro k2 na základě získané závislosti z přílohy č.6:

$$\lambda_{Ke_{k2}} = -800 \cdot a_e + 47,667 = -800 \cdot 0,035 + 47,667 = 19,667 \text{ mm} \cong 20 \text{ mm}$$

Ekvivalentní tloušťka broušení:

$$\begin{aligned} h_{eq_{k1}} &= \frac{v_w \cdot \lambda_{Ke_{k1}}}{v_c} \cdot \sqrt{a_{e_{k1}} \cdot \left(\frac{1}{D_s} + \frac{1}{d_w}\right)} = \frac{0,32 \cdot 31}{25,7} \cdot \sqrt{0,02 \cdot \left(\frac{1}{200} + \frac{1}{30}\right)} \\ &= 0,016 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_{eq_{k2}} &= \frac{v_w \cdot \lambda_{Ke_{k2}}}{v_c} \cdot \sqrt{a_{e_{k2}} \cdot \left(\frac{1}{D_s} + \frac{1}{d_w}\right)} = \frac{0,32 \cdot 20}{25,7} \cdot \sqrt{0,035 \cdot \left(\frac{1}{200} + \frac{1}{30}\right)} \\ &= 0,009 \text{ mm} \end{aligned}$$

Materiálové konstanty ($k_{c1,1}$, m_c) byly pro zadaný materiál obrobku určeny z přílohy č.1.

Korekční faktor dle závislosti z přílohy č.2.:

$$K_{k1} = -340 \cdot h_{eq} + 4,3 = -340 \cdot 0,0106 + 4,3 = 0,7$$

$$K_{k2} = -340 \cdot h_{eq} + 4,3 = -340 \cdot 0,009 + 4,3 = 1,24$$

Měrná řezná síla:

$$k_{c_{k1}} = k_{c1,1} \cdot h_{eq_{k1}}^{-m_c} \cdot K_{k1} = 2220 \cdot 0,0106^{-0,14} \cdot 0,7 = 2\,937 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$$

$$k_{c_{k2}} = k_{c1,1} \cdot h_{eq_{k2}}^{-m_c} \cdot K_{k2} = 2220 \cdot 0,009^{-0,14} \cdot 1,24 = 5\,323,3 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$$

Řezná síla působící na jedno zrno:

$$F_{c1_{k1}} = k_{c_{k1}} \cdot h_{eq_{k1}} \cdot f_a = 2\,937 \cdot 0,0106 \cdot 15 = 467 \text{ N}$$

$$F_{c1_{k2}} = k_{c_{k2}} \cdot h_{eq_{k2}} \cdot f_a = 5\,323,3 \cdot 0,009 \cdot 15 = 718,6 \text{ N}$$

Úhel náběhu:

$$\varphi_{k1} = \frac{360^\circ}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{a_{ek1}}{D_s \cdot \left(1 + \frac{D_s}{d}\right)}} = \frac{360^\circ}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{0,02}{200 \cdot \left(1 + \frac{200}{30}\right)}} = 0,41^\circ$$

$$\varphi_{k2} = \frac{360^\circ}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{a_{ek2}}{D_s \cdot \left(1 + \frac{D_s}{d}\right)}} = \frac{360^\circ}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{0,035}{200 \cdot \left(1 + \frac{200}{30}\right)}} = 0,55^\circ$$

Počet zrn v záběru:

$$z_{k1} = \frac{D_s \cdot \pi \cdot \varphi_{k1}}{\lambda_{Ke_{k1}} \cdot 360^\circ} = \frac{200 \cdot \pi \cdot 0,41}{31 \cdot 360^\circ} = 0,02 \text{ zrn}$$

$$z_{k2} = \frac{D_s \cdot \pi \cdot \varphi_{k2}}{\lambda_{Ke_{k2}} \cdot 360^\circ} = \frac{200 \cdot \pi \cdot 0,55}{20 \cdot 360^\circ} = 0,048 \text{ zrn}$$

Celková řezná síla:

$$F_{ck1} = F_{1ck1} \cdot z_{k1} = 467 \cdot 0,02 = 9,34 \text{ N}$$

$$F_{ck2} = F_{1ck2} \cdot z_{k2} = 718,6 \cdot 0,048 = 34,5 \text{ N}$$

Řezný výkon:

$$P_{ck1} = F_{ck1} \cdot v_c = 9,34 \cdot 25,7 = 240 \text{ W}$$

$$P_{ck2} = F_{ck2} \cdot v_c = 34,5 \cdot 25,7 = 886,7 \text{ W}$$

Dráha brusného kotouče:

$$L = l - \frac{1}{3} \cdot B = 120 - \frac{1}{3} \cdot 25 = 111,7 \text{ mm}$$

Počet řezů:

$$i_{k1} = \frac{\Delta d}{2 \cdot a_{ek1}} + 8 = \frac{0,29}{2 \cdot 0,02} + 8 = 16$$

$$i_{k2} = \frac{\Delta d}{2 \cdot a_{ek2}} + 8 = \frac{0,29}{2 \cdot 0,035} + 8 = 13$$

Strojní čas:

$$t_{AS_{k1}} = \frac{L \cdot i_{k1}}{f \cdot n_w} = \frac{111,7 \cdot 16}{15 \cdot 250} = 0,5 \text{ min}$$

$$t_{AS_{k2}} = \frac{L \cdot i_{k2}}{f \cdot n_w} = \frac{111,7 \cdot 13}{15 \cdot 250} = 0,4 \text{ min}$$

Příloha č.4: Výpočet řezného výkonu a strojního času dokončovací operace pro brusné kotouče z bílého korundu (k1) a směsi mikrokrytalického a růžového korundu (k2).

Ekvivalentní tloušťka broušení:

$$h_{eqk1} = \frac{v_w \cdot \lambda_{Ke k1}}{v_c} \cdot \sqrt{a_{ek1} \cdot \left(\frac{1}{D_s} + \frac{1}{d_w}\right)} = \frac{0,32 \cdot 46}{25,7} \cdot \sqrt{0,004 \cdot \left(\frac{1}{200} + \frac{1}{30}\right)} \\ = 0,0071 \text{ mm}$$

$$h_{eqk2} = \frac{v_w \cdot \lambda_{Ke k2}}{v_c} \cdot \sqrt{a_{ek2} \cdot \left(\frac{1}{D_s} + \frac{1}{d_w}\right)} = \frac{0,32 \cdot 44}{25,7} \cdot \sqrt{0,006 \cdot \left(\frac{1}{200} + \frac{1}{30}\right)} \\ = 0,0083 \text{ mm}$$

Korekční faktor (vypočítá se na základě získané závislosti v příloze 2):

$$K_{k1} = -340 \cdot h_{eq} + 4,3 = -340 \cdot 0,0071 + 4,3 = 1,9$$

$$K_{k2} = -340 \cdot h_{eq} + 4,3 = -340 \cdot 0,0083 + 4,3 = 1,5$$

Měrná řezná síla:

$$k_{ck1} = k_{c1,1} \cdot h_{eqk1}^{-m_c} \cdot K_{k1} = 2220 \cdot 0,0071^{-0,14} \cdot 1,9 = 8\,432 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$$

$$k_{ck2} = k_{c1,1} \cdot h_{eqk2}^{-m_c} \cdot K_{k2} = 2220 \cdot 0,0083^{-0,14} \cdot 1,5 = 6\,512,9 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$$

Řezná síla působící na jedno zrno:

$$F_{c1k1} = k_{ck1} \cdot h_{eqk1} \cdot f_a = 8\,432 \cdot 0,0071 \cdot 10 = 598,7 \text{ N}$$

$$F_{c1k2} = k_{ck2} \cdot h_{eqk2} \cdot f_a = 6\,512,9 \cdot 0,0083 \cdot 10 = 540,6 \text{ N}$$

Úhel náběhu:

$$\varphi_{k1} = \frac{360^\circ}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{a_{ek1}}{D_s \cdot \left(1 + \frac{D_s}{d}\right)}} = \frac{360^\circ}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{0,004}{200 \cdot \left(1 + \frac{200}{30}\right)}} = 0,19^\circ$$

$$\varphi_{k2} = \frac{360^\circ}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{a_{ek2}}{D_s \cdot \left(1 + \frac{D_s}{d}\right)}} = \frac{360^\circ}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{0,006}{200 \cdot \left(1 + \frac{200}{30}\right)}} = 0,23^\circ$$

Počet zrn v záběru:

$$z_{k1} = \frac{D_s \cdot \pi \cdot \varphi_{k1}}{\lambda_{Ke_{k1}} \cdot 360^\circ} = \frac{200 \cdot \pi \cdot 0,19}{46 \cdot 360^\circ} = 0,0072 \text{ zrn}$$

$$z_{k2} = \frac{D_s \cdot \pi \cdot \varphi_{k2}}{\lambda_{Ke_{k2}} \cdot 360^\circ} = \frac{200 \cdot \pi \cdot 0,23}{44 \cdot 360^\circ} = 0,0091 \text{ zrn}$$

Řezná síla:

$$F_{c_{k1}} = F_{1c_{k1}} \cdot z_{k1} = 598,7 \cdot 0,0072 = 4,3 \text{ N}$$

$$F_{c_{k2}} = F_{1c_{k2}} \cdot z_{k2} = 540,6 \cdot 0,0091 = 4,92 \text{ N}$$

Řezný výkon:

$$P_{c_{k1}} = F_{c_{k1}} \cdot v_c = 4,3 \cdot 25,7 = 110,5 \text{ W}$$

$$P_{c_{k2}} = F_{c_{k2}} \cdot v_c = 4,92 \cdot 25,7 = 126,4 \text{ W}$$

Dráha brusného kotouče:

$$L = l - \frac{1}{3} \cdot B = 120 - \frac{1}{3} \cdot 25 = 111,7 \text{ mm}$$

Počet řezů:

$$i_{k1} = \frac{\Delta d}{2 \cdot a_{e_{k1}}} + 8 = \frac{0,01}{2 \cdot 0,004} + 8 = 10$$

$$i_{k2} = \frac{\Delta d}{2 \cdot a_{e_{k2}}} + 8 = \frac{0,01}{2 \cdot 0,006} + 8 = 9$$

Strojní čas:

$$t_{AS_{k1}} = \frac{L \cdot i_{k1}}{f \cdot n_w} = \frac{111,7 \cdot 10}{10 \cdot 250} = 0,45 \text{ min}$$

$$t_{AS_{k2}} = \frac{L \cdot i_{k2}}{f \cdot n_w} = \frac{111,7 \cdot 9}{10 \cdot 250} = 0,4 \text{ min}$$

Příloha č.5: Výpočet řezného výkonu a strojního času hrubovací a dokončovací operace pro brusný kotouč ze zeleného karbidu křemíku.

Hrubování:

Ekvivalentní tloušťka broušení:

$$h_{eq} = \frac{v_w \cdot \lambda_{Ke}}{v_c} \cdot \sqrt{\frac{a_e}{D_s}} = \frac{0,28 \cdot 31}{28} \cdot \sqrt{\frac{0,02}{200}} = 0,0031 \text{ mm}$$

Korekční faktor (vypočítá se na základě získané závislosti v příloze 2):

$$K = -340 \cdot h_{eq} + 4,3 = -340 \cdot 0,0031 + 4,3 = 3,25$$

Měrná řezná síla:

$$k_c = k_{c1,1} \cdot h_{eq}^{-m_c} \cdot K = 1160 \cdot 0,0031^{-0,26} \cdot 3,25 = 16\,927,3 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$$

Řezná síla působící na jedno zrno:

$$F_{c1} = k_c \cdot h_{eq} \cdot f_a = 16\,927,3 \cdot 0,0031 \cdot 12,5 = 655,9 \text{ N}$$

Úhel náběhu:

$$\cos \varphi = 1 - \frac{2 \cdot a_e}{D_s} = 1 - \frac{2 \cdot 0,02}{200} = 0,9998$$
$$\varphi = 1,146^\circ$$

Počet zrn v záběru:

$$z = \frac{D_s \cdot \pi \cdot \varphi}{\lambda_{Ke} \cdot 360^\circ} = \frac{200 \cdot \pi \cdot 1,146}{31 \cdot 360^\circ} = 0,089 \text{ zrn}$$

Řezná síla:

$$F_c = F_{1c} \cdot z = 655,9 \cdot 0,089 = 58,4 \text{ N}$$

Řezný výkon:

$$P_c = F_c \cdot v_c = 58,4 \cdot 28 = 1\,635,2 \text{ W}$$

Příčná dráha brusného kotouče:

$$B_b = \frac{2}{3} \cdot B + b = \frac{2}{3} \cdot 25 + 200 = 217 \text{ mm}$$

Podélná dráha brusného kotouče:

$$L = 0,08 \cdot l + l = 0,08 \cdot 200 + 200 = 216 \text{ mm}$$

Počet řezů:

$$i = \frac{z_h}{2 \cdot a_e} + 8 = \frac{0,28}{2 \cdot 0,02} + 8 = 15$$

Počet dvojzdvihů za minutu:

$$n = \frac{v_w}{2 \cdot L} = \frac{15}{2 \cdot 0,2} = 38$$

Strojní čas:

$$t_{AS} = \frac{B_b \cdot i}{f_a \cdot n} = \frac{217 \cdot 15}{12,5 \cdot 38} = 6,9 \text{ min}$$

Dokončovací operace:

Efektivní vzdálenost zrn (vypočítá se na základě získané závislosti v příloze 7):

$$\lambda_{Ke} = -1000 \cdot 0,008 + 50 = 42 \text{ mm}$$

Ekvivalentní tloušťka broušení:

$$h_{eq} = \frac{v_w \cdot \lambda_{Ke}}{v_c} \cdot \sqrt{\frac{a_e}{D_s}} = \frac{0,28 \cdot 42}{28} \cdot \sqrt{\frac{0,008}{200}} = 0,0027 \text{ mm}$$

Korekční faktor (vypočítá se na základě získané závislosti v příloze 2):

$$K = -340 \cdot h_{eq} + 4,3 = -340 \cdot 0,0027 + 4,3 = 3,4$$

Měrná řezná síla

$$k_c = k_{c1,1} \cdot h_{eq}^{-mc} \cdot K = 1160 \cdot 0,0027^{-0,26} \cdot 3,4 = 18\,356,2 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$$

Řezná síla působící na jedno zrno:

$$F_{c1} = k_c \cdot h_{eq} \cdot f_a = 18\,356,2 \cdot 0,0027 \cdot 7,5 = 371,7 \text{ N}$$

Úhel náběhu:

$$\cos \varphi = 1 - \frac{2 \cdot a_e}{D_s} = 1 - \frac{2 \cdot 0,008}{200} = 0,99992$$

$$\varphi = 0,72^\circ$$

Počet zrn v záběru:

$$z = \frac{D_s \cdot \pi \cdot \varphi}{\lambda_{Ke} \cdot 360^\circ} = \frac{200 \cdot \pi \cdot 0,72}{42 \cdot 360^\circ} = 0,03 \text{ zrn}$$

Řezná síla:

$$F_c = F_{1c} \cdot z = 371,7 \cdot 0,03 = 11,5 \text{ N}$$

Řezný výkon:

$$P_c = F_c \cdot v_c = 11,5 \cdot 28 = 322 \text{ W}$$

Příčná dráha brusného kotouče:

$$B_b = \frac{2}{3} \cdot B + b = \frac{2}{3} \cdot 25 + 200 = 217 \text{ mm}$$

Podélná dráha brusného kotouče:

$$L = 0,08 \cdot l + l = 0,08 \cdot 200 + 200 = 216 \text{ mm}$$

Počet řezů:

$$i = \frac{z_h}{2 \cdot a_e} + 8 = \frac{0,02}{2 \cdot 0,008} + 8 = 10$$

Počet dvojdvihů za minutu:

$$n = \frac{v_w}{2 \cdot L} = \frac{15}{2 \cdot 0,2} = 37,5$$

Strojní čas:

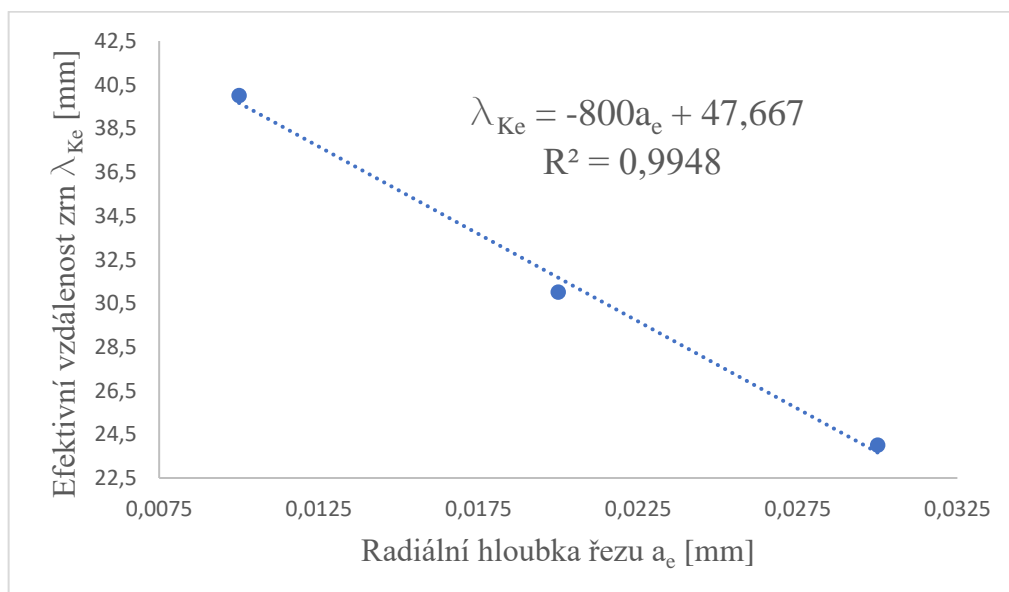
$$t_{AS} = \frac{B_b \cdot i}{f_a \cdot n} = \frac{217 \cdot 10}{7,5 \cdot 37,5} = 7,7 \text{ min}$$

Příloha č.6: Efektivní vzdálenost zrn pro výpočet ekvivalentní tloušťky broušení při hrubovací operaci.

Hodnoty efektivní vzdálenosti zrn pro různé hodnoty radiální hloubky řezu a pro různé zrnitosti, viz reference [19]:

Zrnitost	Radiální hloubka řezu a_e [mm]		
	0,01	0,02	0,03
60	33	23	15
80	40	31	24
100	48	38	30
120	53	44	37
150	56	48	40

Graf pro určení efektivní vzdálenosti zrn hrubovacích operací pro zrnitost 80 pomocí hloubky řezu. Data pro vykreslení závislosti byly použity v příloze č.3.

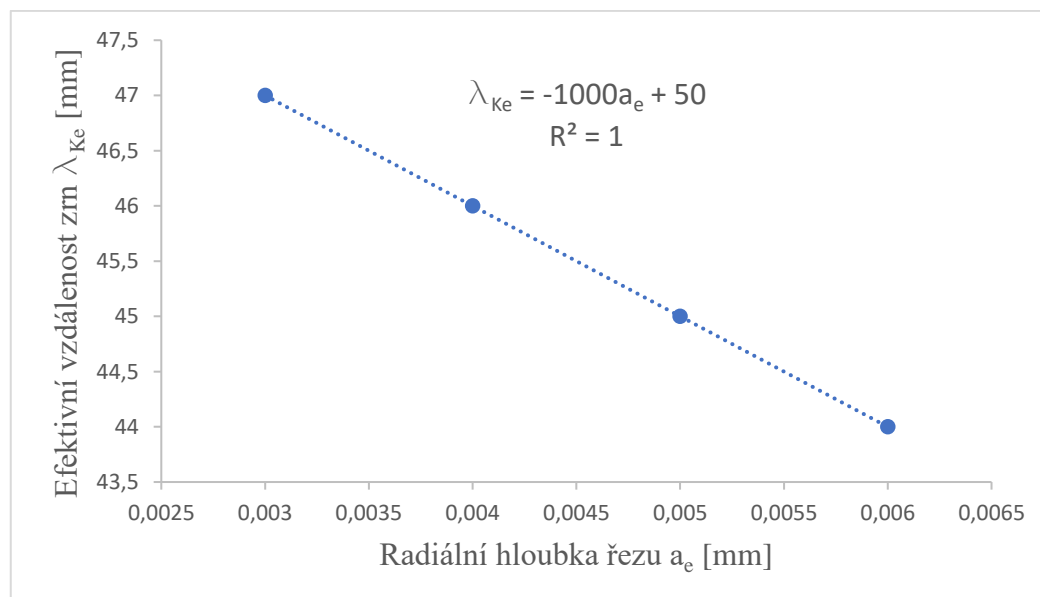


Příloha č.7: Efektivní vzdálenost zrn pro výpočet ekvivalentní tloušťky broušení při dokončovacích operacích.

Hodnoty efektivní vzdálenosti zrn pro různé hodnoty radiální hloubky řezu a pro různé zrnitosti, viz reference [19]:

Zrnitost	Radiální hloubka řezu a_e [mm]			
	0,003	0,004	0,005	0,006
60	39	38	37	36
80	47	46	45	44
100	54	53	52	51
120	60	59	58	57
150	64	63	62	61

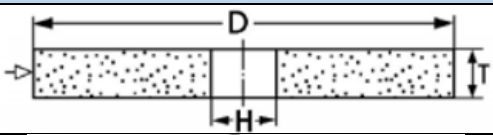
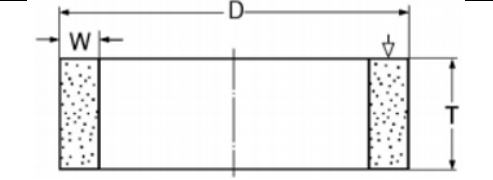
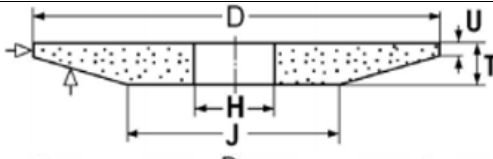
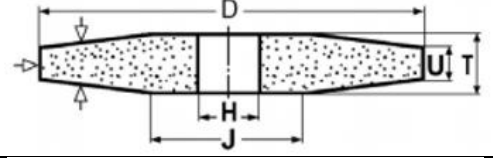
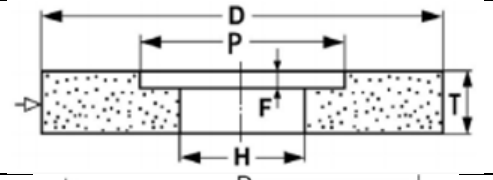
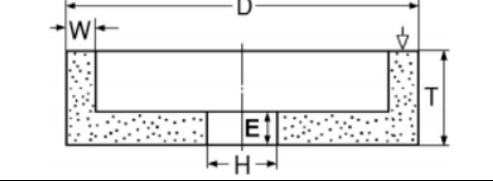
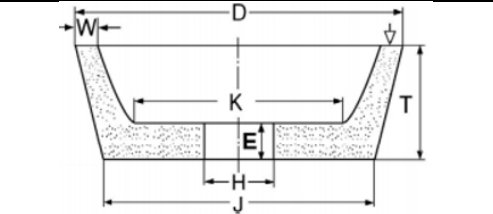
Graf pro určení efektivní vzdálenosti zrn dokončovacích operací pro zrnitost 80 pomocí hloubky řezu. Data pro vykreslení závislosti byly použity v příloze č.3 a č.5 pro výpočet ekvivalentní tloušťky broušení.



Příloha č.8: Tabulka značení materiálu zrn na brusných kotoučích firmy TYROLIT dle reference [12]

Značení brusiva	Popis brusiva
10A	Normální korund
50A	Směs 89A a 10A
52A	Polokřehký korund
80A	Směs 88A a speciálního korundu
87A	Směs 89A a 88A
88A	Růžový korund
89A	Bílý korund
91A	Rubínový korund
92A	Smě 89A a speciálního korundu
93A	Směs 89A a 91A
97A	Speciální korund
454A	Směs mikrokrystalického korundu a 89A
455A	Směs mikrokrystalického korundu a 89A
C	Zelený karbid křemíku
1C	Černý karbid křemíku
50C	Směs karbidu křemíku zelený/černý
B	CBN
D	Diamant

Příloha č.9: Tabulka značení vybraných tvarů a rozměrů brusných kotoučů z ČSN EN 12413 dle reference [18].

Typ	Zobrazení	Název, rozměry
1		Kotouče ploché D x T x H
2		Kotouče prstencové D x T x W
3		Kotouče kuželové D/J x T/U x H
4		Kotouče oboustranně kuželové D/J x T/U x H
5		Kotouče s jednostranným vybráním D x T x H-P, F
6		Kotouče hrncovité D x T x H-W, E
11		Kotouče miskovité D/J x T x H-W, E

Příloha č.10: Tabulka rozdělení řezné rychlosti dle barevného značení brusných kotoučů dle ČSN EN 12413 dle reference [10].

Řezná rychlost (m.s ⁻¹)	Označení
40	Bez pruhu
50	1 x modrý
63	1 x žlutý
80	1 x červený
100	1 x zelený
125	1 x modrý a žlutý
140	1 x modrý a červený
160	1 x modrý a zelený

Příloha č.11: Tabulka rozdělení rovinného, čelního broušení a broušení dokulata dle reference [15].

	Axiální	Tangenciální	Radiální
	Přímočarý Pohyb stolu		
Rovinné Broušení			
Čelní Broušení			
	Otáčivý Pohyb stolu		
Rovinné Broušení			
Čelní Broušení			
	Vnější Plochy		
Broušení do kulata			
	Vnitřní plochy		
Broušení do kulata			

Příloha č.12: Tabulka hodnot empirických konstant pro vybrané metody broušení dle reference [8].

Způsob broušení	k_{F_c}	x_{F_c}	y_{F_c}	z_{F_c}	v_{F_c}
Vnější rotační plochy	25	0,5	0,6	0,6	-
Vnitřní rotační plochy	2,5	0,4	0,4	0,5	0,3
Bezhraté broušení	2,5	0,6	0,6	0,7	0,5
Rovinné broušení obvodem kotouče	6	0,8	0,8	0,8	-