

Sem vložte zadání Vaší práce.

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A
METROLOGIE



Diplomová práce

Optimalizace bezhrotého broušení tepelně zpracovaných povrchů

Bc. Alexandr Kedra

Vedoucí práce: Ing. BcA. Jan Podaný, Ph.D.

29. července 2018

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu své diplomové práce Ing. BcA. Janu Podanému, Ph.D. a panu Ing. Petru Hamplovi, Ph.D., který mi pomohl s praktickou částí a současně zastupoval firmu KYB Manufacturing Czech s.r.o.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona, ve znění pozdějších předpisů, zejména skutečnost, že České vysoké učení technické v Praze má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

V Praze dne 29. července 2018

.....

Abstract

This thesis is focused on centerless grinding of heat treated surface optimization. The practical part was elaborated in cooperation with KYB Manufacturing Czech s.r.o. I optimized current process of front shock absorber piston rod centerless grinding. I applied three changes aiming to improve final surface quality and dimensions. The first change was process deceleration, second one was process acceleration and the last one was shortening of the grinding process.

Keywords Grinding, centerless grinding, heat treatment, piston rod, centerless grinding optimization

Abstrakt

Diplomová práce je zaměřená na optimalizaci procesu bezhrotého broušení tepelně zpracovaného povrchu. Vypracoval jsem ji ve spolupráci s firmou KYB Manufacturing Czech s.r.o.. Optimalizoval jsem aktuální stav broušení pístní tyče předního tlumiče osobního automobilu. Provedl jsem 3 změny procesu broušení pro zlepšení výsledné kvality povrchu a rozměrů. První změnou bylo zpomalení broušení, druhou zrychlení broušení a poslední zkrácení procesu broušení.

Klíčová slova Broušení, bezhroté broušení, tepelné zpracování, pístní tyč, optimalizace bezhrotého broušení

Obsah

Seznam použitých zkratk	6
Úvod	10
1 Technologie broušení	11
1.1 Broušení rotačních ploch	11
1.1.1 Bezhroté broušení	12
1.1.2 Broušení mezi hroty	15
1.1.3 Planetové broušení	17
1.2 Broušení rovinných ploch	18
1.2.1 Čelní broušení	18
1.2.2 Obvodové broušení	19
1.3 Broušení tvarových ploch	19
1.4 Broušící nástroje	20
1.4.1 Brusné kotouče	20
2 Tepelné zpracování a jeho vliv na bezhroté broušení	27
2.1 Rozdělení tepelného zpracování	27
2.2 Kalení, popouštění a žíhání	28
2.3 Indukční povrchové kalení	29
3 Specifikace výrobku - pístní tyče předního tlumiče	31
3.1 Materiál a výrobní výkres	32
3.2 Specifikace výrobku (rozměrová geometrie, tolerance, drsnost) .	34
3.3 Technologická specifikace výrobku	35
3.3.1 Postup výroby pístní tyče	35
3.3.2 Popis optimalizovaného výrobního procesu	38
4 Optimalizace výrobku (technologie)	40
4.1 Optimalizace výrobního času broušení	40

4.1.1	Postup měření	41
4.1.2	Faktory optimalizace	46
5	Vyhodnocení a návrh vylepšení bezhrotého broušení	47
5.1	Vyhodnocení bezhrotého broušení	47
5.2	Návrh vylepšení bezhrotého broušení	50
	Závěr	51
	Literatura	52

Seznam použitých zkratek

Ra = střední aritmetická úchylka profilu [μm]

Rz = největší výška nerovnostního profilu [μm]

δ_o = úhel řezu [$^\circ$]

α_o = úhel hřbetu [$^\circ$]

γ_o = úhel čela [$^\circ$]

$Rp_{0,2}$ = smluvní mez kluzu [MPa]

v_0 = teoretický výpočet osové rychlosti (průchozí) [$m \cdot \text{min}^{-1}$]

v_{pk} = obvodová rychlost podávacího kotouče [$m \cdot \text{min}^{-1}$]

α_{pk} = úhel sklonu osy podávacího kotouče [$^\circ$]

D_{pk} = průměr podávacího kotouče [m]

n_{pk} = otáčky podávacího kotouče [min^{-1}]

l = délka broušené pístoní tyče [m]

t_{ref} = čas broušení při referenční průchozí rychlosti [s]

t_{zr} = čas broušení při zrychlené průchozí rychlosti [s]

v_{ref} = referenční průchozí rychlost [$m \cdot \text{min}^{-1}$]

v_{zr} = zrychlená průchozí rychlost [$m \cdot \text{min}^{-1}$]

n_r = rozdíl počtu obroušených pístoních tyčí [$kusů$]

n_{ref} = počet vyrobených kusů při referenčních podmínkách broušení [$kusů$]

n_{zr} = počet vyrobených kusů při zrychlených podmínkách broušení [$kusů$]

Seznam obrázků

1.1	Broušení rotačních ploch [17]	12
1.2	Průběžné bezhroté broušení [3]	13
1.3	Rozklad rychlosti bezhrotého broušení [3]	14
1.4	Zapichovací broušení [9]	15
1.5	Axiální broušení mezi hroty [3]	16
1.6	Hluboké broušení [6]	16
1.7	Hroté zapichovací broušení [5]	17
1.8	Způsob planetového broušení [2]	18
1.9	Čelní broušení [3]	19
1.10	Obvodové broušení [3]	19
1.11	Řezné úhly zrn [4]	20
1.12	Opotřebením zrn a) korund před použitím b) po aplikaci [4]	21
1.13	Druhy opotřebením brousících zrn [7]	23
1.14	Příklad volby brusného kotouče [14]	24
1.15	Pórovitost kotoučů [3]	24
1.16	Rozklad označení brusného kotouče [23]	25
1.17	Nejběžnější tvary kotoučů [12]	26
2.1	Pásmo kalicích teplot [11]	28
2.2	Schéma indukčního ohřevu [8]	30
3.1	Příklad pístitních tyčí	31
3.2	Výrobní výkres pístitní tyče předního tlumiče	33
3.3	Tolerance přímosti [27]	34
3.4	Znázornění drsnosti Rz [10]	35
3.5	Bezhrotá bruska značky Junker, typ Jupiter 250	36
3.6	Stroj pro kalení a popouštění	37
3.7	Soustava tří brusek	38
3.8	Optické měřicí zařízení Marposs	39
4.1	Drsnoměr Hommel T1000	42

4.2	Měřicí deska pro drsnoměr	42
4.3	Přípravek pro měření pístití tyče	43
5.1	Graf vyhodnocení drsnosti Rz	48
5.2	Graf vyhodnocení přímosti	49

Seznam tabulek

1.1	Materiál brusiv [18][26]	21
1.2	Druh pojiv [18]	22
1.3	Označení tvrdosti kotoučů [18]	23
1.4	Označení pórovitosti kotouče [18]	25
3.1	Hodnoty materiálu písní tyče	32
3.2	Broušící stroje	39
4.1	Referenční hodnoty bezhrotého broušení	43
4.2	Hodnoty bezhrotého broušení při zpomalení průchozí rychlosti	44
4.3	Hodnoty bezhrotého broušení při zrychlení průchozí rychlosti	45
4.4	Hodnoty bezhrotého broušení při použití pouze 2 brusek	45
5.1	Hodnoty drsnosti Rz [μm] broušeného povrchu	47
5.2	Hodnoty přímosti v [μm] broušeného povrchu	49

Úvod

Technologie broušení patří mezi dokončovací operace, kde se pomocí mnohobřitého nástroje (kotouče) odebírá tenká vrstva materiálu. Tímto postupem se dosahuje velmi přesných rozměrů a nízké drsnosti povrchu. Broušení rozlišujeme podle tvaru broušené plochy na broušení rotačních, rovinných a tvarových ploch. Nezbytnou součástí procesu broušení je brusný kotouč. Ten se volí na základě požadovaných parametrů výsledného povrchu. Vliv na volbu kotouče má také materiál a povrchová úprava obrobku. Brusný kotouč je složen z brousících zrn, pórů a pojiva.

Clem mé práce bylo popsat technologii broušení a tepelné zpracování povrchu. V praktické části jsem měl za úkol popsat broušenou součást - pístní tyč a optimalizovat proces jejího bezhrotého broušení. Následně jsem měl vyhodnotit stávající stav broušení a navrhnout zlepšení tohoto procesu.

Tato diplomová práce je rozdělena do 5 kapitol. V prvních dvou kapitolách se věnuji teoretickému rozboru technologie broušení a povrchové úpravy. Práce dále pokračuje praktickou částí. Na té jsem pracoval ve spolupráci s firmou KYB Manufacturing Czech s.r.o. (KMCZ). Ve třetí kapitole specifikuji výrobek - pístní tyč předního tlumiče osobního automobilu. V kapitole čtvrté optimalizuji proces bezhrotého broušení tohoto výrobku. V poslední, páté kapitole vyhodnocuji výsledky optimalizace.

Technologie broušení

Technologie broušení je nejrozšířenější dokončovací operace, u které se odebrává tenká vrstva materiálu za účinků mnohobřitého nástroje s odlišnou geometrií jednotlivých břitů. Je vhodná i pro velké plochy při čelním broušení. Broušením lze dosáhnout přesných rozměrů, především u rovinnosti, válcovitosti a drsnosti povrchu (R_a 1,6 až $0,2 \mu\text{m}$). V některých případech je to nejvhodnější nebo i jediná technologie, kterou se dá materiál obrobit a zároveň dosáhnout požadované přesnosti. Např. kalená ocel, nástrojové materiály, slinutý karbid, nekovové materiály. Výhodou broušení je samoostření nástroje. K samoostření dochází při otupení zrna (nárůst sil na zrno), následně se zrno uvolní a následuje nové zrno.

Broušení se dá přirovnat k frézování, ale na rozdíl od frézování dosahujeme lepších výsledků konečných parametrů. Je to především díky schopnosti odebrat tenčí vrstvu materiálu a vyšším řezným rychlostem. U frézování je tloušťka vrstvy v řádech mm, u broušení jsou to μm . [1] [2]

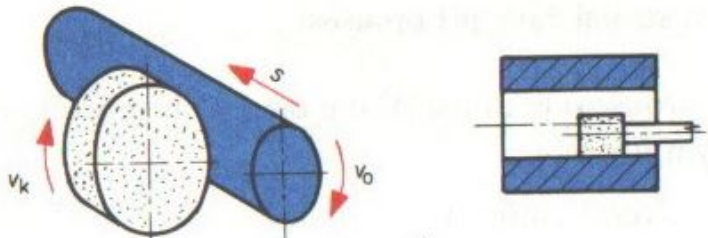
Výhody technologie broušení

- přesnost geometrických tvarů
- drsnost povrchu (až R_a $0,2 \mu\text{m}$)
- možnost obrobit složitě obrobitelné materiály (kalená ocel, nástrojové materiály atd.)
- lze obrobit velké plochy
- vysoká řezná rychlost

1.1 Broušení rotačních ploch

Broušení rotačních ploch neboli broušení dokulata se dá rozdělit na broušení vnějších a vnitřních ploch. Pro broušení se používá brusný kotouč. Kotouč

i obrobek vykonává rotační pohyb, každý jinou obvodovou rychlostí. Tento způsob broušení je vhodný na broušení rotačních součástí, jako jsou hřídele, pístní tyče a jiné (hladké i tvarové).[17]



Obrázek 1.1: Broušení rotačních ploch [17]

1.1.1 Bezhruté broušení

Bezhruté broušení je vysoce efektivní, jedná-li se o sériovou či hromadnou výrobu, u které je zapotřebí broušení rotačních ploch (válců, kuželů, tvarových ploch). U této technologie se dosahuje krátkých výrobních časů, jelikož se brousí nepřetržitě. Není zapotřebí výroba středících důlků, jak tomu je u hrotového broušení. Tyto výhody dělají z bezhrutého broušení efektivní a ekonomicky výhodný způsob broušení. Mezi výhody bezhrutého broušení patří nepřetržitý chod, není nutnost obrobek upínat, obrobek se neprohýbá a přídavky mohou být velice malé (v některých případech jen snížen R_z). Rozlišujeme tři způsoby bezhrutého broušení a to broušení zapichovací, průběžné a podélné. [1] [15]

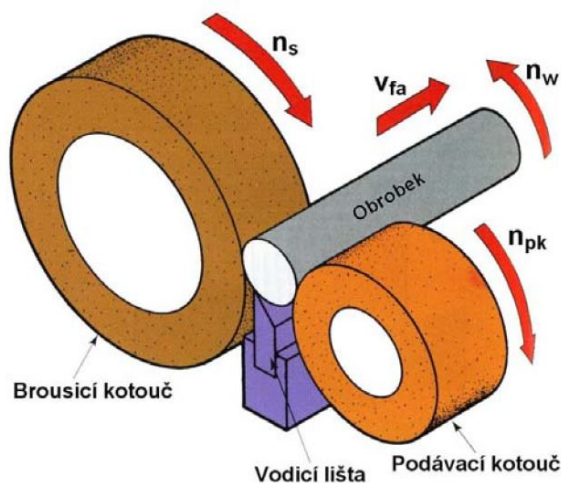
Způsoby bezhrutého broušení

- zapichovací
- průběžný
- podélný

Princip průběžného bezhrutého broušení

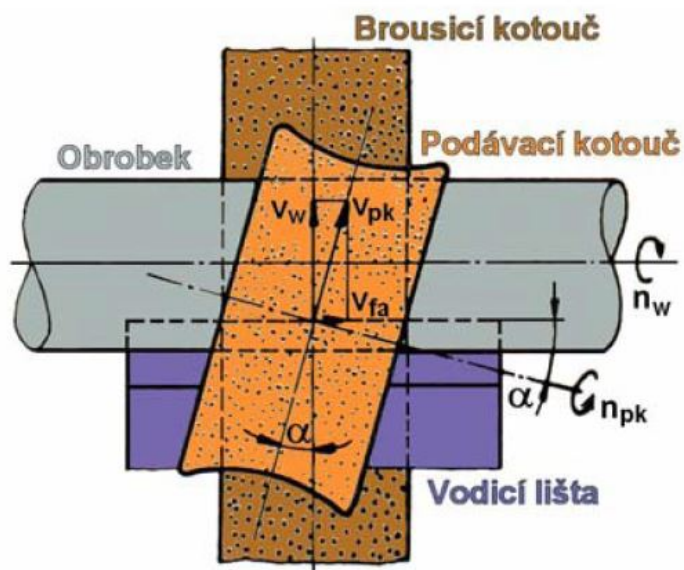
U toho způsobu se brousí pouze válcovité konstantní průměry. Při použití automatizovaného nakládání a vykládání obrobku je možné brousit kontinuálně. Je vhodný na broušení trubek, pístních tyčí atd.

Průběžné bezhruté broušení je tvořeno brusným kotoučem, podávacím kotoučem a vodicí lištou (pravítkem) tento princip je znázorněn na obrázku 1.2. [3]



Obrázek 1.2: Průběžné bezhroté broušení [3]

Obrobek prochází mezi podávacím kotoučem a brousícím kotoučem. Kotouče mají osy ve stejné výšce. Poměr velikosti těchto kotoučů je 1:2, kdy brousící je větší než podávací. Zároveň, aby docházelo k správnému posuvu obrobku, je potřeba, aby podávací kotouč nebyl rovný. Jeho kontaktní plocha musí mít tvar paraboloidu, jak je vidět na obrázku 1.3. Další součástí je vodící lišta, o kterou se obrobek opírá a zároveň ho lišta drží 10 - 30 mm nad osami brousícího a podávacího kotouče. Pohyb obrobku je zapříčiněn vykloněním osy podávacího kotouče o α , který se pohybuje v rozmezí 1° až 6° . Čím je α vyšší, tím je i vyšší rychlost obrobku. Pokud by α bylo 0° , jednalo by se o zapichovací broušení. Následkem vyosení podávacího kotouče se obvodová rychlost v_{pk} rozkládá na dvě, svislou v_w a vodorovnou v_{fa} . Vodorovná zajišťuje axiální pohyb obrobku a svislá s obrobkem otáčí, viz obrázek 1.3. [3] [15]



Obrázek 1.3: Rozklad rychlosti bezhrotého broušení [3]

Výhody průchozího bezhrotého broušení

- hrubování a konečné broušení (v požadované kvalitě povrchu) na jednu operaci
- lze dosáhnout vysokých geometrických přesností
- vysoká produktivita práce
- možnost automatizace výroby

Princip zapichovacího bezhrotého broušení

Zapichovací způsob broušení se využívá na broušení geometricky složitých obrobků. Lze ho použít na broušení několika průměrů a parametrů najednou. Používá se na broušení hřídel, segmentů do ložisek, čepů atd.

Princip zapichovacího broušení spočívá v přibližování brusného kotouče. Přibližuje se plynulým pohybem k obrobku, a to po každé otáčce obrobku. Rychlost přibližování se volí v rozmezí 0,02 - 0,002 mm/otáčku. Čím vyšší je obvodová rychlost obrobku, tím pomaleji se brusný kotouč přisouvá. Mezi nevýhody tohoto způsobu patří vysoká vztyčná plocha při broušení, která způsobuje ohřívání jak obrobku tak kotouče. Také tento způsob není stejně efektivní jako průběžné broušení, protože se musí obrobek vkládat do brusky jednotlivě. Výhodou je možnost brousit tvarově náročné plochy s velkou přesností. [17]



Obrázek 1.4: Zapichovací broušení [9]

1.1.2 Broušení mezi hroty

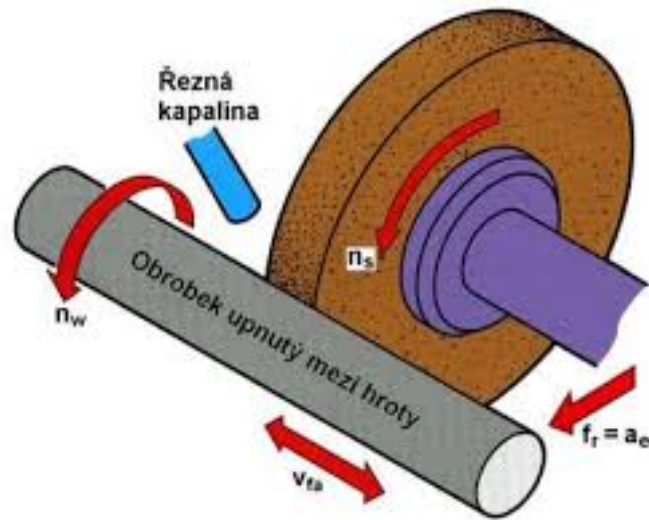
Broušení mezi hroty se využívá na broušení vnějších válcových a kuželových ploch. Hlavní řezný pohyb vykonává brusný kotouč (rotační), obrobek vykonává rotační pohyb a v některých případech i posuvný pohyb. Základní způsoby upnutí obrobku jsou do sklíčidla, mezi hroty, rýhovaným unašečem, pomocí trnů a do kleštiny. Pokud je obrobek příliš dlouhý, musí se podepřít (lunetou), aby nedošlo k prohnutí. Broušení mezi hroty můžeme rozdělit na tři způsoby, a to broušení axiální, hloubkové a zapichovací broušení.

Způsoby broušení mezi hroty

- axiální broušení
- hloubkové broušení
- zapichovací broušení

Axiální broušení

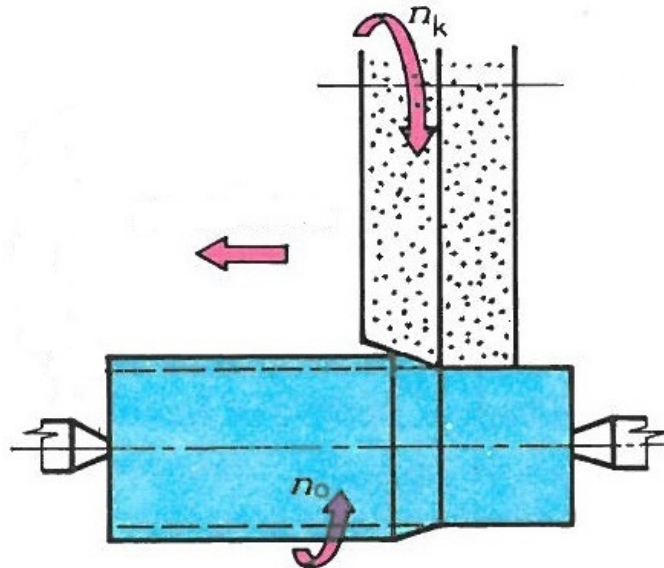
Axiální způsob broušení je vhodný na broušení dlouhých rotačních nebo kuželových obrobků a zároveň tam, kde je brousící kotouč užší než broušená součást. Díky tomu se dobře odvádí obrobený materiál a nedochází k velkému zahřívání. Obrobek koná jak rotační tak i posuvný neboli podélný pohyb. Nejběžnější upnutí při tomto způsobu bývá upnutí mezi hroty. V některých případech musí být podepřeny lunetou, aby nedocházelo k prohýbání. [3]



Obrázek 1.5: Axiální broušení mezi hroty [3]

Hlubkové broušení

Hlubkové broušení je používáno jako konečné broušení. Broušení je prováděno na jeden podélný zdvih. Díky tomu je úspora strojního času v rozmezí 30 % až 70 % vůči axiálnímu způsobu. Brusný kotouč má náběhovou hranu zbroušenou pod úhlem 2° nebo stupňovitě, aby se ubíraná hrana odebírala postupně. [6]

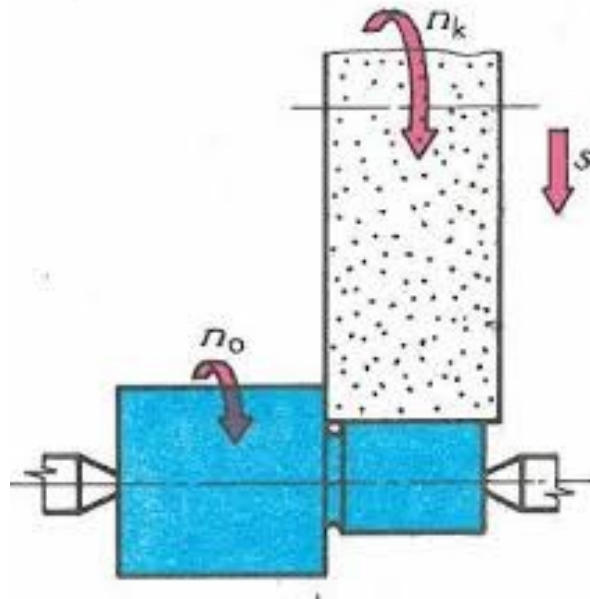


Obrázek 1.6: Hluboké broušení [6]

Zapichovací broušení

Jedná se o nejvýkonnější způsob broušení mezi hroty. Princip zapichovacího hrotého broušení spočívá v broušení celé délky najednou. Proto je důležité a nutné, aby obrobek byl dostatečně tuhý. Brousící kotouč je širší než je broušená plocha. U většiny případů je maximální délka broušené plochy 350 mm.

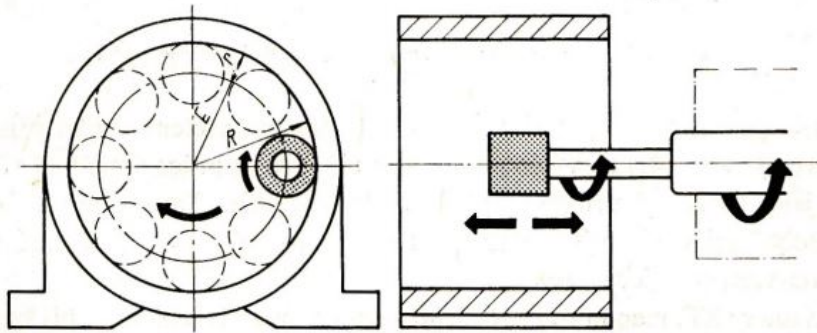
Používá se při sériové a hromadné výrobě. Je vhodný i na broušení tvarových ploch a čel. [5]



Obrázek 1.7: Hroté zapichovací broušení [5]

1.1.3 Planetové broušení

Planetový způsob broušení se využívá pro broušení vnitřních ploch u velkých nebo těžkých obrobků, jelikož se nedají upnout do unášejícího vřeteníku. U tohoto způsobu broušení obrobek stojí, viz obrázek 1.8. Jak je vidět na obrázku, brusný nástroj se otáčí kolem své osy a zároveň se točí kolem osy broušeného otvoru. [2]



Obrázek 1.8: Způsob planetového broušení [2]

1.2 Broušení rovinných ploch

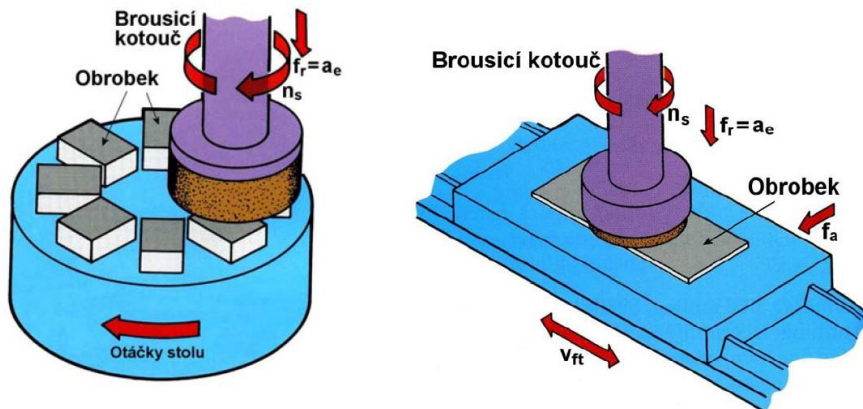
Broušení rovinných ploch je spíše dokončovací operace k docílení kvalitního výsledného povrchu. Používá se k broušení rovinných ploch, úkosů a atypických tvarů. Má vysokou výkonnost. K upínání obrobku se nejčastěji používá elektromagnetických upínačů, svěráků, upínek atd. Důležité je, aby materiál byl správně uložen, aby se dalo dosáhnout požadovaných geometrických přesností. Broušení rovinných ploch se dělí na 2 způsoby, a to broušení čelní a broušení obvodové. [3]

Způsoby rovinného broušení

- čelní broušení
- obvodové broušení

1.2.1 Čelní broušení

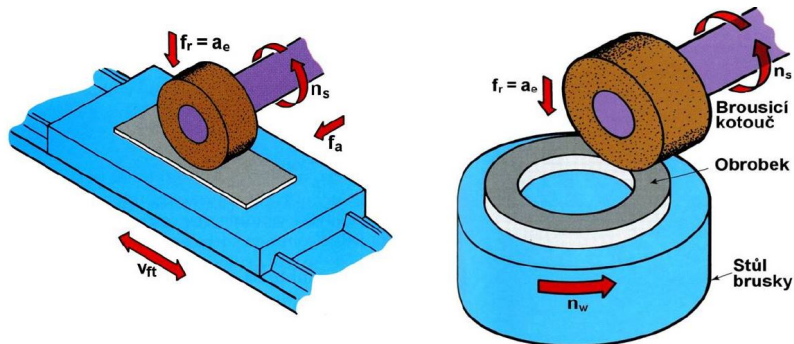
Pohyb brousícího kotouče je přímočarý nebo otáčivý. Z těchto dvou způsobů je čelní broušení méně přesné, avšak výkonnější. Často bývá brousící kotouč širší než je broušený obrobek. Při broušení velkých ploch se využívá segmentové hlavy. Mezi výhody segmentových hlav patří lepší využití brousícího materiálu, lepší odvod třísky, jednodušší doprava řezné kapaliny a nižší styčná plocha (nižší zahřívání). Pro nižší styčnou plochu se dá vřeten brusky sklonit až o 3° , ale sklonění vřetena se dá použít pouze při hrubování. [3]



Obrázek 1.9: Čelní broušení [3]

1.2.2 Obvodové broušení

Při obvodovém broušení obrobek koná přímočarý nebo točivý pohyb. Jedná se o přesné rovinné broušení. Používá se k broušení nástrojů, měřidel, přípravků atd.



Obrázek 1.10: Obvodové broušení [3]

1.3 Broušení tvarových ploch

V některých případech je potřeba obrousit tvarové plochy např. frézy, vrtáky, šablony, závity, ozubená kola atd. Broušení je prováděno profilovými kotouči nebo kotouči s běžným tvarem, ale s kopírovacím zařízením brusky.

Pro tvarové broušení se používají jednoduché nebo speciálně upravené (kopírovací) hrotové brusky, dále brusky bezhroté, rovinné brusky s vodorovným vřetenem, speciální brusky a CNC brusky.

1.4 Brousicí nástroje

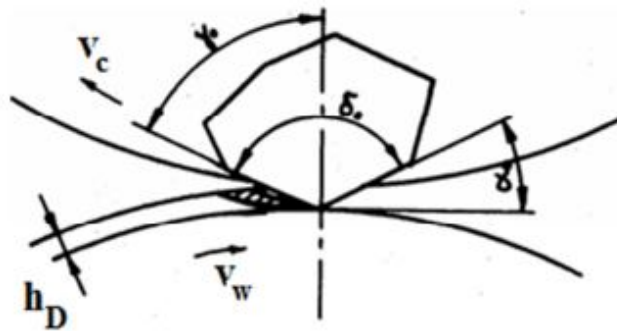
Brousicí nástroje jsou složeny z brousicích zrn, pojiva a pórů. Zrna tvoří řezné klíny. Pojivo spojuje zrna a drží je po hromadě v daném tvaru. Póry tvoří zubovou mezeru, kde se hromadí tříška. Nejčastějším tvarem brousicích nástrojů jsou kotouče. Brousicí nástroje dělíme podle designu na: [16] [18]

- kotouče (nejpoužívanější)
- segmenty
- kameny

1.4.1 Brusné kotouče

Řezný kotouč u broušení je složen z tvrdých zrn brusiva. Hlavními parametry u řezných kotoučů je druh a zrnitost brusného materiálu, pojivo, tvrdost nástroje a jeho struktura. Každý tento parametr se volí podle druhu aplikace (hrubé broušení, jemné broušení, broušený materiál).

Brousicí zrna musí být tvrdší než je broušený materiál. Zrna jsou tvrdá, houževnatá a ostrohranná s maximální velikostí 5mm. Každá hrana představuje břit. Pro jeho různý tvar nejde přesně určit řezný úhel zrn, lze pouze určit jeho rozmezí. Úhel řezu δ_o je vždy větší než 90° , úhel hřbetu $\alpha_o = 5$ až 20° , úhel čela $\gamma_o = -30$ až -60° je záporný, viz obrázek 1.11. [3] [4]

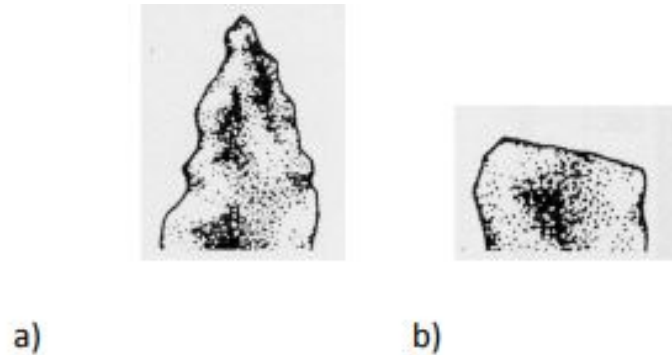


Obrázek 1.11: Řezné úhly zrn [4]

Materiál brusných kotoučů

Brusný kotouč se skládá z brusných zrn. Ideálně by si zrno mělo udržovat svou ostrost a mít postupný úbytek, viz obrázek 1.12. Jednotlivé druhy brusiv mají svou charakteristickou strukturu, která umožňuje jejich dělení. Faktory, které ovlivňují volbu brousicích materiálů jsou tvar zrna, mikrostruktura zrna, křehkost zrna (kapacita sebeostření) a tvrdost zrna. Brusné materiály se dle

výroby rozdělují na přírodní nebo syntetické. Pro broušící kotouče se používá výhradně syntetické brusivo, nejběžnější je Al_2O_3 (syntetický korund). [4]



Obrázek 1.12: Opotřebení zrn a) korund před použitím b) po aplikaci [4]

Přírodní brusiva jsou to nerosty (horniny a minerály), které se hodí na aplikaci broušení. Přírodní brusiva nedosahují takové tvrdosti a houževnatosti jako syntetická brusiva. Jedinou výjimkou je diamant.

Využívají se pouze, když syntetická brusiva nejsou vhodná na použití nebo když je toto řešení finančně výhodnější.

Syntetická brusiva jsou používanější než přírodní. Mají chemickou čistotu, jejich kvalita se dá lépe standardizovat. Hlavní výhodou je cena a jejich dostupnost. [18]

Tabulka 1.1: Materiál brusiv [18][26]

Přírodní	Označení	
granát	G	
smirek	S	
pazourek	P	
Syntetická	Označení	Použití
korund(Al_2O_3)	99A,	ocel – kalená, legovaná, litina, bronz
	98A,	tvrdé a měkké oceli, šedá litina
	97A,	ocel kalená, tvrdé povrchy včetně zušlechťených
	96A,	nízkolegovaná ocel, ocel na odlitky, temperovaná litina
karbid křemíku (<i>Sic</i>)	49C	bronz, hliník, slinuté karbidy, nástrojové oceli
	48C	šedá a bílá litina, mosaz, měď
kubický nitrid boru	BN	vysocelegované, nástrojové oceli, šedá a bílá litina
polykrystalický diamant	D	slinuté karbidy, nástrojové oceli, sklo, keramika

Pojivo

Soudržnost brousicích zrn pohromadě zajišťuje pojivo. Není to však jediná vlastnost pojiva. Mezi další funkce pojiva patří odolávání odstředivým silám (především u vysokorychlostního broušení), vlivům teploty a chladicí kapaliny. Pojivo se musí určovat podle aplikace aby docházelo k samoostření brousicího kotouče. Pojiva mohou být organická nebo anorganická. [16] [18]

Tabulka 1.2: Druh pojiv [18]

Druh pojiva	Označení	Druh pojiva	Označení
Organická		Anorganická	
šelak	E	keramické	V
pryžové	R	silikonové	S
syntetická pryskyřice	B	magnezitové	O
klíh	G	kovové	

Hlavními materiály, z kterých se keramické pojivo skládá, jsou živec, kaolin, mastek. Je to nejvíce využívané pojivo. Jeho výhodou je univerzálnost, netečnost vůči kapalinám a chemickým látkám, velká pórovitost, možnost odstupňování tvrdosti. Nevýhodou je jeho křehkost, nesnese velké nárazy (musí se s ním pracovat opatrně). Kotouče s keramickým pojivem se mohou používat až do rychlostech 50 ms^{-1} . Silikátové pojivo je směs živce, kaolinu, plavené křídly a vodního skla. Výhodami tohoto pojiva je jeho pružnost, dobře uvolňuje částice brusiva, odolává vodě. Je vhodné na aplikaci velké stykové plochy. Magnezitové pojivo se skládá z uhličitanu hořečnatého, chloridu hořečnatého a vody. Výhody tohoto pojiva jsou v jeho konstantní tvrdost, díky tomu se dá vyrábět až do $\phi 2$ m. Nesnáší vlhkost, proto se může používat bez použití chladicí kapaliny (z toho důvodu je málo využíváno). Syntetická pryskyřice je pojivo, které má univerzální použití. Skládá se z fenolu a formaldehydu, může být doplněno vlákny (bavlna, plátno, plast). Výhodou je odolnost vůči nárazům, při vyztužení vlákny se jeho výkonnost zvýší. Je vhodné na hrubé broušení. Šelak je přírodní pryskyřice. Při vyšších teplotách měkne a lepí. Používá se pro výrobu tenkých kotoučů. Pryžové pojivo je složeno z přírodního kaučuku. Toto pojivo lze využít při vysokých obvodových rychlostech. Zejména pro aplikaci broušení-leštění. Kovové pojivo se využívá při použití diamantových brousicích zrn. [16][18]

Zrnitost

Zrnitost má největší vliv na konečnou kvalitu (drsnost) povrchu. Proto se zrnitost kotouče volí podle požadované konečné kvality broušené součásti. Čím je požadovaná kvalita povrchu vyšší, tím jemnější kotouč musí být použit. Pro hrubé broušení a měkké materiály (měď, hliník, mosaz) se používají kotouče s hrubší zrnitostí.

Zrnitost se udává číslem. Toto číslo udává kolik zrněk brusiva projde oky síta při třídění na velikost jednoho čtverečného palce. Zrnitost se pohybuje od 4 do 1200. [18]

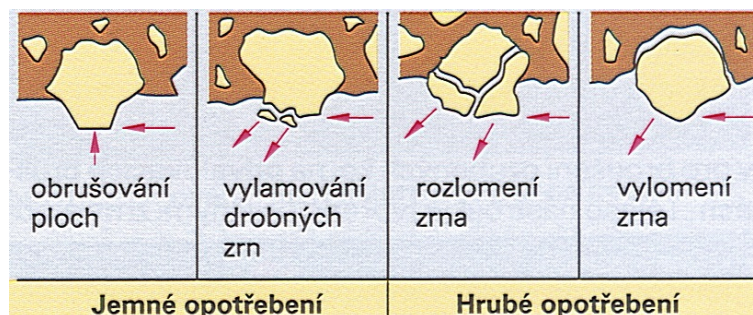
Tvrдость brusných kotoučů

Tvrдость brusných kotoučů je dána odporem brusných zrn vůči vylomení z nástroje (z pojiva). Tvrдость definuje houževnatost a pružnost pojiva mezi jednotlivými zrny brusiva. Měkké kotouče mají nižší soudržnost než tvrdší. Tvrдость se označuje písmeny, viz tabulka 1.3. [18]

Tabulka 1.3: Označení tvrdosti kotoučů [18]

Tvrдость kotouče	Označení
velmi měkký	E,G,H
měkký	H,I,J,K
střední	L,M,N,O
tvrdý	P,Q,R,S
velmi tvrdý	T,U,V
zvlášť tvrdý	X,Y,Z

Tvrдость kotouče má vliv na samoostření brusných kotoučů. Pokud je tvrдость zvolena moc vysoká, nedojde po otupení k vylomení zrna brusiva a musí se kotouč orovnávat. Na obrázku 1.13 jsou znázorněny různé druhy opotřebení zrn. Kdyby byl zvolen moc měkký kotouč, zůstává stále ostrý, ale rychleji se opotřebuje. Pokud je tvrдость vhodně zvolena dochází k samoostření nástroje. [7]



Obrázek 1.13: Druhy opotřebení brousicích zrn [7]

Tvrдость materiálu se volí podle charakteru broušeného materiálu (měkký, tvrdý) a podle způsobu broušení. Příklady volby použití jsou na obrázku 1.14. [14]

VÝBĚR TVRDOSTI KOTOUČŮ																
E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
					BROUŠENÍ NA KULATO/BEZHROTÉ BROUŠENÍ											
BROUŠENÍ NA PLOCHO					VNITŘNÍ BROUŠENÍ											
				BROUŠENÍ NÁSTROJŮ												
					BROUŠENÍ ZÁVITŮ											
NEVYZTUŽENÉ ORGANICKÉ ŘEZACÍ KOTOUČE																
											VYZTUŽENÉ ORGANICKÉ ŘEZACÍ KOTOUČE					

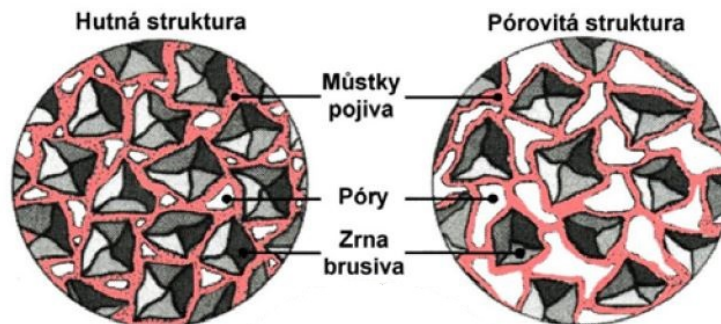
Obrázek 1.14: Příklad volby brusného kotouče [14]

Sloh - pórovitost

Pórovitost kotoučů není náhodně vytvořena. Pórovitost se určuje jako objemový podíl brusných zrn, pojiva a pórů. Velikost a rozmístění pórů je vidět na obrázku 1.15. Množství a velikost pórů má vliv na brusný nástroj. U velké pórovitosti působí kotouč jako hrubozrnnější. Při velké pórovitosti se musí používat jemnější zrnitost brusiva.

Velké póry tvoří prostor pro odvod třísky a možnost chlazení jak kotouče tak broušeného obrobku. Zároveň má kotouč nižší hmotnost, tím pádem jednodušší vyvážení. [3]

Pórovitost se označuje číslicemi 1-15, viz tabulka 1.4



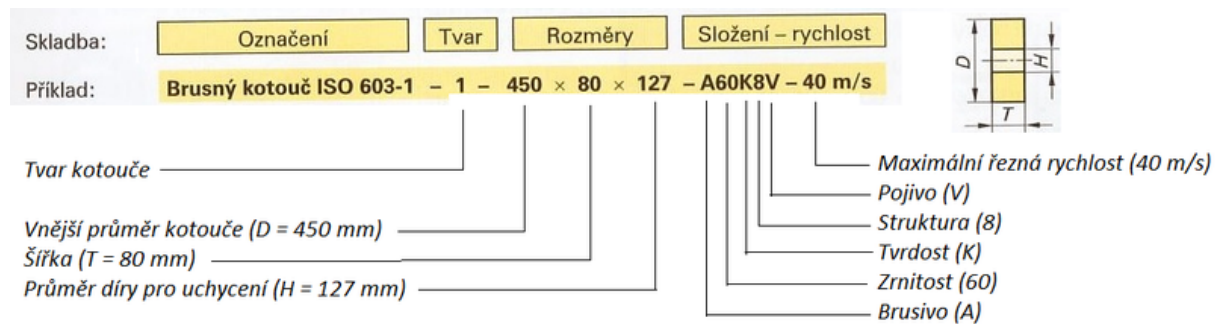
Obrázek 1.15: Pórovitost kotoučů [3]

Tabulka 1.4: Označení pórovitosti kotouče [18]

Pórovitost kotouče	Označení
Velmi hutný	1-2
Hutný	3-4
Polohutný	5-6
Pórovitý	7-8
Velmi pórovitý	9-10
Zvlášť pórovitý	11-13

Příklad označení kotouče

Na každém kotouči se nachází štítek, který obsahuje jeho základní parametry, jako je jeho tvar, velikost a technické parametry. Tyto parametry jsem již popsal. Na obrázku 1.16 je příklad, jak by štítek měl vypadat.



Obrázek 1.16: Rozklad označení brusného kotouče [23]

Tvar brusných kotoučů

Tvar kotoučů jsou dány normou ČSN 2245xx. Nejběžnější tvary jsou na obrázku 1.17.

Typ	Vyobrazení	Název, základní rozměry
1		Kotouče ploché D x T x H (Carborundum , FAG)
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

Obrázek 1.17: Nejběžnější tvary kotoučů [12]

Tepelné zpracování a jeho vliv na bezhroté broušení

Ve firmě KMCZ se provádí povrchové kalení a následné popouštění. Kalení je jako bezpečnostní prvek. Tepelné zpracování má vliv na výslednou povrchovou tvrdost, která musí být minimální HRA 71.

Na kalenou ocel se musí používat tvrdé brusné kotouče. Běžně využívaným brusným materiálem je syntetický korund. Při procesu broušení všeobecně vzniká vysoké teplo. Při broušení kaleného povrchu se musí dát pozor na vzniklé teplo a aby nedošlo k přílišnému ohřevu a následné ztrátě tvrdosti. Proto se musí vhodně zvolit velikost odebírané třísky a především chladit broušený povrch.

2.1 Rozdělení tepelného zpracování

Tepelné zpracování kovů je proces, při kterém dochází k řízenému ohřevu a následnému ochlazení materiálu. Účelem tepelného zpracování je získání požadovaných mechanických a technologických parametrů.

U všech kovových materiálů je tepelné zpracování téměř shodné. Nejprve dochází k ohřevu materiálu na danou teplotu, výdrž na této teplotě a následné ochlazení. Tepelné zpracování lze rozdělit podle rychlosti ohřevu a ochlazení, výšky ohřevu nebo výdrží na dané teplotě, a to na kalení, popouštění a žíhání. [19] [21]

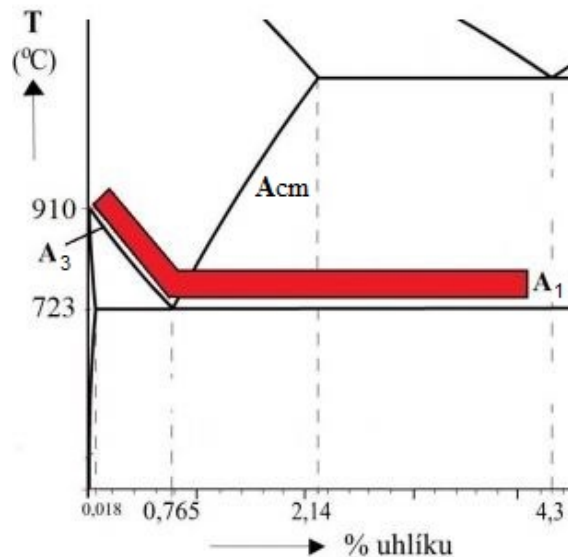
- Kalení
- Popouštění
- Žíhání

2.2 Kalení, popouštění a žhání

Kalením oceli se získává větší tvrdost a pevnost materiálu. Při kalení dochází ke vzniku martenzitické nebo bainitické struktury. Proto abychom mohli ocel kalit, musí obsahovat nejméně 0,3 % uhlíku. Při nižším obsahu uhlíku vznikne malé množství martenzitu, který nemá velký vliv na tvrdost.

Při martenzitickém kalení vzniká martenzitická struktura. Tato struktura je velmi tvrdá, ale zároveň velice křehká. Naopak při bainitickém kalení vzniká bainitická struktura, která má nižší tvrdost, ale má dostatečnou houževnatost. Proto nemusí po bainitickém kalení proběhnout popouštění.

Postup kalení je složen z ohřevu následné výdrži a prudkém ochlazení. Kalcí teplota pro podeutektoidní ocel je 30 - 50 °C nad teplotu A_3 a pro nadeutektoidní ocel je to pásmo 30 - 50 °C nad teplotu A_1 , jak je znázorněné na obrázku 2.1.[11] [21]



Obrázek 2.1: Pásmo kalicích teplot [11]

Rychlost ochlazování musí být dostatečně rychlá, aby došlo k přeměně austenitu na martenzit. Tato rychlá změna teploty má vliv na vznik pnutí jak na povrchu tak i v oceli. Obecně platí, že čím nižší obsah uhlíku ocel má, tím vyšší rychlost ochlazování by měla být. Naopak legované oceli se musí chladit pomalu, jelikož legující prvky špatně vedou teplo. Pokud by byla ocel rychle ochlazována mohla by dojít k praskání oceli. Ochlazování se může provádět do vody, oleje, solné lázně a u některých ocelí postačí i vzduch. Ocelím, které se mohou ochlazovat na vzduchu, se říká samokalitelné a jsou to například rychlořezné oceli.

Popouštění oceli se aplikuje z důvodu snížení křehkosti zakalené oceli, ale zároveň dochází k snížení tvrdosti. Provádí se pouze po martenzitickém kalení. Při popouštění dochází k částečné přeměně struktury. Popouštěcí teplota je v rozmezí 150 - 400 °C.

Při popouštění do 180 °C dochází ke změně tetragonálního martenzitu na kubický martenzit. Tvrdost zůstává téměř shodná, ale křehkost se snižuje výrazně. Při popouštění v teplotách 180 - 300 °C dochází ke změně zbytkového austenitu na bainit. Zde je křehkost snížena výrazněji než u první možnosti, ale zároveň i pokles tvrdosti je vyšší. Při popouštění v rozmezí teplot 300 - 400 °C dochází k rozpadu martenzitu na feritickou strukturu a globulární cementit. Tvrdost i křehkost se výrazně snižují.

Žihání se používá po tepelném nebo mechanickém zpracování. Snaží se tím dosáhnout rovnovážného stavu materiálu. Pro dosažení toho stavu se materiál pomalu a dlouho zahřívá a následné ochlazování se také provádí pomalu. Podle teploty, na kterou se materiál zahřívá lze žihání rozdělit na žihání bez překrytality a s překrytality. Teploty bez překrytality nepřesáhnou teplotu A_1 a patří sem žihání k odstranění pnutí, rekrystalizační a na měkko. Teploty u překrytality jsou nad teplotou A_1 patří sem normalizační, izotermické a homogenizační žihání.

Žihání na odstranění pnutí se provádí pro snížení pnutí v materiálu. Teplota ohřevu je mezi 500 - 650 °C. Ohřevem se sníží mez kluzu materiálu, díky tomu vznikne místní plastická deformace krystalů a tím dojde k jejich uvolnění. Rekrystalizační žihání se používá pro obnovení tvárnosti. Teplota ohřevu je v rozmezí 550 - 700 °C. Ohřevem je urychlena difuze, díky které se zrna spojují a dochází k obnovení tvárnosti. Žihání na měkko se provádí pro zlepšení obrobitelnosti materiálu. Provádí se při teplotách 680 - 700 °C, výjimkou jsou nadeutektoidní oceli u nichž se teplota žihání dostává nad teplotu A_1 , ale před startem překrytality se materiál ochladí pod tuto teplotu. Nejčastěji se používá normalizační žihání. Většinou je používáno pro podeutektoidní oceli. Při překrytality feritu a perlitu na austenit dojde k zjemnění zrna. Teplota se pohybuje v pásu 30 - 50 °C nad teplotou A_3 a A_{cm} . Izotermické žihání má podobný vliv na materiál jako normalizační. Výhodou je kratší doba procesu, ale je složitější. Pásmo teplot je na dolní hranici normalizačního žihání. Homogenizační žihání se používá pro velké odlitky, u kterých došlo k segregaci uhlíku. Teplota žihání je v rozmezí 1000 - 1250 °C. [21] [22]

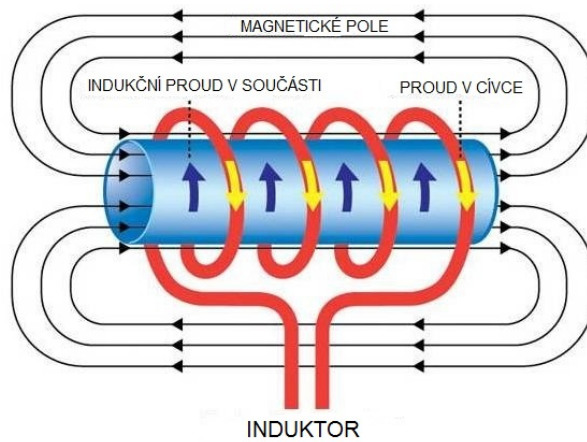
2.3 Indukční povrchové kalení

Kalená povrchová vrstva polotovaru se ohřívá indukovanými proudy se střední nebo vysokou frekvencí (15 - 500 kHz) za účinků induktoru. Induktorem prochází střídavý proud a pokud je vložený předmět vodivý, vzniká magnetické pole a Foucaultovy vířivé proudy. Tyto proudy ohřívají povrch součásti. Schéma indukčního ohřevu je na obrázku 2.2. Pro co nejefektivnější ohřátí má

induktor tvar kalené součásti.

Tloušťka zakalené vrstvy se pohybuje v rozmezí 1 - 6 mm. Čím je vyšší frekvence střídavého proudu, tím tenčí je zakalená vrstva. Pro povrchové kalení se používají dobře kalitelné oceli s obsahem 0,45 - 0,6 % uhlíku.

Indukční kalení může být přetržité, ohřev celé součásti a následné zakalení nebo nepřetržité, kde kalení probíhá přímo za induktorem. Indukční povrchové kalení je vhodné aplikovat u menších součástí nebo u sériové výroby. U hromadné výroby se dá plně automatizovat. Na základě toho je to nej Hospodárnější způsob kalení, i když pořizovací náklady jsou vysoké. [8][20]



Obrázek 2.2: Schéma indukčního ohřevu [8]

Specifikace výrobku - pístní tyče předního tlumiče

Firma KMCZ patří mezi přední výrobce tlumičů do osobních automobilů v Evropě. Každoročně vyrobí přes milion kusů. V této práci se věnuji optimalizaci bezhrotého broušení jednoho z hlavních komponentů tlumiče - pístní tyče. Příklad pístních tyčí, vyrobených v KMCZ, jsou zobrazeny na obrázku 3.1. Tyto pístní tyče jsou součástí předního tlumiče a vyrábějí se v průměrech 18, 20 a 22 mm při délkách od 350 až 450 mm.



Obrázek 3.1: Příklad pístních tyčí

3.1 Materiál a výrobní výkres

Materiál

Pístní tyč je vyrobena z oceli C40R, dle ČSN 12 041. Jedná se o ušlechtilou uhlíkovou konstrukční ocel.

Ocel je vhodná k zušlechťování. Kalení se provádí při teplotách 850 - 880 °C s možností chlazení ve vodě či oleji. Ocel je prokalitelná až do hloubky 40 mm. Obsahuje 0,37 - 0,44 % uhlíku, 0,5 - 0,8 % manganu, obsah síry se pohybuje v rozmezí 0,02 - 0,04 % a maximální hodnota fosforu nesmí přesáhnout 0,03 %. Smluvní mez kluzu musí být minimálně 673 MPa.

Používá se na výrobu čepů, šroubů, vřeten, pístních tyčí, pístů, ojníc a dalších. [25][26]

Tabulka 3.1: Hodnoty materiálu pístní tyče

Materiál	Chemické složení [%]				$Rp_{0,2}$ [MPa]
	C	Mn	S	P	
C40R	0,37-0,44	0,5-0,8	0,02-0,04	0,03 max	637 min

Výrobní výkres

Výrobní výkres udává dvě důležité hodnoty pro bezhroté broušení. Je to dovolená hodnota Rz 1 μm a tolerance přímosti, která nesmí být vyšší než 0,07 mm (70 μm) na průměru, na délce 300 mm.

3.2 Specifikace výrobku (rozměrová geometrie, tolerance, drsnost)

Polotovár

Pístní tyče se vyrábějí v průměrech 18, 20, 22 mm a v délkách od 350 do 450 mm. Pro jejich výrobu se používají kruhové tyče. Tyče jsou loupány, takto zpracované přijdou do firmy KMCZ a následně jsou děleny na požadovanou délku. Moje měření probíhalo na tyči o průměru 18 mm a délce 401,7 mm.

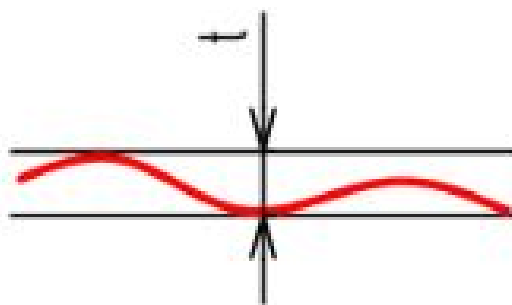
Loupání tyčí je vhodná metoda obrábění pro získání dobré přesnosti a k odstranění vad na povrchu materiálu. Loupání se provádí na loupacím soustruhu. Při této operaci se odebrává vrstva materiálu v tloušťce od 0,2 až po 3 mm. [24] [26]

Geometrické tolerance

Geometrické tolerance jsou definovány jako dovolené odchylky skutečných tvarů a poloh od tvarů a poloh teoreticky přesných. Hodnoty tolerancí jsou v řádech desetin až tisícín mm. Jsou dány požadovanou funkcí plochy a jsou navázány na délkovou, úhlovou toleranci rozměrů a také na drsnost povrchu.

Pístní tyč má na obou koncích předepsanou toleranci kruhovitosti ve velikosti 0,2 mm na průměr a toleranci kolmosti 0,1 mm. Obě tyto tolerance jsou vztaženy k základně A. Tyto geometrické tolerance musí být vyrobeny již před konečným broušením.

Jak jsem již psal výše, pro tuto práci je důležitá tolerance přímosti. Její hodnota nesmí přesáhnout 0,07 mm na průměr, na měřené délce 300 mm. Přímost lze definovat jako osu vnějšího válce, který musí ležet uvnitř válcového tolerančního pole, viz obrázek 3.3. [28]



Obrázek 3.3: Tolerance přímosti [27]

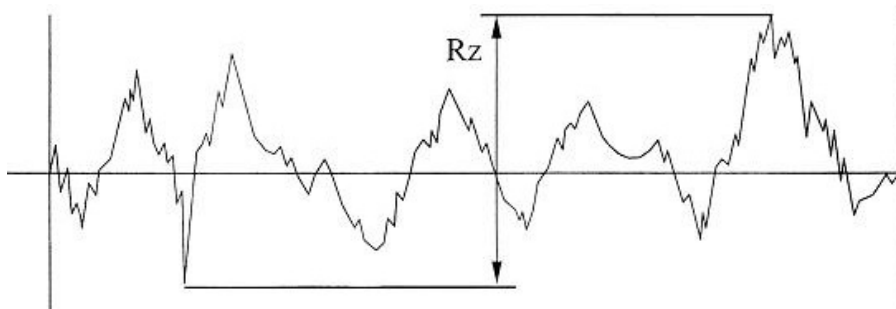
Drsnost

Drsnost povrchu toleruje nepřesnost povrchu z pohledu mikronerovností, protože žádný povrch není dokonale hladký. Maximální hodnota drsnosti povrchu je funkcí velikosti tolerance a délkového rozměru určujícího polohu nebo velikost příslušné plochy.

Na pístní tyči se nachází místa s parametrem drsnosti R_a a R_z . Vyhodnocovaný povrch po broušení je tolerovaný drsností R_z . Maximální hodnota po broušení před chromováním je $R_z 1$. Což udává, že největší výška nerovnosti profilu nesmí přesáhnout $1\mu\text{m}$, jak je to vidět na obrázku 3.4. [10][28]

Význam parametrů drsnosti

- R_a - střední aritmetická úchylka profilu (je to aritmetický průměr absolutních hodnot profilu v rozsahu základní délky)
- R_z - největší výška nerovnostního profilu



Obrázek 3.4: Znázornění drsnosti R_z [10]

3.3 Technologická specifikace výrobku

3.3.1 Postup výroby pístní tyče

Výroba pístních tyčí ve firmě KMCZ je automatizovaná. Všechna pracoviště na sebe kontinuálně navazují. Stroje mají zásobníky pro plynulost výroby a tam, kde je to možné, jsou mezi pracovišti automatické dopravníky. Jednotlivé kroky výroby:

- Vstupní polotovar
- Bezhroté broušení - hrubování
- Povrchové kalení a popouštění
- Obrábění konců

- Výroba závitů a hexagonu
- Finální bezhroté broušení (mnou zkoumaná část výroby)
 - Broušení ve třech operacích

Bezhroté broušení - hrubování

Hrubovací proces broušení se provádí na brusce značky Junker, typu Jupiter 250, viz obrázek 3.5. Tato bruska má za úkol odebrat vrstvu materiálu bez ohledu na následnou drsnost.



Obrázek 3.5: Bezhrotá bruska značky Junker, typ Jupiter 250

Povrchové kalení a popouštění

Tyče jsou povrchově kaleny za pomoci indukčního kalení a následně popouštěny. Tento stroj je vidět na obrázku 3.6. V průběhu tohoto procesu se mění austenitická struktura na strukturu martenzitickou. Minimální tvrdost musí být HRA 71.



Obrázek 3.6: Stroj pro kalení a popouštění

Obrábění konců, výroba závitů a hexagonu

Obrábění probíhá na CNC soustruhu. Následně je na obou koncích vyroben závit a do jednoho konce je vyražen hexagon.

Finální bezhroté broušení (zkoumaná část výroby)

V této části výroby se věnují optimalizaci výroby pístní tyče. Broušení je rozděleno do 3 operací, které na sebe navazují viz obrázek 3.7.

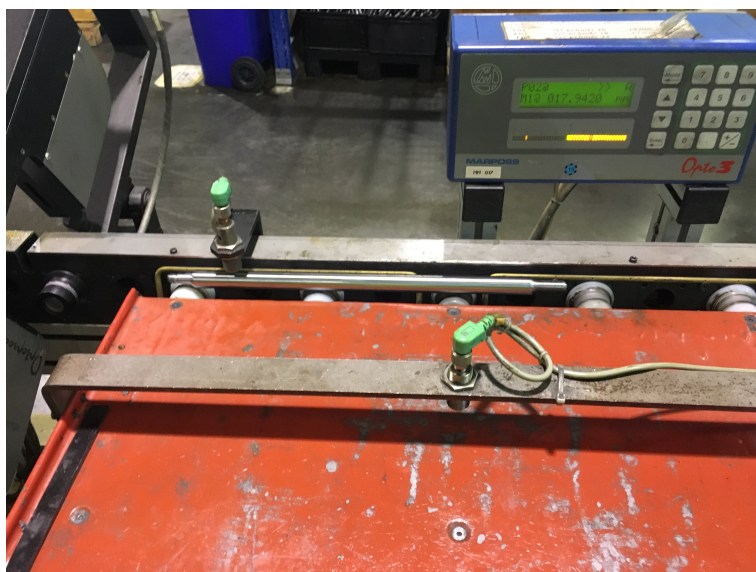


Obrázek 3.7: Soustava tří brusek

3.3.2 Popis optimalizovaného výrobního procesu

Pro výrobu pístních tyčí se využívá průběžného způsobu broušení. Jeho hlavní výhodou je vysoká produktivita práce a to díky automatizaci. Ve firmě KMCZ se brousí na 3 operace (třemi bruskami) ve výsledném čase 10 s na jednu operaci. První bruska má za úkol ohrubovat pístní tyč na daný průměr, druhá bruska musí snížit drsnost povrchu Rz a třetí bruska má dosáhnout požadovaného Rz. Při třetí operaci dochází k minimálnímu úběru materiálu. Dalo by se říci, že dochází spíše k leštění povrchu. Jednotlivé operace jsou spojeny automatickým dopravníkem. Za každou brusku se kontroluje zda má tyč správný rozměr. K tomu se využívá měřicí zařízení od společnosti Marposs, viz obrázek 3.8.

3.3. Technologická specifikace výrobku



Obrázek 3.8: Optické měřicí zařízení Marposs

První využívaná bruska je od společnosti Junker, typ BBE 15. Další dvě brusky jsou vyrobeny společností Cincinnati. Druhá je typu 3-500 a třetí 3-300. Každá z nich používá brusný kotouč od společnosti Manhattan, ale každý s jinou zrnitostí. První bruska má kotouč se zrnitostí 70, druhá bruska má kotouč s nižší zrnitostí a to v hodnotě 125 a nejjemnější zrnitost má kotouč na poslední brusce a to 400. Více parametrů o bruskách, brusných kotoučích a podávacích kotoučích je uvedeno v tabulce 3.2.

Tabulka 3.2: Brousicí stroje

	Junker BBE 5	Cincinnati 3-500	Cincinnati 5-500
Výrobce kotouče	Manhattan	Manhattan	Manhattan
Kotouč	AA70 08R3-P	OL125P/240	400FK200B-P
Velikost kot. [mm]	600x400x305	610x508x305	610x300x305
Otáčky brousicího kot. [ot/min]	1409	1409	1409
Průměr podávacího kot. [mm]	355	355	355
Otáčky podávacího kot.[ot/min]	35-55	40-55	40-65

Optimalizace výroby (technologie)

V této části práce vyhodnotím stávající stav broušení písních tyčí, kterému se věnuje firma KMCZ. Mým úkolem je zjistit, zda by se dal vylepšit (zkrátit) čas broušení při splnění požadovaných výsledných parametrů.

Aktuální broušící čas na jednu operaci je 10 s, při průchozí rychlosti $4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Výsledná drsnost Rz nesmí přesáhnout $1 \mu\text{m}$. Přímost musí být nižší než 0,07 mm ($70 \mu\text{m}$) na průměru, na měřené délce 300 mm.

4.1 Optimalizace výrobního času broušení

Požadavkem firmy KMCZ je zoptimalizovat čas broušení. Výrobní čas je ovlivněn průchozí rychlostí písní tyče. Tato průchozí rychlost je dána podávacím kotoučem. Hlavním parametrem, který udává průchozí rychlost, je tedy velikost vyosení osy podávacího kotouče. Toto vyosení se značí úhlem α_{pk} . Další parametry jsou velikost kotouče a jeho otáčky. Pro nastavení vhodných parametrů pro danou průchozí rychlost se využívá teoretického výpočtu, vztah (4.1), ale v praxi je zapotřebí zohlednit možný prokluz mezi podávacím kotoučem a písní tyčí. Tato korekce je vidět ve vztahu (4.2), který je vynásoben koeficientem 0,95.

$$v_0 = v_{pk} \cdot \sin\alpha_{pk} = \pi \cdot D_{pk} \cdot n_{pk} \cdot \sin\alpha_{pk} \quad (4.1)$$

$$v_0 = \pi \cdot D_{pk} \cdot n_{pk} \cdot \sin\alpha_{pk} \cdot 0,95 \quad (4.2)$$

v_0 = teoretický výpočet osové rychlosti (průchozí) [$m \cdot \text{min}^{-1}$]

v_{pk} = obvodová rychlost podávacího kotouče [$m \cdot \text{min}^{-1}$]

α_{pk} = úhel sklonu osy podávacího kotouče [$^\circ$]

D_{pk} = průměr podávacího kotouče [m]

n_{pk} = otáčky podávacího kotouče [min^{-1}]

Nejdříve provedu broušení se stávajícími podmínkami, abych získal referenční hodnoty kontrolovaných parametrů. Následně provedu 3 změny procesu broušení.

První změnou bude zpomalení průchozí rychlosti na $3,5 m \cdot \text{min}^{-1}$ a budu hodnotit, zda se měřené parametry zlepšily.

Druhou změnou bude zvýšení průchozí rychlosti na $4,5 m \cdot \text{min}^{-1}$ a budu hodnotit, zda jsou výsledné parametry v toleranci s požadovanými.

Třetí a poslední změnou bude vynechání druhé brusky Cincinnati 3 - 500, která má za úkol snížit drsnost Rz. U této změny zůstává průchozí rychlost stejná jako je nyní $3,5 m \cdot \text{min}^{-1}$. Cílem je zjistit, zda se výsledné hodnoty přiblíží požadovaným parametrům.

4.1.1 Postup měření

Měření probíhalo na tyči o průměru 18 mm a délce 401,7 mm.

Celkem jsem hodnotil 5 broušených vzorků. Každý vzorek jsem měřil třikrát. V tabulce 4.1 jsou výsledky měření Rz a přímosti. Měření drsnosti i přímosti jsem provedl přímo ve firmě KMCZ na jejich přístrojích, které se nacházejí vedle brousící linky a jsou pravidelně využívány k měření obou hodnot. Pro měření drsnosti Rz jsem využil digitální přístroj Hommel T1000, viz obrázek 4.1, který byl uložen na měřicí desce, viz obrázek 4.2. Poté jsem provedl měření přímosti, za použití přípravku pro měření písní tyče a číselníkového úchylkoměru od společnosti Mitutoyo, viz obrázek 4.3.

4.1. Optimalizace výrobního času broušení



Obrázek 4.1: Drsnoměr Hommel T1000



Obrázek 4.2: Měřicí deska pro drsnoměr



Obrázek 4.3: Přípravek pro měření pístní tyče

U referenčního měří jsem použil parametry současné výroby. Brouší se za průchozí rychlosti $4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Ta je získána vyosením podávacího kotouče o $3,6^\circ$ a rychlostí kotouče $60 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$. Praktickým výpočtem se jedná o průchozí rychlost $3,99 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, viz výpočet.

$$v_0 = \pi \cdot 0,355 \cdot 60 \cdot \sin(3,6^\circ) \cdot 0,95 = 3,99 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1} \quad (4.3)$$

Tabulka 4.1: Referenční hodnoty bezhrotého broušení

Vzorek	Rz [μm]	Přímost [μm]
1	0,67	5
	0,67	5
	0,70	7,5
2	0,66	5
	0,63	2,5
	0,67	2,5
3	0,65	1
	0,60	2,5
	0,63	2,5
4	0,62	5
	0,63	6
	0,65	1
5	0,59	2,5
	0,61	5
	0,66	2,5

První změnou parametrů broušení bylo zpomalení průchozí rychlosti tyče. Úhel vyosení podávacího kotouče zůstal stejný, ale snížil jsem jeho táčky na 52

4.1. Optimalizace výrobního času broušení

za minutu. Na základě této změny se průchozí rychlost snížila na $3,46m \cdot min^{-1}$. Získané hodnoty jsou v tabulce 4.2

$$v_0 = \pi \cdot 0,355 \cdot 52 \cdot \sin(3,6^\circ) \cdot 0,95 = 3,46m \cdot min^{-1} \quad (4.4)$$

Tabulka 4.2: Hodnoty bezhrotého broušení při zpomalení průchozí rychlosti

Vzorek	Rz[$\mu\mathbf{m}$]	Přímost[$\mu\mathbf{m}$]
1	0,62	7,5
	0,60	5
	0,66	2,5
2	0,60	5
	0,62	5
	0,69	7,5
3	0,62	7,5
	0,59	2,5
	0,63	5
4	0,62	2,5
	0,60	7,5
	0,67	5
5	0,62	7,5
	0,60	5
	0,63	5

Druhou změnou parametrů broušení bylo zrychlení průchozí rychlosti tyče. Zde jsem změnil jak otáčky tak i úhel vyosení. Otáčky jsem zvýšil na 62 otáček za minutu a úhel vyosení jsem zvolil 4° . Tyto změny zvýšily průchozí rychlost na $4,58 m \cdot min^{-1}$. Získané hodnoty jsou v tabulce 4.3.

$$v_0 = \pi \cdot 0,355 \cdot 62 \cdot \sin(4^\circ) \cdot 0,95 = 4,58m \cdot min^{-1} \quad (4.5)$$

Tabulka 4.3: Hodnoty bezhrotého broušení při zrychlení průchozí rychlosti

Vzorek	Rz[μm]	Přímost[μm]
1	0,92	15
	0,97	10
	0,93	4
2	0,84	10
	0,87	17,5
	1,10	12,5
3	1,06	20
	1,04	25
	1,08	15
4	1,12	15
	1,12	15
	1,18	12,5
5	1,00	7,5
	1,28	5
	1,43	12,5

Třetí změnou bylo vynechání druhé brusky Cincinnati 3-500. Broušení bylo tedy aplikováno pouze na první a třetí brusce. Parametry broušení byly stejné jako u referenčního broušení. Broušící rychlost byla $3,99 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Získané hodnoty jsou v tabulce 5.2.

Tabulka 4.4: Hodnoty bezhrotého broušení při použití pouze 2 brusek

Vzorek	Rz[μm]	Přímost[μm]
1	2,41	25
	2,02	50
	1,92	35
2	2,11	50
	2,21	50
	2,14	25
3	1,63	37,5
	2,35	25
	2,48	50
4	2,13	60
	2,4	55
	1,72	75
5	1,78	20
	1,76	35
	2,01	15

4.1.2 Faktory optimalizace

Cílem bylo zjistit, zda je firma KMCZ na kvalitativním maximu procesu broušení nebo jestli lze, v případě nutnosti, výsledné parametry zlepšit. Je-li tedy možné dosáhnout vyšší kvality drsnosti nebo přímosti zpomalením procesu broušení a to i na úkor delšího času.

Zrychlení průchozí rychlosti zkrátí čas broušení a tedy zvýší produktivitu a ušetří náklady. Proto byl tento pokus zvolen. V teoretickém výpočtu níže ukážu kolik kusů tyčí by se obrousilo navíc za 8 hodinovou směnu.

Ve třetí části optimalizace jsem z procesu vynechal druhou brusku s cílem zjistit, zda-li je nezbytná. Je-li možné, pouze za použití první a třetí brusky, docílit výsledků v rámci tolerovaných hodnot.

$$t_{ref} = 60 \cdot \frac{l}{v_{ref}} = 60 \cdot \frac{0,4017}{3,99} = 6,04s \quad (4.6)$$

$$t_{zr} = 60 \cdot \frac{l}{v_{zr}} = 60 \cdot \frac{0,4017}{4,58} = 5,26s \quad (4.7)$$

$$n_r = n_{zr} - n_{ref} = \frac{t_s}{t_{zr}} - \frac{t_s}{t_{ref}} = \frac{28800}{5,26} - \frac{28800}{6,04} = 707kusů \quad (4.8)$$

l = délka broušené písní tyče [m]

t_{ref} = čas broušení při referenční průchozí rychlosti [s]

t_{zr} = čas broušení při zrychlené průchozí rychlosti [s]

v_{ref} = referenční průchozí rychlost [$m \cdot min^{-1}$]

v_{zr} = zrychlená průchozí rychlost [$m \cdot min^{-1}$]

n_r = rozdíl počtu obroušených písních tyčí [$kusů$]

n_{ref} = počet vyrobených kusů při referenčních podmínkách broušení [$kusů$]

n_{zr} = počet vyrobených kusů při zrychlených podmínkách broušení [$kusů$]

Na výpočtu je vidět, že pokud by se podařilo zrychlit průchozí rychlost přibližně o $0,5 m \cdot min^{-1}$, výrobní dávka za jednu směnu by se teoreticky zvýšila o 707 kusů.

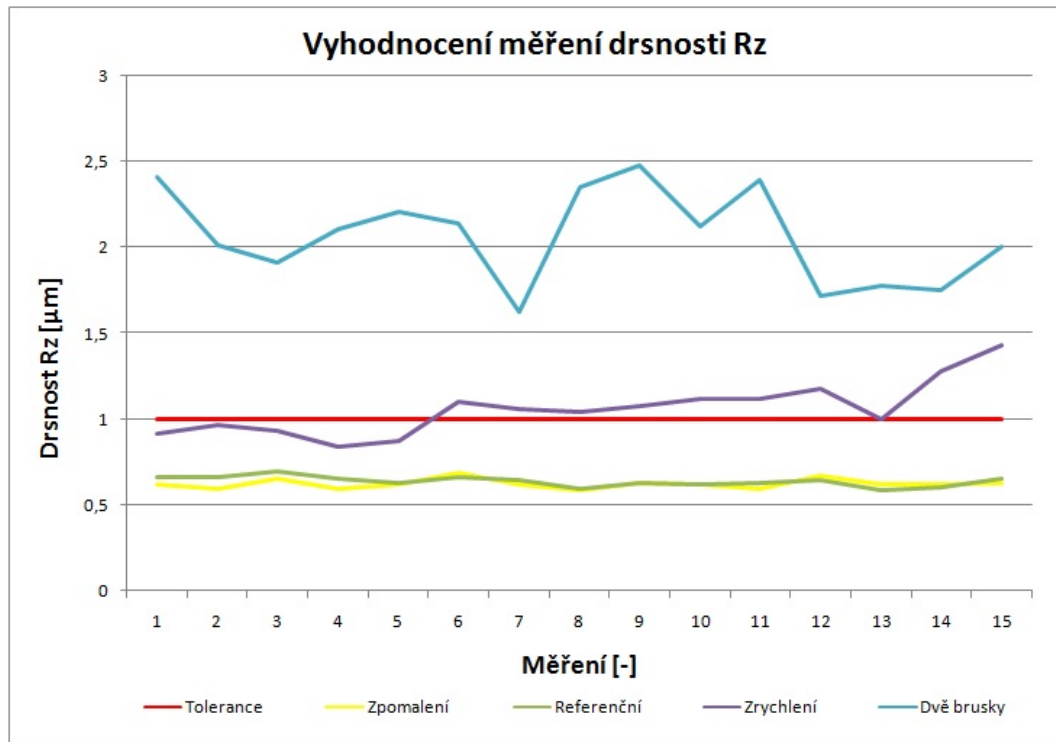
Vyhodnocení a návrh vylepšení bezhrotého broušení

5.1 Vyhodnocení bezhrotého broušení

Naměřené hodnoty jsem, z důvodu přehlednosti, zpracoval do dvou tabulek. V první jsou hodnoty drsnosti Rz a v druhé jsou hodnoty přímosti. Obě tyto hodnoty jsem porovnal s hodnotou tolerance formou grafu.

Tabulka 5.1: Hodnoty drsnosti Rz [μm] broušeného povrchu

Referenční	Zpomalení	Zrychlení	Použití dvou brusek
0,67	0,62	0,92	2,41
0,67	0,6	0,97	2,02
0,7	0,66	0,93	1,92
0,66	0,6	0,84	2,11
0,63	0,62	0,87	2,21
0,67	0,69	1,1	2,14
0,65	0,62	1,06	1,63
0,6	0,59	1,04	2,35
0,63	0,63	1,08	2,48
0,62	0,62	1,12	2,13
0,63	0,6	1,12	2,4
0,65	0,67	1,18	1,72
0,59	0,62	1	1,78
0,61	0,62	1,28	1,76
0,66	0,63	1,43	2,01



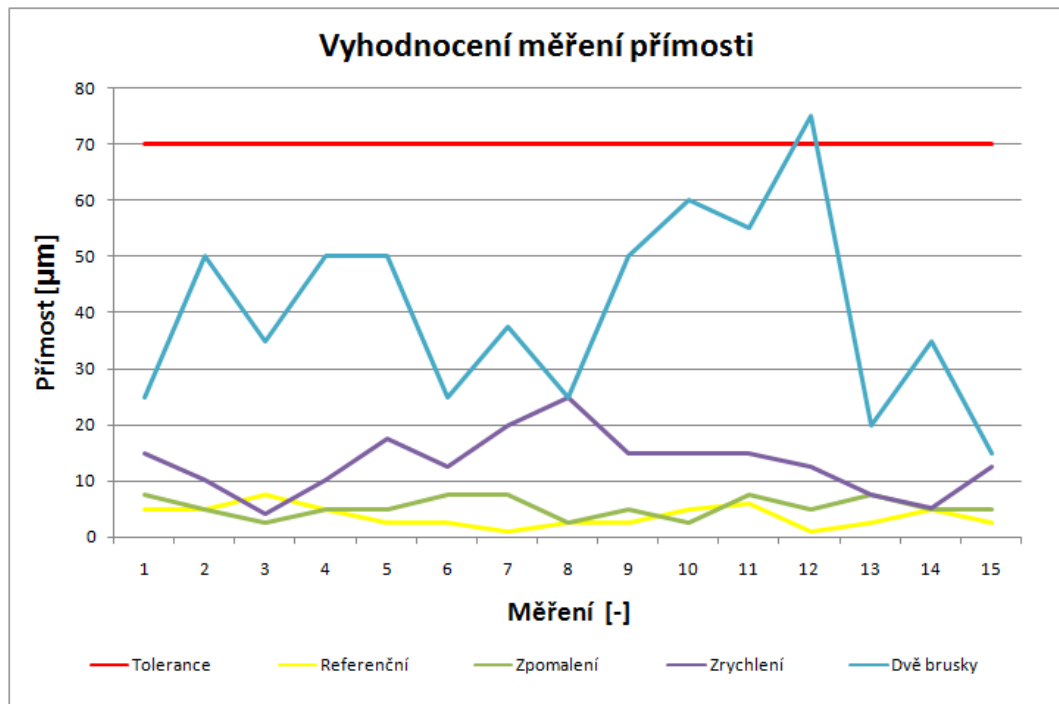
Obrázek 5.1: Graf vyhodnocení drsnosti Rz

Z grafu je patrné, že referenční hodnoty drsnosti jsou výrazně nižší než je dovolená tolerance. Drsnost Rz je při zpomalení průchozí rychlosti téměř shodná s referenčními hodnotami drsnosti. Při zrychlení broušení se drsnost pohybuje na hranici tolerance, ale převažují spíše hodnoty nad tolerancí drsnosti. Použití pouze dvou brusky (první a třetí) nepřipadá v úvahu. Hodnoty tolerance přesahují více než dvojnásobkem dovolenou hodnotu.

5.1. Vyhodnocení bezhrotého broušení

Tabulka 5.2: Hodnoty přímosti v [μm] broušeného povrchu

Referenční	Zpomalení	Zrychlení	Použití dvou brusek
5	7,5	15	25
5	5	10	50
7,5	2,5	4	35
5	5	10	50
2,5	5	17,5	50
2,5	7,5	12,5	25
1	7,5	20	37,5
2,5	2,5	25	25
2,5	5	15	50
5	2,5	15	60
6	7,5	15	55
1	5	12,5	75
2,5	7,5	7,5	20
5	5	5	35
2,5	5	12,5	15



Obrázek 5.2: Graf vyhodnocení přímosti

Naměřené hodnoty přímosti jsou velmi dobré. Referenční hodnoty jsou opět téměř shodné s hodnotami při zpomalení broušení. U zrychlení průchozí rychlosti vychází přímost přibližně dvojnásobná s porovnáním referenčních hodnot. Stále je však daleko od tolerance, takže by nebyl problém zvýšit průchozí rychlost. Při aplikaci dvou brusek se hodnoty přímosti dostávají k hranici tolerance, avšak i tak byla daná hodnota překročena pouze jednou.

Vyhodnocení změn rychlosti broušení

Všechny tři změny při broušení by byly vyhovující u tolerance přímosti. Pokud bych mluvil jen o přímosti tak by stačili jen 2 brusky. Ale daleko zajímavější jsou výsledky hodnoty drsnosti Rz. Jak je zobrazeno v grafech, zpomalení průchozí rychlosti nemá téměř žádný vliv na zlepšení výsledné drsnosti a přímosti. Pokud by bylo zapotřebí snížit drsnost povrchu nebo přímost, snížení rychlosti by nevedlo ke zlepšení těchto parametrů. Nejspíše by se musel zvolit jiný brusný kotouč. Zrychlením průchozí rychlosti se výsledné hodnoty zhoršují. U drsnosti se zhoršují významně, kdy se hodnoty dostávají na hranici tolerance a často i za ní. Použití pouze dvou brusek je absolutně nepřijatelné. Hodnoty drsnosti jsou výrazně za hranicí tolerance.

5.2 Návrh vylepšení bezhrotého broušení

Pokud by bylo zapotřebí zlepšit dosavadní výslednou kvalitu, zpomalení průchozí rychlosti by nebylo dostačující. Pomohl by výběr jiného brusného kotouče.

Zrychlení průchozí rychlosti vedlo k výsledkům na hranici použitelnosti, tolerance. Pokud by bylo zapotřebí zvýšit počet vyráběných kusů, pravděpodobně by to bylo možné.

Stávající proces broušení má ideální parametry, jelikož zpomalením průchozí rychlosti nedošlo ke zlepšení výsledných parametrů a zrychlení průchozí rychlosti vedlo ke zhoršení drsnosti Rz, kdy se překračovaly dovolené hodnoty.

Závěr

Cíle mé práce jsem splnil. Popsal jsem technologii broušení rotačních, rovinných i tvarových ploch a také indukční kalení, které firma KMCZ používá pro povrchové kalení pístních tyčí. Optimalizaci bezhrotého broušení jsem provedl přímo ve firmě KMCZ. Pro optimalizaci jsem zvolil 3 změny. První změnou bylo zpomalení průchozí rychlosti pístní tyče, druhou změnou bylo zvýšení průchozí rychlosti, třetí úpravou procesu bylo vynechání předposlední brusky. Výsledky optimalizace jsem porovnával se stávajícími parametry broušení firmy KMCZ.

První změna měla ukázat, zda se zpomalením dá dosáhnout lepších výsledků drsnosti nebo přesnosti. Výsledná drsnost i měřená přímota byly téměř shodné s porovnávanými hodnotami. Druhá změna byla zvolena pro možnost zvýšení výrobní kapacity. Zrychlení průchozí rychlosti vedlo k výraznému zhoršení drsnosti povrchu, kdy více jak v 50% případů byla překročena daná tolerance. Měření přímoty bylo také horší, ale stále vycházela pod dovolenou hodnotou. Třetí změna měla ukázat, zdali je nezbytné použít všechny brusky, které jsou součástí výrobního procesu firmy KMCZ. Měření však ukázalo, že hodnoty drsnosti, s vynechanou druhou bruskou, překračují dovolenou hranici více než dvojnásobně. Měření přímoty, až na jednu hodnotu, vyšlo pod dovolenou toleranci.

Musím konstatovat, že firma KMCZ má proces broušení nastaven velmi dobře, jelikož zpomalením se hodnoty drsnosti ani přímoty viditelně nezlepšily. Naopak zrychlením se hodnoty drsnosti dostaly nad hranici tolerance. Vynechání předposlední brusky je nemožné, protože hodnoty drsnosti by dosahovaly příliš vysokých hodnot.

Na závěr bych chtěl dodat, že možným pokračováním této práce by bylo vyzkoušení kotoučů s jemnější zrnitostí. Díky tomu by se při zrychlení průchozí rychlosti mohlo dosáhnout požadovaných hodnot drsnosti.

Literatura

- [1] **OUTRATA, Jiří**; Technológia I: brusič : učebný text pre 1. ročník technológie brusiča kovov odborných učilíšť a učnovských škôl. 4. vyd. Bratislava: Alfa, 1978. Edícia strojárskkej literatúry (Alfa).
- [2] **GAŠPÁREK, Jozef**; Dokončovacie spôsoby obrábania. Bratislava: Alfa, 1979. Edícia strojárskkej literatúry (Alfa)
- [3] **skripta Technologie 2díl**; [online] [cit. 2018-04- 05] Dostupné z [http : //homel.vsb.cz/ cep77/PDF/skripta_Technologie_I_2díl.pdf](http://homel.vsb.cz/cep77/PDF/skripta_Technologie_I_2díl.pdf)
- [4] **Prof. Dr. Ing. František Holešovský** , Abrazivní metody dokončování povrchů, Praha 2015. [cit. 2018-03-30] ISBN 978-80-86302-68-3
- [5] **Ing. Kubíček Miroslav**, Broušení [online][cit. 2018-04-05]Dostupné z [http : //domes.spssbrno.cz/web/DUMy/STT,20KOM/VY321NOVACE19-13.pdf](http://domes.spssbrno.cz/web/DUMy/STT,20KOM/VY321NOVACE19-13.pdf)
- [6] **Antonín Dombek** , Strojní, nástrojařské a brusičské práce – broušení kovů 2012[online] [cit. 2018-04- 05] Dostupné z [https : //www.spszengrova.cz/texty/texty/PRA/Strojn – UT.pdf](https://www.spszengrova.cz/texty/texty/PRA/Strojn – UT.pdf)
- [7] **Učebnice ŘEMESLA** , Broušení[online] [cit. 2018-03- 27] Dostupné z [https : //eluc.kr – olomoucky.cz/verejne/lekce/1825](https://eluc.kr – olomoucky.cz/verejne/lekce/1825)
- [8] **Case Hardening Methods** , Practical Maintenance: Improve the Quality of Life [online] [cit. 2018-04- 07] Dostupné z [http : //practicalmaintenance.net/?p = 1543](http://practicalmaintenance.net/?p = 1543)
- [9] **JUPITER - Bezhraté brusky** , [online] [cit. 2018-04- 05] Dostupné z [https : //www.junker – group.com/cs/broušici – stroje/products/jupiter/](https://www.junker – group.com/cs/broušici – stroje/products/jupiter/)

-
- [10] **Měření drsnosti**, [online] [cit. 2018-04- 20] Dostupné z [https : //eluc.kr – olomoucky.cz/verejne/lekce/1571](https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1571)
- [11] **MACHEK, Václav** , *Kovové materiály 1: struktury kovových materiálů*. 1. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2013 ISBN 978-80-01-05248-8.
- [12] **Doc. Ing. Anton Humár, CSc.** , *TECHNOLOGIE OB-RÁBĚNÍ – 3. část* 2015[online] [cit. 2018-04-18] Dostupné z [http : //ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory – save/Dokoncovaci – a – nekonvencni – metody – obrabeni/TI_TO – 3.cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci-a-nekonvencni-metody-obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf)
- [13] **Způsoby broušení**, [online] [cit. 2018-04- 20] Dostupné z [http : //zoei.sssebrno.cz/brouseni – – – zpusoby/](http://zoei.sssebrno.cz/brouseni---zpusoby/)
- [14] **Tvrдость kotouče**, Brusivo Jimi[online] [cit. 2018-03- 27] Dostupné z [http : //www.brusivojimi.com/poradce/28 – tvrdst – kotouce](http://www.brusivojimi.com/poradce/28-tvrdst-kotouce)
- [15] **Ing. David Kratochvíl**, *Bezhraté brusky - specifický segment trhu* 2016 [online] [cit. 2018-03- 27] Dostupné z [https : //www.mmspektrum.com/clanek/bezhrote – brusky – specificky – segment – trhu.html](https://www.mmspektrum.com/clanek/bezhrote-brusky-specificky-segment-trhu.html)
- [16] **ŘASA, Jaroslav a Vladimír GABRIEL**, *Strojírenská technologie* 3. 2. vyd. Praha: Scientia, 2005. ISBN isbn80-7183-337-1
- [17] **NĚMEC, Dobroslav**, *Strojírenská technologie II*. 1. vydání. Praha SNTL, 1985
- [18] **Základní rozdělení brusných kotoučů k ostření nástrojů**, 2010 [online] [cit. 2018-04- 22] Dostupné z [http : //www.tumlikovo.cz/zakladni – rozdeleni – brusnych – kotoucu – k – ostreni – nastroju/](http://www.tumlikovo.cz/zakladni-rozdeleni-brusnych-kotoucu-k-ostreni-nastroju/)
- [19] **Strojírenství**, *Povrchové kalení* [online] [cit. 2018-04- 22] Dostupné z [http : //strojirenstvi.studentske.cz/2008/10/povrchov – kalen.html](http://strojirenstvi.studentske.cz/2008/10/povrchov-kalen.html)
- [20] **Indukční kalení**, Rajmont [online] [cit. 2018-04- 22] Dostupné z [http : //www.rajmont.cz/produkty – indukcni – kaleni/](http://www.rajmont.cz/produkty-indukcni-kaleni/)
- [21] **Základy tepelného zpracování kovů**, [online] [cit. 2018-04- 22] Dostupné z [http : //jhamernik.sweb.cz/tepelnezpracovani.htm](http://jhamernik.sweb.cz/tepelnezpracovani.htm)
- [22] **DAĎOUREK, Karel**, *Povrchové kalení: Teorie tepelného zpracování*. Technická univerzita v Liberci: Katedra materiálů [online]. 2007 [cit. 2018-04-25] Dostupné z [http : //www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/VTM/vtm%20Dad/02povrkal.pdf](http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/VTM/vtm%20Dad/02povrkal.pdf)

-
- [23] **Učebnice ŘEMESLA** , Broušení[online] [cit. 2018-04- 24] Dostupné z [https : //eluc.kr – olomoucky.cz/verejne/lekce/1257](https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1257)
- [24] **Bc. Miloš Kotrsal**, Návrh nové technologie výroby součásti pro automobilový průmysl[online] [cit. 2018-05- 12] Dostupné z [https : //dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/60916/2016_DP_Kotrsal_Milos_137329.pdf](https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/60916/2016_DP_Kotrsal_Milos_137329.pdf)
- [25] **Značky ocelí**, [online] [cit. 2018-05- 07] Dostupné z [http : //www.metalmax.cz/znacky.php](http://www.metalmax.cz/znacky.php)
- [26] **ŘASA, Jaroslav a Josef ŠVERCL**, Strojnické tabulky: pro školu a praxi. Praha: Scientia, 2007. ISBN 978-80-86960-20-3.
- [27] **Ing. Lukáš Procházka**, Technická dokumentace[online] [cit. 2018-05- 02] Dostupné z [http : //docplayer.cz/15872511–Definice–tolerovani–technicka – dokumentace – ing – lukas – prochazka.html](http://docplayer.cz/15872511-Definice-tolerovani-technicka-dokumentace-ing-lukas-prochazka.html)
- [28] **Pospíchal, Jaroslav** , Technické kreslení. Vyd. 3., přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 9788001032145.