



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ELIMINACE VAD PŘI VÝROBĚ OZUBENÝCH KOL

ELIMINATION OF DEFECTS IN THE GEARS MANUFACTURING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Vít Petříček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Zdeněk Fiala, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Vít Petříček
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	Ing. Zdeněk Fiala, Ph.D.
Akademický rok:	2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Eliminace vad při výrobě ozubených kol

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce se bude zabývat návrhem úprav stávajícího technologického postupu výroby ozubených kol, které jsou součástí zubového čerpadla. Hlavním záměrem bude provést analýzu současného stavu výroby se zaměřením na technologii broušení. Na základě zhodnocení současného stavu budou následně navrženy doporučení, která povedou k redukci, popřípadě eliminaci nežádoucích spálenin na povrchu ozubených kol. V závěru práce bude provedeno technicko–ekonomické zhodnocení navržených variant.

Cíle diplomové práce:

Rešerše dané problematiky.
Představení sestavy zubového čerpadla.
Analýza problémů při výrobě ozubených kol.
Návrhy na eliminaci vzniku spálenin.
Technicko–ekonomické zhodnocení.

Seznam doporučené literatury:

GUPTA, Kapil, ed. Advanced manufacturing technologies: Modern Machining, Advanced Joining, Sustainable Manufacturing. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2017. ISBN 978-3-319-56-98-4.

DAVIM, J. Paulo, ed. Surface integrity in machining. London: Springer, 2010, 215 s. ISBN 978--84882-873-5.

DAVIM, J. Paulo, ed. Modern machining technology: a practical guide. Cambridge: Woodhead Publishing, 2011. Woodhead Publishing in mechanical engineering. ISBN 978-0-85709-099-7.

GRZESIK, Wit. Advanced machining processes of metallic materials: theory, modelling and applications. Second edition. Boston: Elsevier, [2017]. ISBN 978-0-444-63711-6.

TSCHÄTSCH, Heinz. Applied machining technology. Dordrecht: Springer, c2009, xvii, 398 s. ISBN 978-3-642-01006-4.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem diplomové práce bylo analyzovat kvalitativní výpadky při výrobě ozubených kol do zubového čerpadla a minimalizovat je. Největší podíl výpadků byl způsoben tvorbou opalu při broušení čela. Po analýze současného stavu výroby byly kromě návrhů na eliminaci této vady nalezeny možnosti, jak zrychlit výrobní proces. Návrhy na eliminaci tvorby opalu byly otestovány, přičemž testy byly navrženy tak, aby minimálně ovlivnily produkci. Bylo dosaženo snížení výpadků na opal a zároveň došlo ke zrychlení části výrobního procesu. Návrhy budou dále implementovány do sériové výroby.

Klíčová slova

opal, broušení, zubové čerpadlo, brousící kotouč, orovnáání

ABSTRACT

The aim of the diploma thesis was to analyze qualitative outages in the production of gears for a gear pump and to minimize them. The largest amount of outages was caused by the burning of the surface during face grinding. After analyzing the current state of production there were created some suggestions to avoid this issue. Also there was found some space to speed up the whole process. Suggestions to eliminate burning have been tested with minimal impact on production. The reduction of outages for burned surface was achieved and also the cycle time was shortened. Those suggestions will be implemented in serial production.

Key words

burned surface, grinding, gear pump, grinding wheel, dressing

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PETŘÍČEK, Vít. Eliminace vad při výrobě ozubených kol [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-19]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132844>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Zdeněk Fiala.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Eliminace vad při výrobě ozubených kol** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Vít Petříček

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto svému vedoucímu práce Ing. Zdeňku Fialovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Václavu Vackovi za pomoc a cenné rady při vypracování práce. V neposlední řadě bych rád poděkoval své rodině a přítelkyni za podporu při celém studiu.

OBSAH

ABSTRAKT	3
PROHLÁŠENÍ.....	4
PODĚKOVÁNÍ	5
OBSAH.....	6
ÚVOD.....	8
1 BROUŠENÍ	9
1.1 Rozdělení abrazivních metod obrábění.....	9
1.1.1 Honování.....	9
1.1.2 Lapování	10
1.1.3 Leštění.....	10
1.1.4 Broušení	11
1.2. Síly při broušení.....	13
1.2.1 Složky sil při broušení	14
1.3 Nástroj.....	16
1.3.1 Brusiva	16
1.3.2 Zrnitost.....	19
1.3.3 Pojiva	20
1.3.4 Orovňávání brousicích kotoučů.....	22
1.3.5 Značení brousicích kotoučů	23
1.4 Teplo při broušení	23
1.4.1 Změna barvy	24
1.4.2 Změkčení	25
1.4.3 Opětovné vytvrzení.....	25
1.4.4 Zbytková napětí v tahu	25
1.4.5 Mechanicky vyvolaná napětí	25
1.5 Metody měření teploty při obrábění	25
1.5.1 Termočlánky	26
1.5.2 Termistory.....	27
1.5.3 Zařízení měřící tepelné záření.....	27
1.5.4 Teplotní indikátory	28
2 ZUBOVÉ ČERPADLO	29
2.2 Úsek výroby zubového čerpadla.....	31
2.2.1 Obrábění těles	31
2.2.2 Broušení ozubených kol.....	32

2.2.3 Montáž	35
3 VADY OBROBKU VZIKLÉ PŘI VÝROBĚ OZUBENÝCH KOL	37
3.1 Opal na čele	37
3.2 Přilepený materiál	39
3.3 Ostatní vady při výrobě.....	41
3.4 Četnost vad	43
4 NÁVRHY NA ELIMINACI VZNIKU OPALU	44
4.1 Chlazení	44
4.1.1 Výměna čerpadla	44
4.2 Nástroj.....	46
4.3 Procesní parametry	49
4.3.1 Rozbor stávajícího stavu.....	49
4.3.2 Úprava posuvové rychlosti	51
4.3.3. Úprava programu	54
4.4 Orovnávání.....	56
4.4.1 Změna intervalu orovnění.....	56
4.4.2 Změna orovnávacích paramterů.....	56
4.4.3 Úprava orovnávacího kotouče	57
5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	59
5.1 Výměna čerpadla	59
5.2 Změna procesních parametrů.....	59
5.3 Změna používaných nástrojů	59
6 ZÁVĚR	61
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	62
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	65

ÚVOD

Diplomová práce je realizována ve spolupráci s Bosch Diesel s.r.o., což je společnost sídlící v Jihlavě. Je členem celosvětového koncernu Bosch Group, která je jedním z hlavních dodavatelů široké škály technologií. Sortiment této skupiny se skládá od průmyslové techniky, přes součásti do automobilového průmyslu až po spotřební zboží, jako je ruční náradí, či spotřebiče.

Jihlavský závod je zaměřen na automobilový průmysl, konkrétně na výrobu komponentů do diesellového vstřikovacího systému Common Rail, jehož součástí jsou také zubová čerpadla. Ta se skládají z dvojice ozubených kol, tělesa a unašeče. Ozubená kola se dělí na primární a sekundární. Krouticí moment je přes unašeč přenesen na primární ozubené kolo, které pohání sekundární.

Dokončovací operaci při obrábění kol je broušení, které je voleno kvůli nutnosti dodržení přesného uložení ozubených kol do tělesa. Toleranční pole uložení je velmi těsné (řádově jednoty mikrometrů), aby čerpadlo pracovalo správně s předepsanými tlaky. Tělesa jsou zhotovena frézováním a v montáži jsou dle skutečných rozměrů párována s ozubenými koly. Je tedy využíváno principu selektivní montáže.

Při broušení čela ozubených kol dochází k výpadkům, které jsou z ekonomických důvodů nežádoucí. Dominantní vadou za rok 2020 byla tvorba opalu při broušení, která odpovídala zhruba polovině veškerých vyřazených kusů. Opal se tvoří v důsledku zvýšené teploty v místě řezu. Cílem této práce je eliminovat vady vzniklé při výrobě zubového čerpadla, proto bude hlavní důraz kladen na analýzu opalu. Testování navrhovaných řešení je nutné realizovat s ohledem na stávající výrobu, aby nebyla omezena produkce.

Vzhledem k charakteru operace je problematické měřit teplotu v oblasti řezu. Pro zavedení termočlánku nebo termistoru není prostor. Množství trysek distribuujících procesní kapalinu znemožňuje použití termovize. Proto je zvolen jako vypovídající sledovaný parametr podíl ozubených kol s opalem vyřazených na vizuální kontrole po broušení čela. Dále bude sledován také výkon na nástrojovém vřetenu, či kvalita povrchu výsledné součásti.

1 BROUŠENÍ

Broušení patří mezi abrazivní metody obrábění. To jsou výrobní techniky, které používají velmi tvrdé granulované částice při obrábění, obrušování nebo leštění k úpravě tvaru a integrity povrchu vyráběných dílů. Drsnost výsledného povrchu dosahuje až Ra 0,2 [1].

Broušení se používá k výrobě dílů s vysokou přesností a úzkými pásmy tolerance, dosahuje se přesnosti v jednotkách mikrometrů. Příklady použití sahají od velkých dílů, jako jsou kluzné vedení strojů, po malé části, jako jsou jehly, elektronické součástky, křemíkové destičky či kuličková ložiska. Brusné procesy se také hojně využívají při dokončování tvrdých materiálů, či materiálů s tvrzeným povrchem.

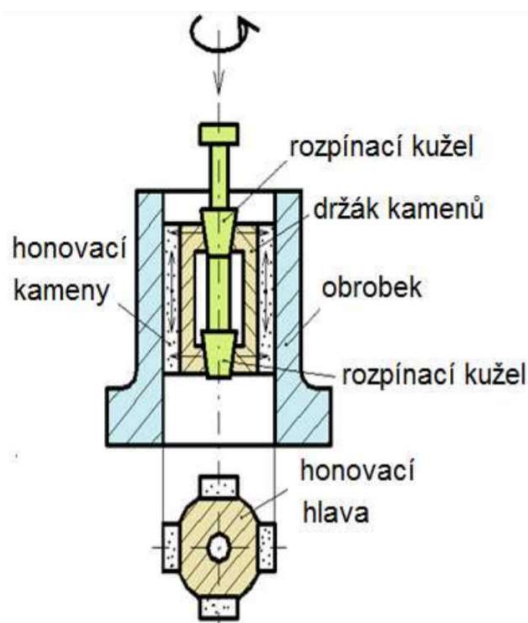
1.1 Rozdělení abrazivních metod obrábění

Většina abrazivních metod může být rozdělena do jedné ze čtyř skupin [2]:

- broušení
- honování
- lapování
- leštění

1.1.1 Honování

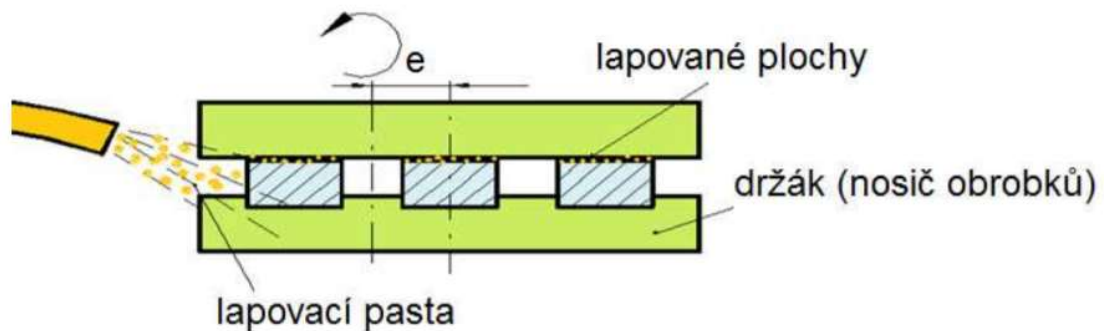
Při honování (viz obr. 1) jsou brusné částice nebo zrna, jak jsou běžně známá, spojena ve spojeném nástroji jako při broušení. Honovací proces se používá k dokončování děr. Honovací kameny jsou natlačeny radiálně směrem ven proti otvoru. Nástroj vykonává jak rotační, tak oscilační pohyb. Oproti broušení jsou nižší rezní rychlosti. Díky honování se dosáhne lepší válcovitosti otvoru i podélné vlnitosti. Nedochází však k úpravě polohy osy díry, protože nástroj je upnut výkyvně [3].



Obr. 1 Honování schematicky [4].

1.1.2 Lapování

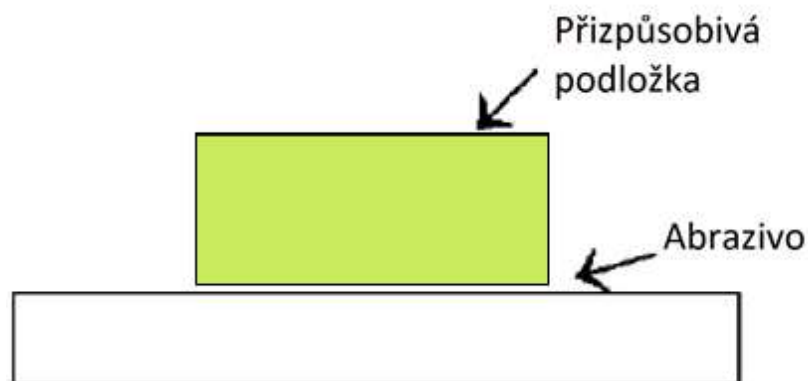
Při lapování (viz obr. 2) se mezi brus, kterým může být například litinová deska, a povrch obrobku zavádí volné brusivo. To je obvykle suspendováno v kapalném médiu, jako je olej, což zajišťuje mazání a pomáhá při pohybu abrazivních zrn [5]. Jak deska, tak brus podléhají opotřebení, proto je vhodné volit desku z tvrdého materiálu odolného proti otěru.



Obr. 2 Lapování schematicky [6].

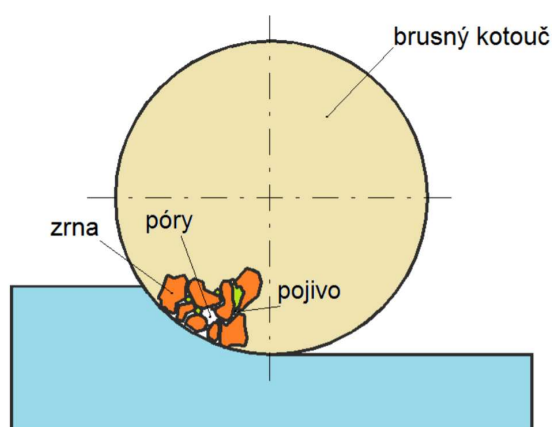
1.1.3 Leštění

Leštění (viz obr. 3), stejně jako lapování, využívá volné brusivo. V tomto případě je na brusivo vyvíjen tlak prostřednictvím přizpůsobivé podložky nebo měkkého hadříku. To umožňuje brusivu následovat obrysy povrchu obrobku a omezuje pronikání jednotlivých zrn do povrchu [5]. Díky jemnému brusivu a nízkým rychlostem neprobíhá velký úběr materiálu, geometrie povrchu tak musí být již před leštěním blízka požadovanému tvaru. Leštění je prováděno hlavně za účelem úpravy textury povrchu.



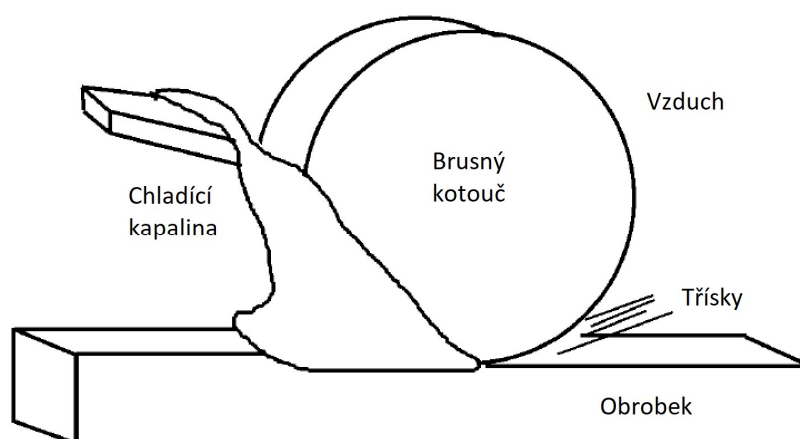
Obr. 3 Leštění schematicky dle [2].

1.1.4 Broušení



Obr. 4 Broušení schematicky [7].

Broušení (viz obr. 4) využívá pro obrábění celistvý nástroj, kdy jsou zrna sdružena pojivem do dané geometrie. Řezná rychlost u broušení je ve srovnání se soustružením či frézováním výrazně vyšší, běžně se pohybuje od 30 m/s až po 80 m/s [1]. Při vysokorychlostním broušení může řezná rychlost dosahovat až 140 m/s. Vysokorychlostní broušení ale není příliš používané kvůli vysokým nárokům na použité strojní vybavení.



Obr. 5 Pět hlavních prvků brusného procesu dle [8].

Mezi pět hlavních prvků brusného procesu patří brousící kotouč, obrobek, procesní kapalina, atmosféra a vzniklé třísky (viz obr.5). Brousící kotouč provádí obrábění obrobku, čímž dochází k jeho opotřebení. Přestože broušení může probíhat bez mazání, dává se přednost broušení za mokra. Mezi běžně používaná média patří emulze typu olej ve vodě a čisté oleje.

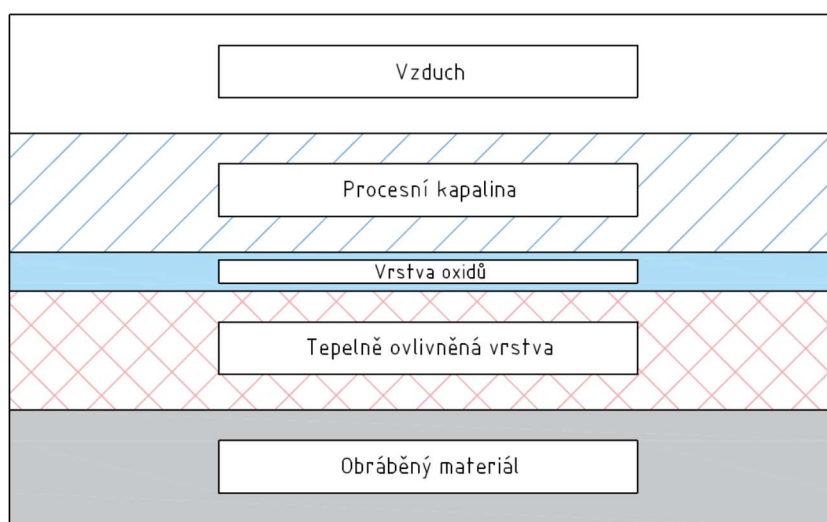
Procesní kapalina slouží ke třem hlavním účelům [8]:

- Mazání a snižování tření mezi brusnými zrny, třískami a obrobkem v kontaktní zóně.
- Chlazení obrobku a snížení nárůstu teploty materiálu obrobku uvnitř a vně kontaktní zóny.
- Odvod třísek a vylomených brusných zrn.

I když to nemusí být hned zřejmé, důležitou roli hraje také atmosféra. Většina kovů po opracování vykazuje zvýšenou chemickou reaktivitu v důsledku dvou účinků [2]:

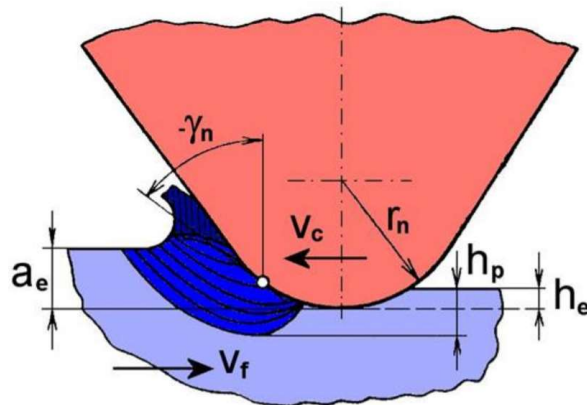
- Vznikající povrchy vytvořené v procesu řezání jsou mnohem reaktivnější než již oxidovaný povrch.
- Vysoké teploty na rozhraní mezi zrny a obrobkem také zvyšují rychlost reakce.

Výsledkem je, že oxidy nebo jiné sloučeniny se vytvářejí velmi rychle na spodní straně třísek a na čerstvě obrobeném povrchu. Oxidy s nízkou pevností ve smyku napomáhají mazání procesu a snižují tření při konvenčních rychlostech broušení. Mazací účinek oxidů se snižuje s rostoucí řeznou rychlostí. Povrch obrobku vstupujícího do kontaktní zóny, lze považovat za několik vrstev probíhajících od atmosféry dolů k materiálu obrobku. To je schematicky znázorněno na obr. 6 pro broušení s kapalinou.



Obr. 6 Povrchové vrstvy při broušení – podle [2].

Zrna jsou v nástroji náhodně orientována. Jen zřídka se na břitu objeví kladný úhel čela γ , proto se broušení považuje za obrábění s negativní geometrií [3]. Zaoblení ostří zrna r_n se pohybuje v jednotkách mikrometrů. Pokud je zaoblení břitu větší, nedochází k oddělení třísky, ale k jejímu pěchování a tavení. To může vést k ucpávání pórů v nástroji a zhoršení přívodu procesního média. Počet odebíraných třísek se pohybuje v řádu miliónů za minutu [8].

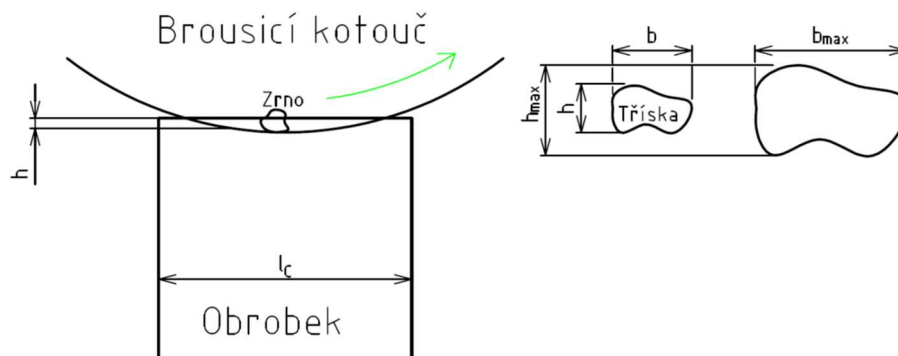


Obr. 7 Pohyb brusného zrna vůči obrobku [9].

Obrázek 7 znázorňuje pohyb brusného zrna vůči obrobku. Vzhledem k velikosti třísek je téměř nemožné měřit jejich rozměry. Rozměry třísky závisí na velikosti daného brusného zrna, nabývají hodnot od 0 po h_{\max} , resp b_{\max} (viz obr. 8). Za předpokladu, že střední délka l_c je rovna délce kontaktní zóny lze uvést vztah (1) pro střední objem třísky.

$$\bar{V}_{cu} = \bar{h} \cdot \bar{b} \cdot l_c \quad (1)$$

kde \bar{h} je střední tloušťka třísky, \bar{b} je střední šířka třísky a l_c je délka kontaktní zóny.



Obr. 8 Velikost třísky - podle [2].

Celkový objem odstraněných třísek se rovná součtu objemu materiálu odebranému z povrchu.

Pro zlepšení kvality obrobku a rozměrové přesnosti je možné zařadit na konec brousícího cyklu tzv. vyjiskření. Jedná se o poslední průjezd brousícího kotouče po geometrii obrobku s nulovou hodnotou záběru ostří. Nástroj tím vyrovná zbytkové nerovnosti z předchozí operace, způsobené například pružnými deformacemi soustavy. Přidání vyjiskření do brousícího cyklu má pozitivní vliv především na výslednou strukturu povrchu (parametry R_a , R_z apod.) [10].

1.2. Síly při broušení

Výkon při broušení (řádově jednotky až desítky kW) se rovná přímo výrobě tepla. Síly procesu, i když jsou významné, nejsou tak vysoké jako v procesech frézování kvůli vysokým řezným rychlostem.

V procesech abrazivního obrábění, jako je honování, lapování a leštění, jsou rychlosti abraziva nižší, což omezuje využitelnou sílu v procesu a tím i rychlost úběru materiálu. Rychlost, kterou lze provést brusnou operaci závisí na síle, kterou lze aplikovat na proces, a na účinnosti odběru materiálu. Jinými slovy, k rychlému odstranění materiálu je potřeba následující [2]:

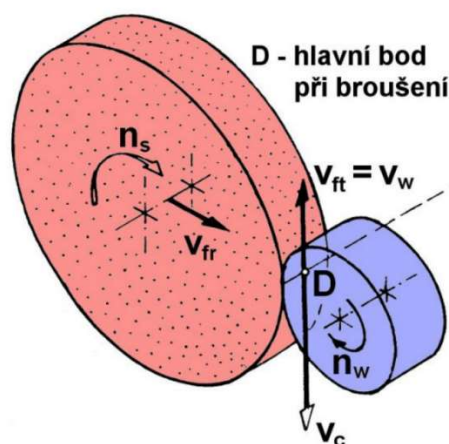
- Vysoká řezná rychlost pro přenos energie do bodu obrábění,
- Ostré brusné nástroje a účinné mazání k minimalizaci potřebných sil a energie,
- Velká plocha kontaktu při obrábění.

Při použití ostrého brusného nástroje jsou síly nízké, práce je dokončena rychle, je vyžadován malý výkon a kvalita provedené práce bude pro správně specifikovaný proces velmi dobrá. Oproti tomu při použití tupého nástroje jsou síly vysoké, stejně jako potřebný výkon, dokončení úlohy trvá dlouho a mohou nastat různé problémy s kvalitou. Typické důsledky těchto jevů jsou vibrace, hluk, nepřesnost výroby, tepelně poškozené obrobky, a dokonce praskání nebo selhání obrábění. Studium sil, tření a energie je tedy o zlepšování kvality, stejně jako o zvyšování výkonu a snižování nákladů procesu [8].

1.2.1 Složky sil při broušení

Nástroj při broušení vykonává rotační pohyb, definovaný jako hlavní řezný pohyb. Obrobek vykonává vedlejší pohyb, buď přímočarý, nebo rotační. Rychlosti a směry pohybů jsou určující pro způsob broušení [1]. Obrázek 9 znázorňuje pohyby při obvodovém broušení rotační plochy. Jedná se o:

- n_s – otáčky brousícího kotouče,
- n_w – otáčky obrobku,
- v_w – obvodová rychlost obrobku,
- v_{ft} – tangenciální rychlost posuvu,
- v_{fr} – radiální rychlost posuvu,
- v_c – řezná rychlost.



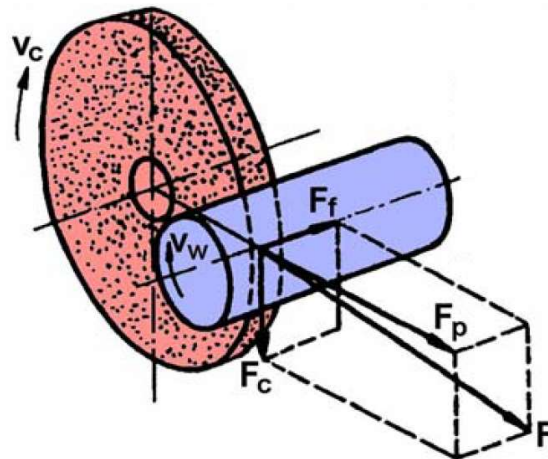
Obr. 9 obvodové broušení rotačních ploch [9].

Vzhledem k tomu, že nástroj má násobně vyšší obvodovou rychlost než obrobek, je jeho rychlost považována za řeznou. Platí vztah (2). Posuv odpovídá vedlejšímu pohybu.

$$v_c = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{60 \cdot 1000} \quad (2)$$

Při brusném obrábění působí síla mezi brousicím nástrojem a obrobkem. Tuto sílu lze rozdělit na tři složky zobrazené na obrázku 10. Každá ze složek má vliv na výkon procesu. Tyto tři komponenty jsou [1]:

- F_c – řezná síla ležící ve směru řezné rychlosti,
- F_p – pasivní síla kolmá k řezné rychlosti,
- F_f – posuvová síla.



Obr. 10 Obvodové axiální broušení do kulata [9]

Celková síla je dána vektorovým součtem těchto složek:

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_p^2 + F_f^2} \quad (3)$$

Při broušení ovlivňují velikost celkové síly vlastnosti obráběného materiálu, způsob broušení, řezné podmínky, zrnitost brusiva, druh a tvrdost pojiva a struktura brusného kotouče.

1.3 Nástroj

1.3.1 Brusiva

Ve všech čtyřech případech abrazivního obrábění musí být abrazivní zrna v místě interakce tvrdší než obrobek. Vzhledem k tomu, že při broušení dochází ke krátkodobému zvýšení teploty, musí brusivo odolávat výraznému poklesu tvrdosti při vysokých teplotách. To platí ve všech brusných procesech bez výjimky, protože pokud je obrobek tvrdší než zrna, brousící nástroj podléhá vysokému opotřebení.

Hodnoty tvrdosti používaných brusných zrn jsou uvedeny v tabulce 1. Pro srovnání je uvedena i nástrojová ocel. Hodnoty jsou přibližné a orientační, konkrétní hodnoty závisí na konkrétní formě brousícího kotouče.

I přesto, že materiál abrazivních zrn vykazuje zvýšenou teplotní odolnost, tak tvrdost ve vyšších teplotách klesá. Při 1000 °C je tvrdost většiny používaných brusiv přibližně na polovině původní hodnoty. Nejvyšší tepelnou odolnost vykazuje kubický nitrid boru [11](CBN – z anglického cubic boron nitride).

Se zvyšující se teplotou klesá také tvrdost obrobku. Jak ukazuje tabulka 1, používaná abrazivní zrna vykazují řádově vyšší tvrdost než běžná konstrukční ocel. Nejběžnějším brusivem je oxid hlinitý a karbid křemíku. Tato brusiva jsou k dispozici v mnoha různých složeních, jsou levná a široce dostupná. Diamantové a CBN brusiva jsou mnohem dražší, ale nacházejí stále větší uplatnění díky své větší tvrdosti a odolnosti.

Tabulka 1 Příklady tvrdosti používaných brusných materiálů [12].

Brusivo	Tvrdost dle Knoop [kg/mm ²]
Diamant	7000
Kubický nitrid boru	4700
Karbid křemíku	2400
Oxid hlinitý	2100
Konstrukční ocel	185

Brusiva se dělí na přírodní a umělá, přičemž naprostá většina používaných brusiv jsou umělá.

- Přírodní brusiva

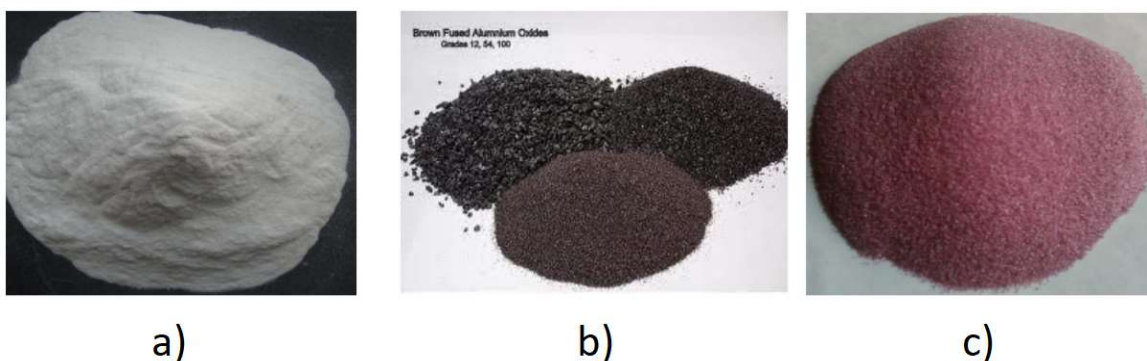
Přírodní diamant se skládá z atomů uhlíku orientovaných v kubické mřížce. Krystaly, které jsou nevhodné k bižuterii (různé nevzhledné vady) se používají na výrobu brusiva [13]. Diamant je drcen a tříděn dle velikosti zrn. Získané fragmenty mají náhodné tvary, ostré hrany, vysokou pevnost a nízkou drobivost. Přírodní diamant má vysokou tepelnou vodivost (2000 W.m⁻¹.K⁻¹) [14].

Diamanty lze použít jako surové diamanty, broušené a leštěné diamanty a diamanty pro vrtací nástroje. Surové diamanty se používají pro výrobu orovnávačů, broušené a leštěné diamanty se používají pro honovací nástroje. Kvůli afinitě k železu je diamant nevhodný k obrábění železných materiálů [14].

Diamant má v průmyslu brusiv jedinečné místo. Jelikož je to nejtvrdší známý materiál, je to nejen přirozená volba pro broušení nejtvrdších a nejobtížnějších materiálů, ale je to také jediný materiál, který dokáže účinně orovnávat brusné kotouče. Diamant je jediné brusivo na kotouče, které se stále získává z přírodních zdrojů. Diamantové materiály se také používají jako povrchy koncových dorazů. U těchto typů aplikací může diamant poskytnout 20–50krát delší životnost než karbidy [2].

- Umělá brusiva

Oxid hlinitý Al_2O_3 (umělý korund) se nejvíce využívá při broušení ocelí. Jeho struktura je kromě oxidu hlinitého složena z příměsí, které udávají i jeho barvu (viz obr. 11). Například červená barva značí příměs chromu, černá barva značí železo, modrou způsobuje titan [15]. Výroba oxidu hlinitého probíhá roztavením slitin obsahujících Al_2O_3 v elektrických pecích za teploty okolo 1260 °C. To je teplota, při které se z roztoku oddělují nečistoty, a oxid hlinitý vykrytalizuje. Zrna umělého korundu jsou houževnatá, tvrdá, avšak jejich břity jsou například oproti karbidu křemíku méně ostré [3]. Oxid hlinitý má špatnou tepelnou vodivost (cca $33,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), je tedy nutné zajistit chlazení místa řezu.



Obr. 11 Umělý korund, a) bílý, b) hnědý, c) růžový [16].

Karbid křemíku (SiC) je nákladnější na výrobu oproti korundu, avšak jeho výhodou je lepší odolnost vůči opotřebení. Výroba probíhá za teploty okolo 2000 °C v odporové peci [17]. Dochází k pálení směsi koksu a křemičitého písku dle rovnice (4). Jedná se o dlouhý (až 36 hodin) a nákladný proces, navíc jsou zapotřebí čisté vstupní suroviny [3].



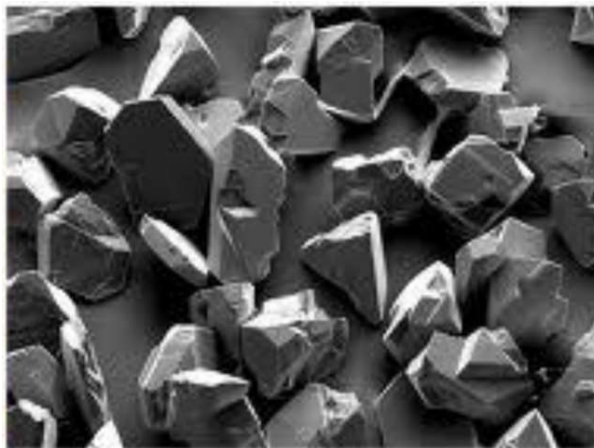
Po ochlazení je karbid křemíku drcen a tříděn podle barvy od zelené (čistota 97-99%) po černou (čistota 97% a nižší).

Brusivo SiC je vidět na obrázku 12 a používá se k obrábění drobných materiálů s nízkou pevností v tahu, jako jsou litina, bronz, hliník či sklo. Při teplotách nad 700 °C SiC vykazuje chemickou reaktivitu vůči kovům s afinitou k uhlíku (železo či nikl) [14]. Na broušení železných materiálů tedy není vhodný.



Obr. 12 Karbid křemíku [16].

Kubický nitrid bóru (CBN) je alotropická krystalická forma nitridu boru, která téměř odpovídá tvrdosti diamantu. CBN kromě své tvrdosti vyniká tepelnou stabilitou, která je vyšší než u diamantu. Díky tomu je možné jej používat až do 1900 °C [11]. Kubický nitrid bóru je chemicky odolný vůči slitinám železa. Používá se k broušení vysoce kvalitních nástrojových ocelí [8]. Zrna CBN jsou zobrazena na obrázku 13.



Obr. 13 Kubický nitrid boru [16].

Syntetický diamant (viz obr. 14) se vyrábí přeměnou grafitu za vysokých teplot a tlaků. Teploty se pohybují v rozmezí 1400-2500 °C a tlaky 5,5 až 13 MPa [18]. Při přeměně grafitu jsou užity katalyzátory, jako je železo, nikl, titan, či kobalt. Ve srovnání s přírodním diamantem je syntetický drobivější a drsnější. S rostoucí velikostí krystalu syntetického diamantu exponenciálně rostou náklady na výrobu. U větších krystalů používaných k výrobě orovnávačů je stále ekonomicky výhodnější použít přírodní diamant.



Obr. 14 Syntetický diamant [16].

1.3.2 Zrnitost

Zrnitost brusného kotouče udává velikost brusných zrn. Obecně platí, že čím vyšší je zrnitost, tím jemnější zrna jsou v kotouči použita. Je definována jako počet ok síta na délce hrany čtverce jednoho palce (25,4 mm), kterým zrna ještě propadnou. Jemnější zrna, která by již sítím nebyla možná měřit, se označují délkou v minutách potřebnou k sedimentaci. [1] Zde platí čím delší doba, tím jemnější zrna. Příklady zrnitosti jsou uvedeny v tabulce 2.

Tabulka 2 Dělení brusných zrn [17].

Druh	Číslo zrna	Měrný rozměr zrna [μm]		Použití (informativně)
		od	do	
Brusná zrna hrubá	4	5000	4000	Ve zvláštních případech
	6	4000	3150	
	8	3150	2500	
	10	2500	2000	
	12	2000	1600	
	14	1600	1250	Hrubování
	16	1250	1000	
	20	1000	800	
	24	800	630	
	30	630	500	
36	500	400		
Brusná zrna střední	46	400	315	Strojní části, ostření nástrojů
	60	315	250	
	70	250	200	
	80	200	160	
	100	160	125	
	120	125	100	
Brusná zrna jemná	150	100	80	Předhlazení
	200	80	63	
	240	63	50	
	280	50	40	
	320	40	32	
Mikrozrna	M32	32	32	Dohlazení, konečné lapování
	M22	22	15	
	M15	15	10	
	M10	10	7	
	M7	7	5	Ve zvláštních případech
	M5	5	3	
	M3	3	---	

Zrna číslo 4 až 320 jsou tříděna sítí, zrna M32 až M3 plavením

1.3.3 Pojiva

Účelem pojiva je sdružovat zrna brusiva v brusném nástroji, dokud jsou ostrá. Pokud je pojivo správně zvoleno, dochází k vylamování brusných zrn ve chvíli, kdy ztratí svoji ostrost. Vylomením vrchní vrstvy dojde k uvolnění spodních, ostrých zrn. Množství, druh a zpracování pojiva určuje výslednou tvrdost brusného nástroje. Je tedy možné ze stejných brusných zrn vytvořit nástroje s různou výslednou tvrdostí. Pojivo v brusném kotouči má také značný vliv na odvod tepla z oblasti řezu [14]. Většina užívaných pojiv se dá sdružit do tří následujících kategorií:

- keramická pojiva,
- pryskyřice,
- kovová pojiva.

Mimo to existují i další skupiny, co do četností použití ale ne tak důležitá. Jsou to například:

- pryž,
- silikátová pojiva,
- šelak.

Keramická pojiva jsou využita ve více než 75% všech brousicích kotoučů [11]. Vyrábí se vysokoteplotním vypalováním z keramických surovin (například živec, kaolin, mastek). Směs brusiva, pojiva, vody a dalších přísad se lisuje do formy obvykle za pokojové teploty. Lisování se provádí buď za konstantního tlaku, nebo za konstantního objemu. Po lisování a vysušení je dostatečně pevné, aby bylo mechanicky přemístěno do pece, kde je vypáleno za přesně řízeného časového a teplotního cyklu. Teplota dosahuje až 1380 °C [1]. Výhodou keramických pojiv je vysoká teplotní stabilita, tuhost a schopnost dosažení vysoké pórovitosti nástroje, která zajišťuje přívod chladicího média do místa řezu. Jedná se o křehké pojivo náchylné na nárazy, může dojít k vylomení části nástroje [1].

Pryskyřičné vazby pokrývají širokou škálu organických vazeb vyrobených lisováním za tepla při relativně nízkých teplotách (například do 200 °C [11]) a vyznačují se měkkou povahou řezání, nízkou teplotní odolností a strukturální poddajností. Nejměkčí vazby nemusí být ani lisovány, ale pouze smíchány v kapalné formě s brusivem a nechány vytvrdnout.

Na základě pevnosti a teplotní odolnosti je lze dělit do tří skupin – plasty, fenolovou pryskyřici a polyamidovou pryskyřici. Plastová pojiva jsou tvořena nejčastěji epoxidovými vazbami a jsou nejměkčí. Výrobní náklady a doby cyklu jsou nízké, využívají se při broušení ocelí citlivých na hoření. Fenolová pryskyřice (známá jako bakelit) se skládá z termosetových pryskyřic a změkčovadel, které se vytvrzují při teplotě přibližně 150 až 200 °C. Dominují v sektoru hrubého broušení a řezání. Polyamidová pryskyřice se začala využívat v 60 letech minulého století a nachází uplatnění především u broušení karbidů. Houževnatost je oproti fenolu 5-10 krát vyšší a vydrží teploty až do 300 °C [2].

Kovové vazby se používají především s diamantovým brusivem. Během slinování kovové pojivo změkčuje a smáčí diamantovou drť [11]. Díky vynikajícímu zachování zrnitosti a vysoké odolnosti proti abrazivnímu opotřebení vznikají kotouče vhodné pro broušení křehkých materiálů, jako je sklo a keramika [14]. Samoostření je možné pouze při

vysokých brusných silách. Nevýhodou kovových pojivových kol je vysoká teplota slinování nutná k roztavení kovové fáze, což vede k vysokým výrobním nákladům.

Gumové (pryžové) pojivo se využívá na výrobu pružných brousicích kotoučů. Svoji pevnost ztrácí od 150 °C, vždy je nutné použít chladicí médium. Výroba gumových vazeb je z ekologických důvodů stále velkým problémem. Hledají se alternativy, kde je to možné [3].

Šelak (neboli „elastické“) pojené kotouče byly poprvé vyrobeny v roce 1880 a díky kombinaci pružnosti a pružnosti pravděpodobně stále představují dobrou volbu pro výrobu jemných povrchů [14]. Šelak pochází z tekutin vylučovaných hmyzem, jako takový je velmi variabilní jak dostupností, tak vlastnostmi v závislosti na povětrnostních podmínkách a druhu.

Silikátové vazby se vyrábí ze směsi hlíny, křemičitého prachu a vodního skla. Po lisování a sušení se vypaluje za nízkých teplot do 300 °C. V některých částech světa je stále populární kvůli jednoduchosti a nízkým výrobním nákladům. Vyrábí se z něj především kotouče velkých rozměrů s nízkými řeznými rychlostmi na dřevo, papír apod [3].

Přehled používaných pojiv je uveden v tabulce 3.

Tabulka 3 Druhy pojiva [17].

Druh pojiva	Označení dle ČSN 22 4010	Složení	Použití
Keramické	V	Směsi různých křemičitanů	Základní pojivo normálních kotoučů s výjimkou prořezávacích
Silikátové	S	Alkalické křemičitany	Omezené použití, např. pro měkké tvarové kotouče nebo drobné nástroje
Magnezitové	O	Cementové pojivo z magnezitu aj.	Omezené použití pro méně přesné broušení
Přírodní šelak	E	Organická látka	Menší pevnost než bakelit, nástroje na ozubení apod.
Pryž	R	Vulkanizovaná s přídavkem síry	Pro velké rychlosti, hladký povrch obráběný
Umělé pryskyřice	B	Bakelit	Po keramickém nejdůležitější pojivo. Vhodné pro broušení závitů a pro nárazové broušení
Kovové	-	Slitiny mědi, lehké kovy, litina aj.	Pro diamantové kotouče

1.4.4 Orovnávání brousicích kotoučů

Jak je vysvětleno v kapitole pojiva, brousicí kotouč se v ideálním případě sám „ostří“ vylamováním zrn ve chvíli, kdy ztratí ostrost. Takový kotouč ale není vždy dostupný, proto se v praxi využívá kotouče s pevnějším pojivem. Zrna, která ztratí svoji ostrost tak zůstanou ve své pozici. Tím vzroste řezný odpor, dochází k navýšení teploty v místě řezu, vzniklé třísky se nalepí na nástroj a ucpou mezery mezi zrna. V krajním případě dojde až k tavení obrobku.

Možností, jak vrátit brusnému kotouči jeho brusné vlastnosti, je tzv. orovnění. Jedná se v podstatě o jemné obrobení brusného kotouče. Nástroj zvaný orovnávač upraví geometrii kotouče, odstraní otupená brusná zrna a obnoví mezery mezi jednotlivými zrna [13]. Vzhledem k tomu, že dojde k úpravě geometrie (zpravidla ke zmenšení), musí po orovnění přijít patřičná korekce.

Aby bylo možné obrobit brusné kotouče, musí být materiál orovnávače tvrdší. Proto se používá diamant, nejtvrdší řezný materiál. Vysoké pořizovací náklady na diamantový kotouč vyváží jeho trvanlivost, kdy takový nástroj vydrží v provozu až několik měsíců. Aby mezi nástrojem a orovnávačem nedocházelo ke chvění, musí být oba nástroje dobře vyváženy. Při častém orovnávání brusného kotouče je vhodné zvolit malé hodnoty šířky záběru ostří (řádově tisícin až setiny mm) [14], aby nebyla zbytečně snížena životnost brousicího kotouče. Při orovnávání větších nepravidlostí je vhodné zvolit nejprve bezdiamantový orovnávač.

Podle počtu vsazených diamantů rozeznáváme orovnávače [13]:

- jednokamenové
- vícekamenové
- prachové



Obrázek 15 Prachový diamantový orovnávač [19].

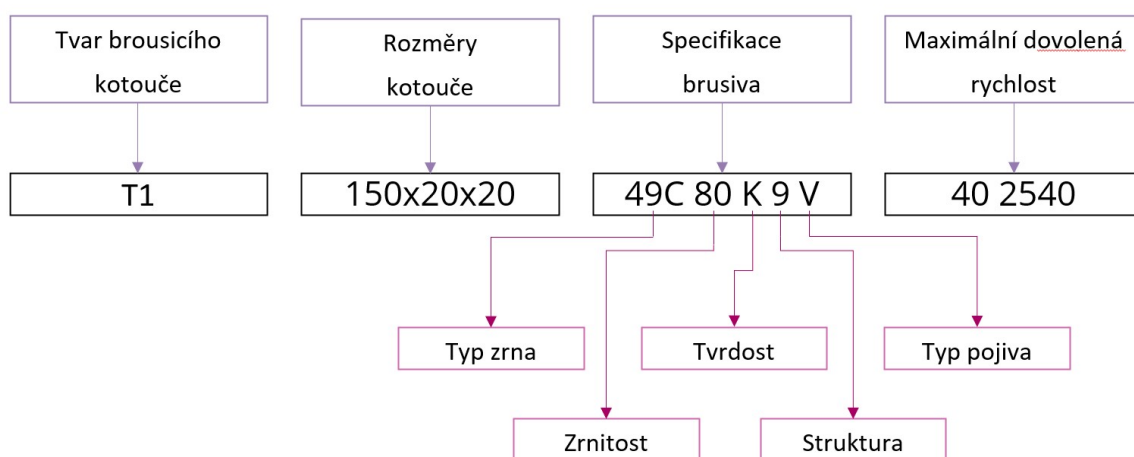
Pro jednokamenové diamantové orovnávače se používají větší krystaly diamantu, které jsou v rámci možností upraveny. V ideálním případě mají malý vrcholový úhel v místě, kde dochází ke kontaktu s kotoučem. Do držáku jsou upevněny tvrdou pájkou [20].

Více kamenové orovnávače lze rozdělit do dvou skupin. V první skupině orovnává více menších kamenů současně v jedné rovině. U druhého typu pracují jednotlivé kameny samostatně. Jsou spojené s úhelníkem a snadno vyměnitelné. Díky použití menších kamenů jsou oproti jednokamenným levnější [13].

Prachové orovnávače jsou obdobou brousících kotoučů. Diamantová zrna jsou slinována kovovým pojivem. Lze tak vytvořit různorodou geometrii na orovnávání tvarových kotoučů. Zrnitost diamantových zrn by měla být dvojnásobná oproti brusnému kotouči. Příklad prachového orovnávače je zobrazen na obrázku 15.

1.3.5 Značení brousících kotoučů

Brousící kotouče jsou v katalozích výrobců značeny identifikačním číslem, podle kterého lze vyčíst důležité parametry daného nástroje. Jsou v něm specifikovány tvar kotouče, jeho rozměry, charakter brusiva, pojiva apod. Na obr. 16. je zobrazen klíč značení brousícího kotouče z katalogu firmy Tyrolit.



Obrázek 16 Značení brousícího kotouče - podle [21].

1.4 Teplo při broušení

Stejně jako u soustružení i při broušení je úběr třísky doprovázen vnikem tepla v oblasti řezu. Téměř 100% mechanické energie se mění na teplo. Platí vztah (5) [22]:

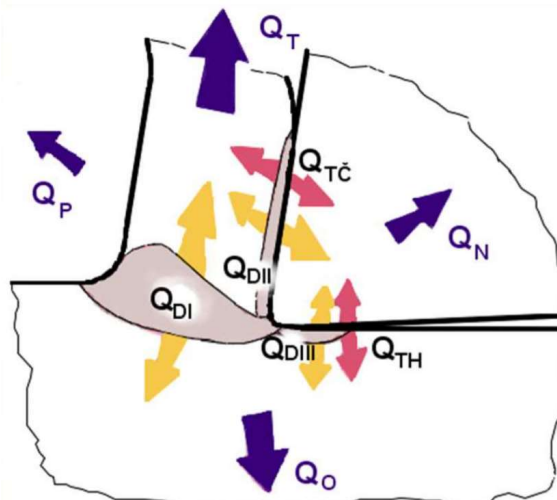
$$Q = F_c \cdot v_c \cdot t \quad [J] \quad (5)$$

kde Q – vzniklé teplo,
 F_c – řezná síla [N],
 v_c – řezná rychlost [m/min],
 t – čas obrábění [min].

Vzniklé teplo jsou absorbovány do pěti hlavních prvků obráběcího procesu – nástroje, obrobku, třísky, prostředí a řezné kapaliny (viz obr. 17). Platí tedy rovnice (6) [22]:

$$Q = Q_N + Q_O + Q_T + Q_P + Q_K \quad [J] \quad (6)$$

kde Q – vzniklé teplo,
 Q_N – teplo odvedené do nástroje [J],
 Q_O – teplo odvedené do obrobku [J],
 Q_T – teplo odvedené třískou [J],
 Q_P – teplo odvedené do prostředí [J],
 Q_K – teplo odvedené procesní kapalinou [J].



Obr. 17 Tepelná bilance [23].

Dobře navržené procesy abrazivního obrábění obvykle zvyšují kvalitu povrchu obrobku, produkují nízkou drsnost, tlakové nebo neutrální zbytkové napětí a zlepšují životnost. To platí zejména pro lapování, leštění a honování, ale také pro jemné broušení [14].

Naopak hrubé obrábění může vést k řadě forem poškození povrchu. Obecně platí, že čím vyšší je teplota obrábění, tím větší je poškození povrchu. Tepelné efekty jsou obvykle škodlivé pro integritu povrchu, jak ukazují příklady níže. Příčiny poškození povrchu jsou nejčastěji z následujících důvodů [2]:

- růst zrn z důvodu zvýšené teploty – zhoršené mechanické vlastnosti,
- fázové přeměny vedoucí k opětovnému vytvrzení,
- zbytková tahová napětí, nebezpečí vzniku prasklin,
- chemické reakce vedoucí ke zvýšené oxidaci.

1.4.1 Změna barvy

Barvy vzniklých oxidů jsou nejviditelnějšími a často prvními známkami pozorovanými v souvislosti s tepelným poškozením. U běžných ocelí vznikají první známky zbarvení při teplotě již od 300 °C [24]. První známky zbarvení se projevují změnou odlesku světla, při vyšších teplotách se povrch součásti zbarví do tmavě modra. Toto poškození je pouze vizuální, avšak většinou je spojeno s jinou vadou povrchu viz. další kapitoly.

1.4.2 Změkčení

Při broušení tepelně zpracovaných materiálů (zpravidla kalených) může dojít ke snížení tvrdosti během broušení. K tomu dochází již při teplotách nižších než 400 °C [25] a ne vždy je doprovázeno zbarvením povrchu. Jedná se o časově závislý proces, kdy ke změknutí povrchu dochází při delší výdrži na teplotě. Tento proces by se dal přirovnat k popouštění po kalení [8].

1.4.3 Opětné vytvrzení

Pokud se při broušení dosáhne teplot, které vedou k přeměně struktury do oblasti austenitu, dojde na povrchu k opětnému vytvrzení. Transformace na martenzit je rychlá (řádově tisíce sekund), protože není nutná žádná difúze [25]. Materiál se po broušení rychle ochladí kvůli nízké teplotě vlastního materiálu pod povrchem. Kalení vede k tenké vrstvě křehkého martenzitu, který je náchylný k praskání. Ve větších hloubkách je maximální dosažená teplota nižší než na povrchu, stejně tak rychlost ochlazování je nižší. To vede k změkčené vrstvě pod tvrdou vrstvou [8].

1.4.4 Zbytková napětí v tahu

Zahřívání povrchu je doprovázeno tepelnou roztažností a smršťováním. Nejprve teplota rychle stoupá a povrchová vrstva se rozpíná. Zvýšením teploty zároveň klesá mez kluzu v povrchové oblasti. Při překročení snížené meze kluzu dochází k plastické deformaci i mimo oblast řezu. Po zahřátí a plastickém deformování povrch ochlazuje, smršťuje se a vytváří zbytková napětí v tahu. Pokud zbytkové napětí překročí mez kluzu, dochází opět k plastické deformaci, při překročení meze pevnosti až k prasklinám povrchu.

Zbytková napětí v tahu jsou škodlivější než zbytková napětí v tlaku, i když v některých aplikacích mohou být zbytková napětí v tlaku také považována za nežádoucí [2].

1.4.5 Mechanicky vyvolaná napětí

Ve většině případů má nízkoteplotní abrazivní obrábění tendenci zlepšovat fyzikální vlastnosti povrchu v důsledku mechanických účinků, zatímco vysokoteplotní abrazivní obrábění má tendenci povrch poškozovat v důsledku tepelných účinků.

Primární mechanický účinek abrazivního obrábění je způsoben účinkem vtlačování tupých abrazivních zrn do tvárného povrchu za vzniku tlakových napětí stejným způsobem jako otryskávání nebo otryskávání povrchu. Tento účinek je obvykle prospěšný. V materiálu tím vznikají tlaková napětí, která zlepšují mechanické vlastnosti [2].

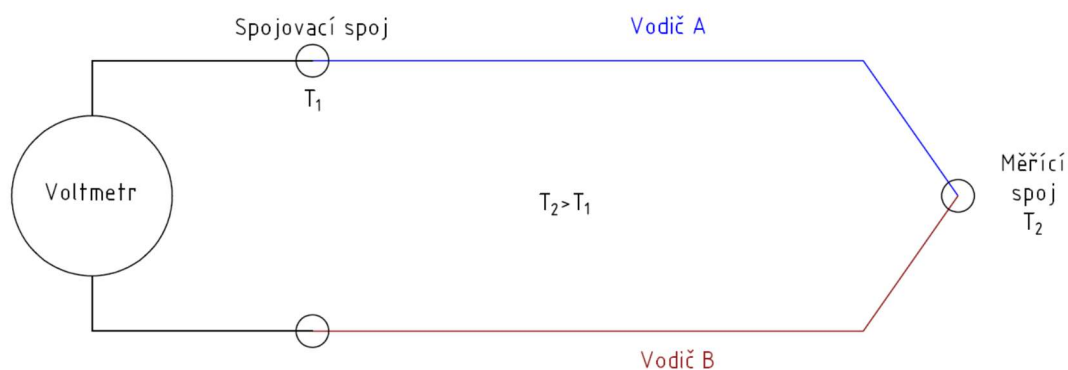
1.5 Metody měření teploty při obrábění

Existuje několik možností měření teploty, přičemž ne všechny jsou využitelné při stojním obrábění. V praxi lze měření teploty při obrábění rozdělit do čtyř skupin [26]:

- termočlánky,
- termistory,
- zařízení měřící tepelné záření,
- teplotní indikátory.

1.5.1 Termočláanky

Měření pomocí termočláanky využívá tzv. termoelektrického jevu. Dva vodiče z různého materiálu jsou spojeny do obvodu dle obr. 18, přičemž měřicí spoj je umístěn do místa s neznámou teplotou a spojovací spoj do místa se známou teplotou (typicky teplota okolí). Díky tomu, že oba konce mají rozdílné teploty, vzniká tzv. termoelektrické napětí, které je měřeno připojeným voltmetrem [26]. Je důležité vhodně zvolit materiály obou vodičů a také termočláanek správně zkalibrovat.



Obr. 18 Schéma termočláanky - podle [27].

Jako vodiče termočláanky lze v určitých případech možné použít i tělo nástroje, či obrobek. V závislosti dle provedení lze termočláanky rozdělit na [26]:

- umělé,
- poloumělé,
- přirozené,
- termoduo.

Umělé termočláanky využívají dvou externích vodičů přivedených co nejbližší k měřenému místu. Umělého termočláanky bývá využíváno při měření teploty vyměnitelných břitových destiček, kdy je v těle nástroje dutina, kterou jsou přivedeny vodiče k destičce. Jako izolace se používají skleněné, nebo keramické trubičky [9].

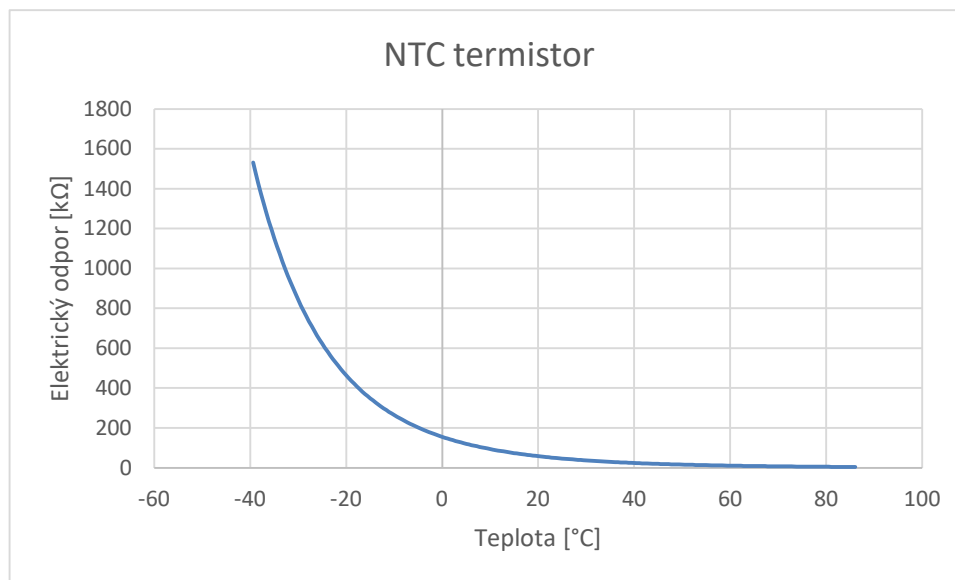
Poloumělý termočláanek využívá jak jeden z vodičů nástroj, či obrobek. Výhodou je snadnější aplikace, neboť stačí k místu měřené teploty přivést pouze jeden vodič.

Přirozený termočláanek nevyužívá žádný externí vodič, jednou částí termočláanky je obrobek, druhou nástroj [9]. Měřicí bod je místo styku nástroje s obrobkem, tj. místo řezu. Nevýhodou přirozeného termočláanky je nutnost v ostatních místech odizolovat nástroj a obrobek a nutná kalibrace pro jednotlivé dvojice materiálů.

Termoduo je tvořeno dvěma nástoji o různém materiálu, které současně obrábí vodivý obrobek za stejných řezných podmínek. Kalibrace je pak nezávislá na materiálu obrobku.

1.5.2 Termistory

Měření pomocí termistorů využívá změnu elektrického odporu v závislosti na teplotě. Měřením odporu termistoru je tak možné dopočítat teplotu. Z hlediska charakteristiky závislosti se termistory dělí na PTC a NTC. U PTC termistorů odpor roste s rostoucí teplotou, u NTC klesá (viz obr. 19).



Obr. 19 Příklad závislosti odporu na teplotě - podle [28].

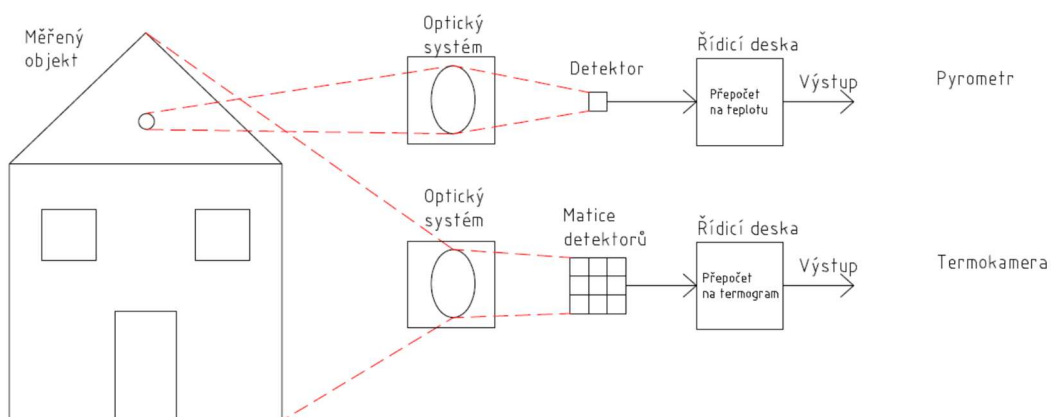
1.5.3 Zařízení měřící tepelné záření

Mezi rozšířené metody měření povrchové teploty v dané oblasti patří přístroje měřící tepelné záření. Ty se dají rozdělit do dvou hlavních kategorií [29]:

- pyrometry,
- termokamery.

Pyrometry (neboli infračervené teploměry) snímají teplotu ve vymezené oblasti, výstupem je tedy často číselná hodnota vyobrazená na displeji. Oproti tomu termokamery jsou schopny měřit rozložení teploty na snímaném objektu. Toto rozložení je vyobrazeno na tzv. termogramu [29].

Zjednodušené uspořádání pyrometru, či termokamery je znázorněno na obrázku 20. Měřený objekt vyzařuje tepelné záření, které proniká do optického systému měřícího zařízení. Optický systém jednak usměrní záření na detektor (nebo matici detektorů), ale také částečně vyfiltruje. Na detektory dopadá záření v daném intervalu vlnové délky (například 8 až 14 μ m). Součástí pyrometru je jeden detektor, proto je výstupem průměrná hodnota teploty v měřené oblasti. Většina termokamer využívá skupinu detektorů uspořádaných do matice, díky čemuž je schopna vyhodnotit tepelné pole.



Obr. 20 Zjednodušené schéma pyrometru a termokamery - podle [30].

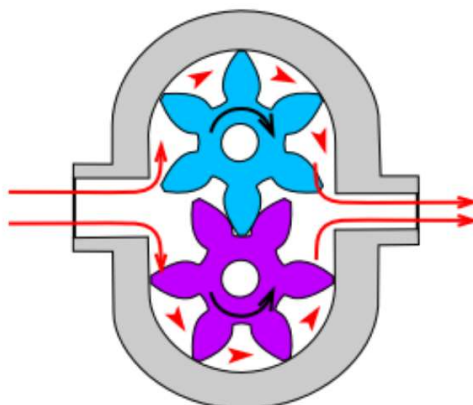
Detektory (nebo také tepelné senzory) mohou zaznamenat změnu teploty působením záření. Jedná se o mikrobolometry (citlivé odporové teploměry), které jsou v termkamerách nejrozšířenější díky širokému intervalu vlnových délek. Dále se jako tepelné senzory využívá fotodiod, nebo fotorezistorů. Působení tepelného záření na tyto senzory vyvolá elektrický signál (například změnu napětí), který je následně vyhodnocen. Tyto senzory jsou přesnější, avšak pracují pouze v omezeném intervalu teplot [30].

1.5.4 Teplotní indikátory

Velmi jednoduchou možností zjišťování teploty jsou indikátory. Ty jsou naneseny na měřený povrch a po dosažení určité teploty (závisí na daném indikátoru) dojde k viditelné změně, například ke změně barvy, skupenství apod. Jako indikátory se používají speciální barvy, tužky, křídly, nebo vosky. Nevýhodou této metody je omezený rozsah teplot. Také je výstupem pouze čas, kdy dojde k dosažení předepsané teploty indikátoru [26].

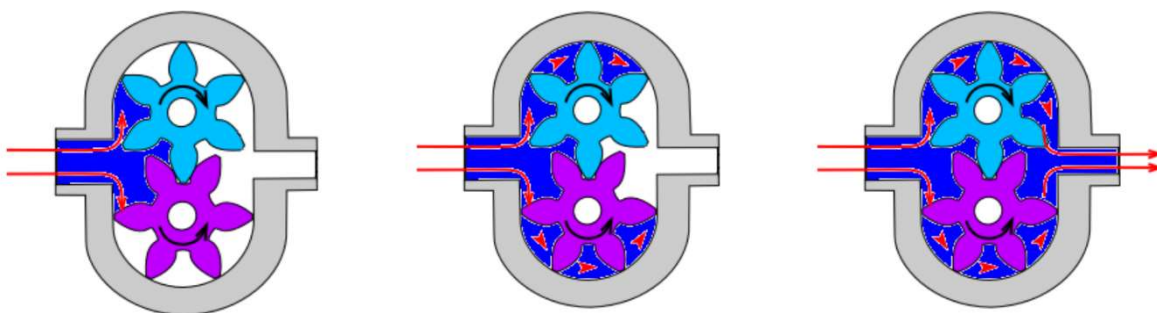
2 ZUBOVÉ ČERPADLO

Zubové čerpadlo schematicky zobrazené na obrázku 21 se skládá z dvojice ozubených kol s evolventním ozubením. Ozubená kola jsou označena jako primární a sekundární. Tvarově jsou téměř totožné, Rozdílem je pouze drážka pro unášec na primárním ozubeném kole. Krouticí moment je z hřídele přenášen na primární ozubené kolo (tzv. Hnací) které přes zuby pohání sekundární (tzv. hnané).



Obr. 21 Schema zubového čerpadla [31].

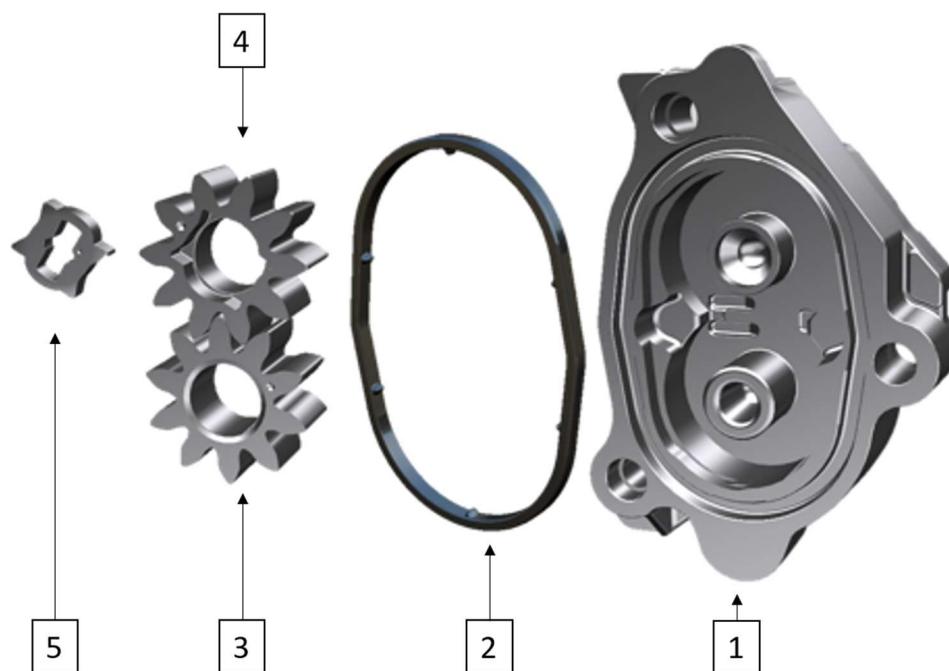
Uložení ozubených kol v zubovém čerpadle je velice těsné, vůle mezi průměrem kola a tělesem se pohybuje v řádech mikrometrů. Díky tomu je dvojice ozubených kol schopná unášet čerpanou kapalinu po vnější straně čerpadla a zároveň těsnit mezi sebou – kapalina neprochází mezi ozubenými koly. Na vstupní straně je vytvořen podtlak, který nasává kapalinu do pracovního prostoru. Po průchodu tělesem je kapalina vytlačena výstupním otvorem (viz obr. 22) [32].



Obr. 22 Princip proudění kapaliny zubovým čerpadlem [31].

Směr otáčení primárního kola určuje směr proudění kapaliny čerpadlem, z čehož plyne, že při změně směru otáčení se změní pozice přívodu a vývodu. Schopnost obousměrného proudění je jednou z charakteristických výhod zubového čerpadla.

Další výhodou je schopnost zubového čerpadla nasát kapalinu do prostoru čerpadla i ve chvíli, kdy je umístěno nad úroveň hladiny paliva. To je možné díky těsnému uložení ozubených kol v tělese, kdy čerpadlo “odčerpá” vzduch a vytvoří částečné vakuuum. Snížený tlak způsobí zvýšení hladiny daným potrubím a nasátí kapaliny [32].



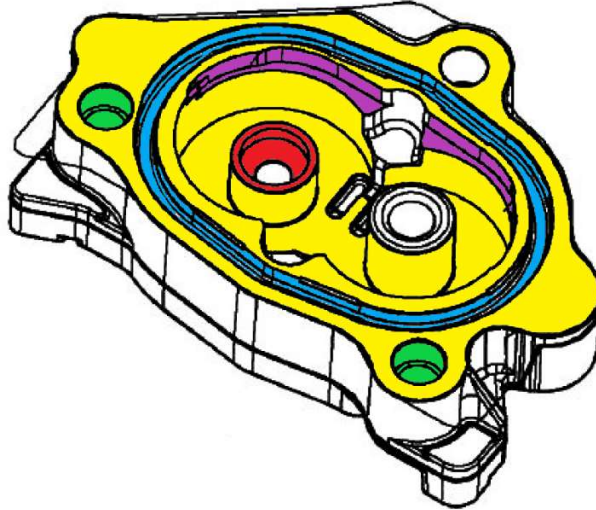
Obr. 23 Sestava zubového čerpadla:

1. těleso,
2. těsnící kroužek,
3. sekundární ozubené kolo,
4. primární ozubené kolo,
5. unašeč (pro přenos kroutícího momentu).

Zubové čerpadlo (jehož komponenty jsou ukázány na obrázku 23) je využíváno v palivovém systému Common Rail u automobilů. V zásobníku (railu) je pomocí vysokotlakého palivového čerpadla generován tlak potřebný k vstřikování paliva. Pomocí krátkých potrubí je vedeno k jednotlivým ventilům, které jsou ovládány buď elektromagneticky, nebo piezoelektricky [33]. Schema vstřikovacího systému je zobrazeno na obrázku 24.

Zubové čerpadlo díky své schopnosti pracovat nad hladinou zajišťuje nasávání paliva do vysokotlakého čerpadla.

na těsnění (na obrázku 25 modře), zahloubení pro hřídel přenášející krouticí moment (červeně), odlehčení (fialově) a mezikruží pro ozubená kola.



Obr. 25 Těleso zubového čerpadla.

Z každé výrobní dávky probíhá na dvou kusech 100% kontrola rozměrů na speciálním měrovém středisku v rámci výrobního závodu. Výrobní dávka činí 384 kusů. Vybrané (nejdůležitější) rozměry pravidelně měří také obsluha stroje, kde se kontrolují především otvory na ozubená kola, aby je poté při montáži bylo možno párovat.

- OP20 - Praní – vysokotlaké odjehlení

Odjehlení ostrých hran probíhá vodním paprskem v automatické pračce pod vysokým tlakem. Kromě odjehlení součásti dochází díky působení vody také k vyčistění od třísek. Následně probíhá sušení. Po odjehlení probíhá vizuální kontrola a opět proběhne kompletní měření vybraných kusů z výrobní dávky.

- Kooperace – povrchová úprava

Poniklování

Niklování patří mezi základní elektrochemické procesy pokovování, které slouží pro zvýšení korozní odolnosti vyloučeného konečného povlaku. Kromě odolnosti vůči korozi, poniklování zlepšuje vzhled, zvyšuje tvrdost a mírně zlepšuje i přirozenou pórovitost hliníku zalepením povrchových pórů.

- Vstupní kontrola

Po povrchové úpravě jsou tělesa připravena k montáži. Před ní je ještě provedena vstupní kontrola, kde se měří tloušťka a tvrdost povrchové vrstvy.

2.2.2 Broušení ozubených kol

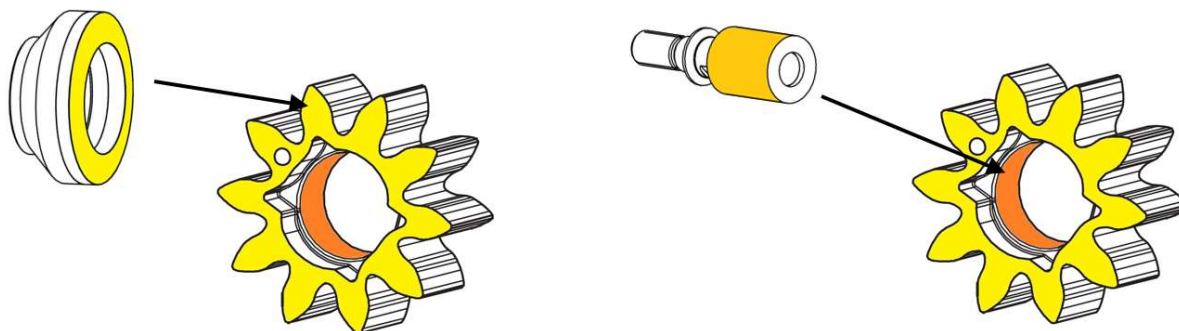
- Polotovar

Polotovarem pro ozubená kola je sintrovaný materiál od externího dodavatele. Velkou výhodou je, že tvar zubů na polotovaru je dostatečně přesný a není je třeba nadále obrábět.

Jednotlivými kroky procesu obrábění kol jsou:

- OP10 – Broušení prvního čela a díry

Obsluha vkládá do stroje celá plata s ozubenými koly, vše ostatní je automatizováno. Nejprve podavač přemístí ozubené kolo ke kameře, která ověří správnost vyráběného typu a poté jej upne do stroje, který má 2 nástrojová vřetena. Ta jsou ve stroji kvůli sjednocení taktu stroje v operaci 10 a 20. Probíhá zde broušení prvního čela a díry viz obr. 26.



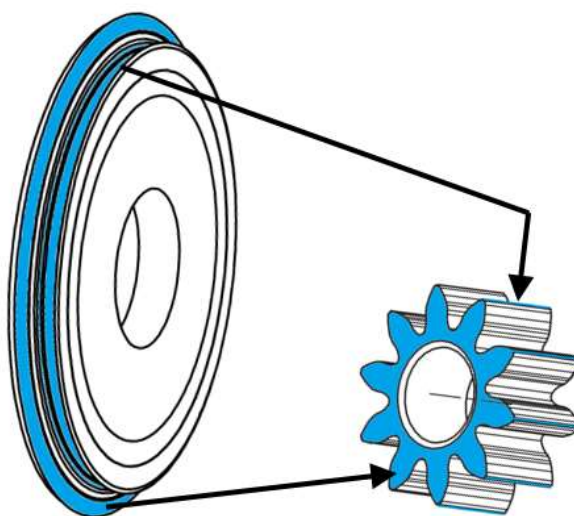
Obr. 26 Obrábění v OP10.

Po obrobení proběhne automatická kontrola průměru díry uvnitř stroje. Měřová stanice vyřadí případné neshodné kusy. Dobré kusy jsou zařazeny do speciálního přípravku (tzv. magazínu) pro snadnou manipulaci mezi operacemi. Každý přípravek přenáší 30 kusů.

Obsluha stroje měří v pravidelných intervalech výšku ozubeného kola, případně hloubku osazení pro unašeč mikrometrem. Vzorek z výrobní dávky je také posílán na speciální měrové středisko, kde jsou kontrolovány veškeré rozměry dle výkresové dokumentace. Po schválení je celá dávka uvolněna k další operaci.

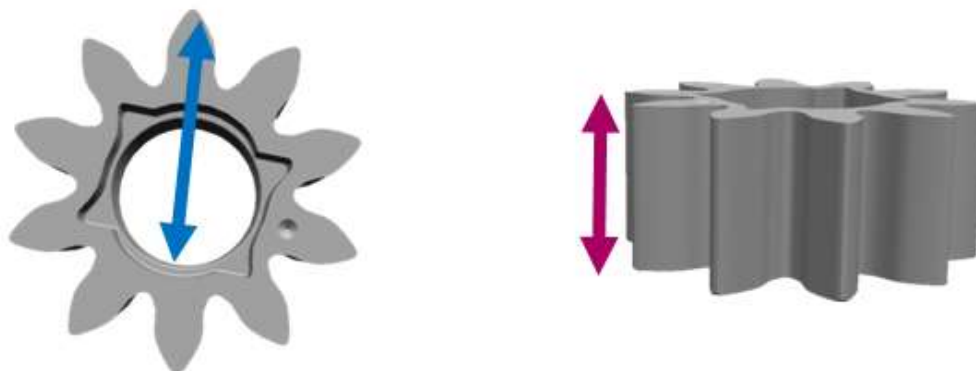
- OP20 – Broušení druhého čela a vnějšího průměru

Obsluha vkládá celé přípravky do stroje, vše ostatní je automatizováno. Podavač opět přemístí ozubené kolo ke kameře, která ověří správný typ a natočení. Poté je ozubené kolo upnuto od brusky za díru a proběhne broušení vnějšího průměru a druhého čela (viz obr. 27).



Obr. 27 Obrábění v OP20.

Zde se dokončují rozměry B-Mass a S-Mass (viz obr. 28), které jsou důležité pro následnou selektivní montáž. Rozměr B-Mass představuje vzdálenost vnějšího průměru od protilehlého vnitřního průměru a S-Mass je výška ozubeného kola.



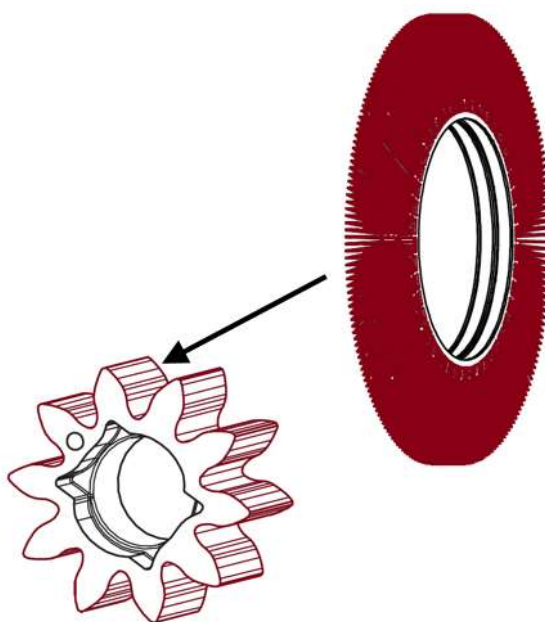
Obrázek 28 Rozměry B-Mass a S-Mass.

Měrová stanice uvnitř stroje provede automatické měření těchto rozměrů a podavač poté roztrídí kolečka do jednotlivých přípravků (magazínů). Od operace 20 tak přípravky obsahují pouze kolečka o stejné třídě. Ta je zapsána do čipu na přípravku.

Pro kontrolu jsou 3 kusy z výrobní dávky 100% měřeny na měrovém středisku, zda vyrobené kusy odpovídají výkresové dokumentaci. Vybrané rozměry měří také obsluha stroje v předepsané četnosti.

- OP30 – Kartáčování

Odjehlení ostrých hran po broušení probíhá kartáčováním. Plastové kartáče obsahují křemičité abrazivo, jehož působením dochází k odjehlení. Ve stroji jsou tři kartáče pro odjehlení obou čel a zubů. Během kartáčování se otáčí jak nástroj, tak obrobek. Před zařazením kolečka do přípravku ještě proběhne odvod nečistot stlačeným vzduchem.



Obr. 29 Obrábění v OP30.

Obsluha stroje provede namátkovou vizuální kontrolu po kartáčování, zda proběhlo odjehlení součástí, či nedošlo k jiným vizuálním vadám.

- OP40 – Praní

Před montáží je nutné ozubená kola očistit, především od mastnoty. K tomu je využívána ultrazvuková pračka, do které jsou vkládány celé přípravky s ozubenými koly. Ultrazvukové praní také zajistí pasivaci povrchu ozubených kol.

2.2.3 Montáž

Vzhledem k tomu, že předepsaná vůle mezi průměrem ozubeného kola a tělesem je velmi malá, je na montážní lince aplikována metoda výběrová (selektivní). Z technologického hlediska by bylo náročné vyrábět díly s dostatečnou přesností pro dodržení této vůle, proto se součásti vyrábí s širším pásmem tolerance. Následně jsou součásti roztrženy do skupin podle skutečného rozměru. Při montáži jsou párovány skupiny zajišťující předepsanou vůli. Nevýhodou této součásti je větší rozpracovanost montáže a stálá skladová mezizásoba všech skupin [35].

- Vizuální kontrola ozubených kol

Přípravky s ozubenými koly jsou dopraveny do oblasti montáže, kde jsou roztrženy do jednotlivých rozměrových tříd a zavěšeny do zásobníku. Probíhá 100% vizuální kontrola, přičemž je uplatňován systém FIFO (first in, first out). Díky tomu je eliminováno hromadění starších kusů a nedochází tak k jejich poškození (např. korozi).

- Vizuální kontrola těles

Tělesa, která se po povrchové úpravě vrátí do závodu, podléhají 100% vizuální kontrole. Pracovník kontroluje případnou přítomnost rýh, odštěpení materiálu, či správné přilnutí povrchové vrstvy.

- Operace 10

První operace montáže jsou automatizované. Robot odebírá těleso ze zásobníku, na kameře zkontroluje typ tělesa a jeho vnitřní prostor a položí jej na přípravek (tzv. WT paletku), který obsahuje čip s informacemi o provedených operacích.

Pokud snímače během montáže vyhodnotí některá čerpadla jako neshodná, jsou vyřazeny a přemístěny na analýzu. Zde proběhne opětovné vyhodnocení a sestavy jsou buď vráceny do procesu, nebo demontovány.

- Operace 20

Na tělesech je nadále změřen charakteristický rozměr C-Mass, který je důležitý pro přiřazení kolečka stejné třídy.

- Operace 30

V další operaci pracovník vkládá primární a sekundární ozubené kolo do tělesa. Podle změřeného rozměru C-Mass z předchozí operace se rozsvítí světlo u zásobníku s danou třídou ozubených kol, aby jej pracovník mohl vyjmout. Ostatní zásobníky jsou zablokované, aby nemohlo dojít k chybě. Pracovník také vloží těsnicí kroužek. Přípravek s tělesem se posune dál ke kameře, která zkontroluje vložení všech dílů.

- Operace 40 – Zkoušky sestavy

Automatické měření sestavy zubového čerpadla se provádí vzduchem. Po natlakování komory probíhá měření poklesu tlaku, zda nepřekročí mezní hodnotu.

Další zkouška spočívá v roztočení ozubených kol v sestavě. Podle velikosti kroutícího momentu se kontroluje správné spárování koleček

- Operace 50 – Funkční zkouška

Další zkouška kontroluje funkčnost sestavy. Zubové čerpadlo krátce přečerpává kapalinu, přičemž se měří vstupní a výstupní tlak.

- Operace 60 – Vypálení DMC

V operaci 60 je laserem na těleso čerpadla vypálen tzv. „DMC“ kód. Ten slouží ke zpětnému dohledání výrobního procesu daného kusu (datum výroby, výsledky testů a zkoušek...). Tento kód je důležitý pro případné reklamace. Kamera následně zkontroluje čitelnost vypáleného kódu.

- Operace 70 – Spojka + vizuální kontrola

V poslední operaci před zabalením vloží pracovník do primárního ozubeného kola unašec a vizuálně zkontroluje celou sestavu.

3 VADY OBROBKU VZIKLÉ PŘI VÝROBĚ OZUBENÝCH KOL

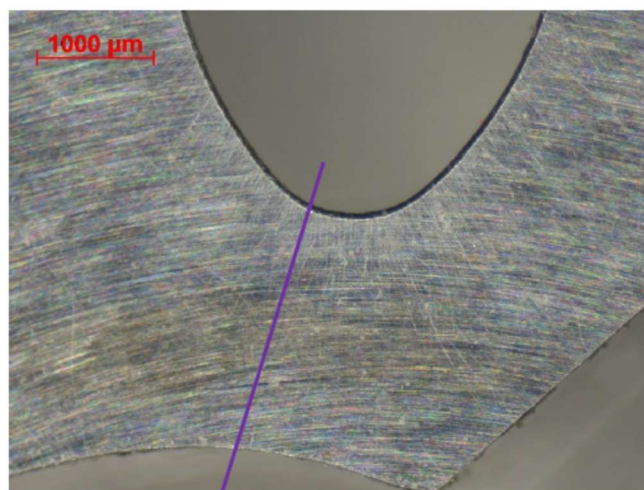
3.1 Opal na čele

Jak je popsáno v kapitole 1.4, v důsledku vysoké teploty v místě řezu může dojít ke změně struktury povrchové vrstvy materiálu, která se projeví charakteristickým zabarvením (obr. 30). Tato vada může mít vliv na mechanické vlastnosti obrobku, a proto je nežádoucí.



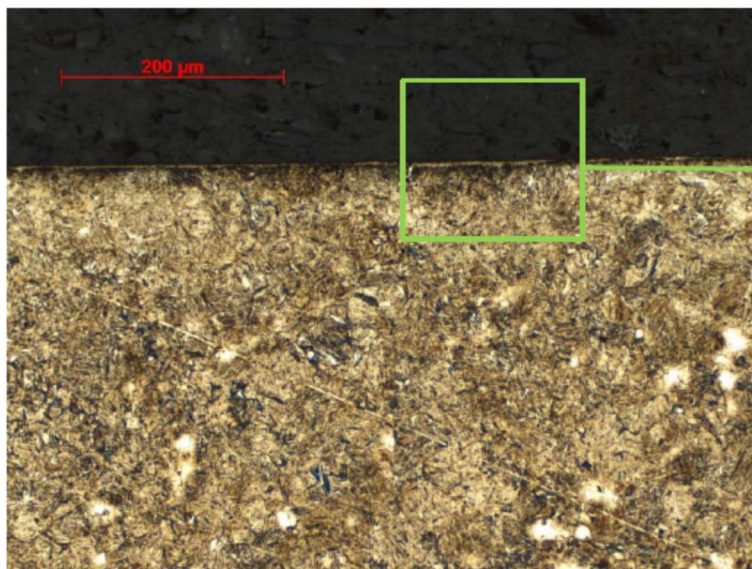
Obr. 30 Ozubené kolo s opalem.

Pro analýzu této vady byl proveden příčný řez ozubeného kola v místě opalu, na kterém byl proveden metalografický výbrus. Směr řezu je znázorněn fialovou čarou na obr. 31. Po vybroušení a vyleptání byla struktura zobrazena pomocí optického mikroskopu. Leptání bylo provedeno 1% roztokem Nitalu.

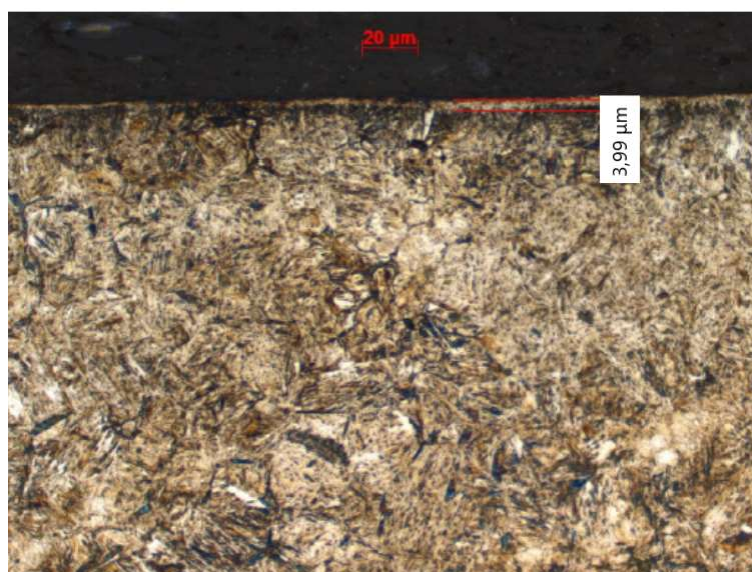


Obr. 31 Směr řezu.

Na zvětšeném snímku (obrázek 32 a 33) je viditelná tepelně ovlivněná vrstva, ve které došlo ke změně struktury materiálu. Povrchová vrstva má charakter nově zakalené a následně vyhřáté oblasti. Bylo provedeno více vzorků, přičemž hloubka ovlivněné vrstvy se pohybuje v řádech jednotkách mikrometrů.



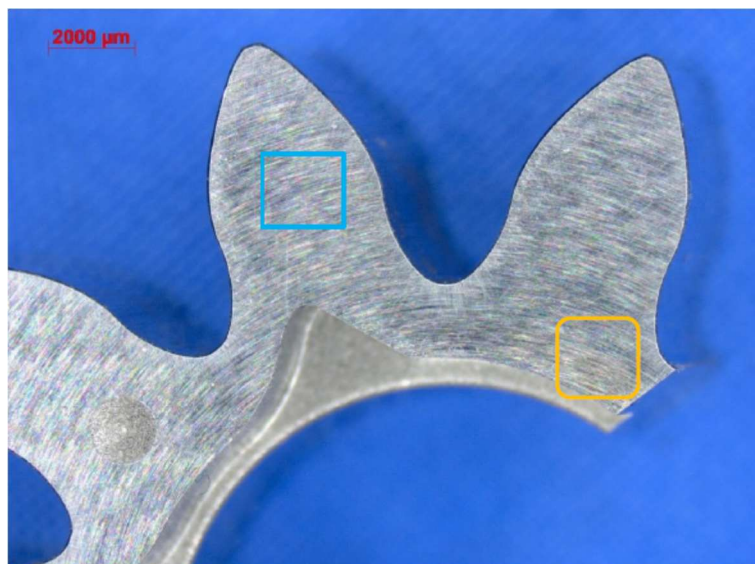
Obr. 32 Metalografický výbrus, zvětšení 200x



Obr. 33 Tepelně ovlivněná vrstva, oblast zelené výseče z obr. 21, zvětšení 500x

Ačkoliv nemá spálený povrch vliv na rozměrovou přesnost konečného výrobku, jedná se o neshodný kus. Dlouhodobá funkční zkouška zubového čerpadla se spáleným ozubeným kolem vykazuje nižší životnost. Vzhledem k vlastnostem sintrovaného materiálu hrozí také odloupení ovlivněné povrchové vrstvy a následnému poškození sestavy. Také drsnost a tvrdost povrchu se může v důsledku opalu změnit, teplota na povrchu součásti může způsobit strukturní změnu.

Pro analýzu této vady byly vyhotoveny také zkoušky tvrdosti v zasažené a nezasazené oblasti. Ty jsou označeny na obrázku 34, přizemž oražová plocha odpovídá opálené oblasti a modrá tepelně neovlivněné. V každé oblasti bylo provedeno sedm zkoušek a vypočítán průměr.



Obr. 34 Oblasti provedených zkoušek tvrdosti.

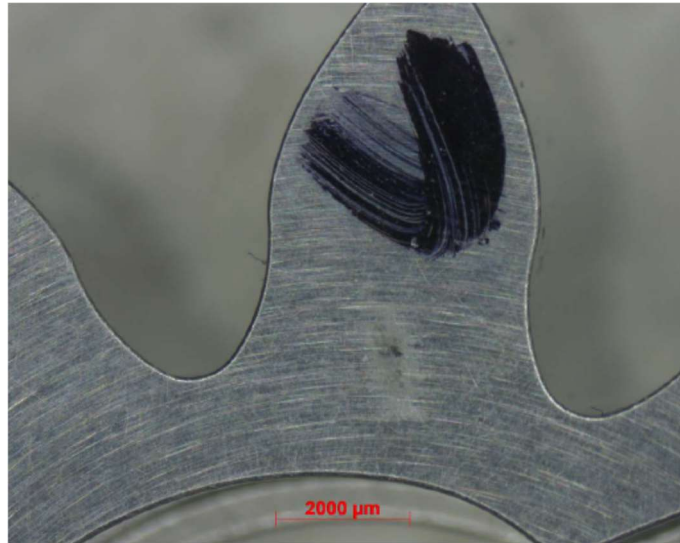
Tabulka 4 Hodnoty tvrdosti.

	Metoda	Průměrná hodnota tvrdosti
Oblast s opalem	HV0,1	756
Nezasazená oblast	HV0,1	816

Hodnoty naměřených tvrdostí jsou zobrazeny v tabulce 4, avšak měření tvrdosti u slinovaných materiálů je málo vypovídající. Výsledné hodnoty mají velký rozptyl v řádu desítek. Je to způsobeno tím, že tvrdost závisí především na struktuře, do které se indentor vnoří. Při vtlačování do tvrdého zrna materiálu bude hodnota vyšší než při vtlačování do měkké části struktury.

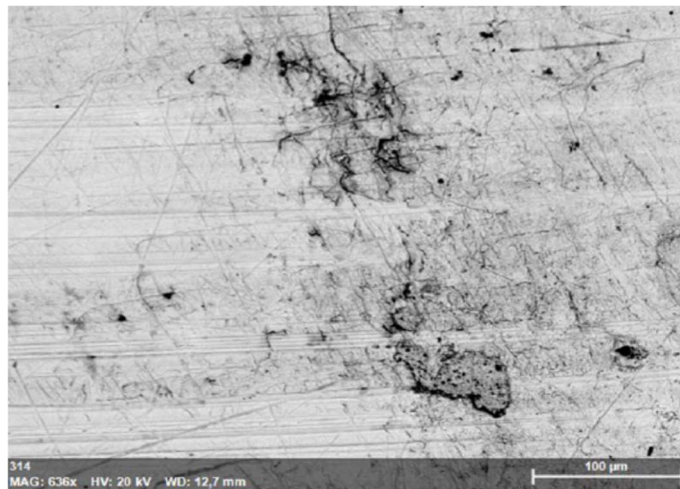
3.2 Přilepený materiál

Vizuálně podobnou vadou při výrobě ozubeného kola je výskyt skvrn na čele ozubeného kola, viz. Obr. 35. Bylo vyzorováno, že tato vada vzniká při operaci 30 – kartáčování.



Obr. 35 Skvrna na obrobku.

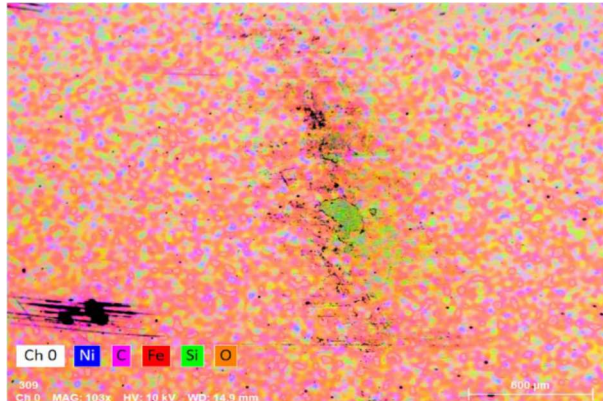
Pro zobrazení skvrny byl využit rastrovací elektronový mikroskop. Na povrch součástí dopadá svazek elektronů a odražený paprsek se vyhodnocuje na následný obraz. Tímto způsobem vyhodnocuje řádek po řádku snímanou plochu. Z výsledného snímku na obrázku 36 je patrné, že se jedná o cizí materiál přilepený k povrchu součásti.



Obr. 36 Černá skvrna zvětšená elektronovým mikroskopem.

Při hledání zdroje přilepeného materiálu byla navíc provedena EDX analýza. Ta spočívá v interakci proudu elektronů s elektrony daného prvku. Proud elektronů způsobí přechod elektronu do jiné energetické skupiny, což je doprovázeno vznikem rentgenového záření. To je pro každý prvek unikátní a je vyhodnoceno detektorem [36].

Z výsledků EDX analýzy (obr. 37) je patrné, že přilepený materiál má zcela jiné chemické složení než obrobek. Je tvořen z velké části křemíkem. Ten je v kontaktu s obrobkem pouze v operaci 30, kde působí jako abrazivo v kartáčích při odjehlení součásti.



Obr. 37 Analýza chemického složení.

Částice opotřebených kartáčů se vyplavovaly procesní kapalinou a v důsledku špatné filtrace se vracely do pracovního prostoru, kde byly kartáčem vtlačeny na obrobek. Procesní kapalina musí procházet přes filtrační papír, který však byl nesprávně nasazen a kapalina protékala mimo něj. Po nápravě této chyby se skvrny neobjevují.

3.3 Ostatní vady při výrobě

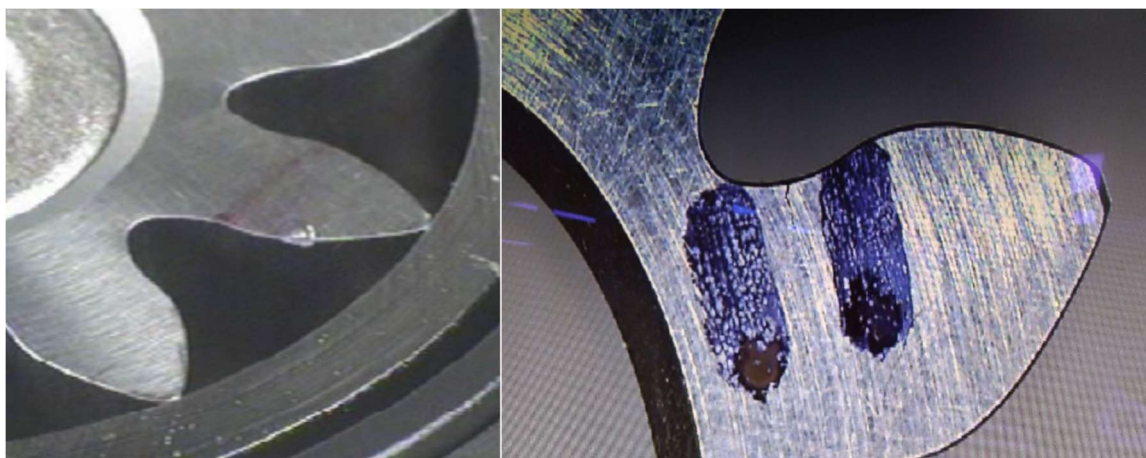
Další vady, které jsou považovány za nepřijatelné, se vyskytují s minimální četností, většinou kvůli chybě lidského faktoru. Patří mezi ně:

- Mechanické poškození

Vzniká nejčastěji během neopatrné manipulace mezi operacemi, kdy dojde například k pádu součásti na zem. Z toho důvodu jsou všechny spadené součásti považovány za neshodné a jsou vyřazeny. Pád může způsobit například oštěpení špičky zubu (obr. 38), promáčkliny nebo praskliny (obr. 39).



Obr. 38 Odštěpená špička zubu.



Obr. 39 Promáčklina, prasklina.

- Nesprávné sintrování ozubených kol

Tato vada není způsobena obráběcím procesem, ale chybou dodavatele polotovarů. Projevuje se chybějícím materiálem části zubu a s tím spojená snížená jakost povrchu. Zhoršená kvalita povrchu v důsledku této vady je zobrazena na obrázku 40.



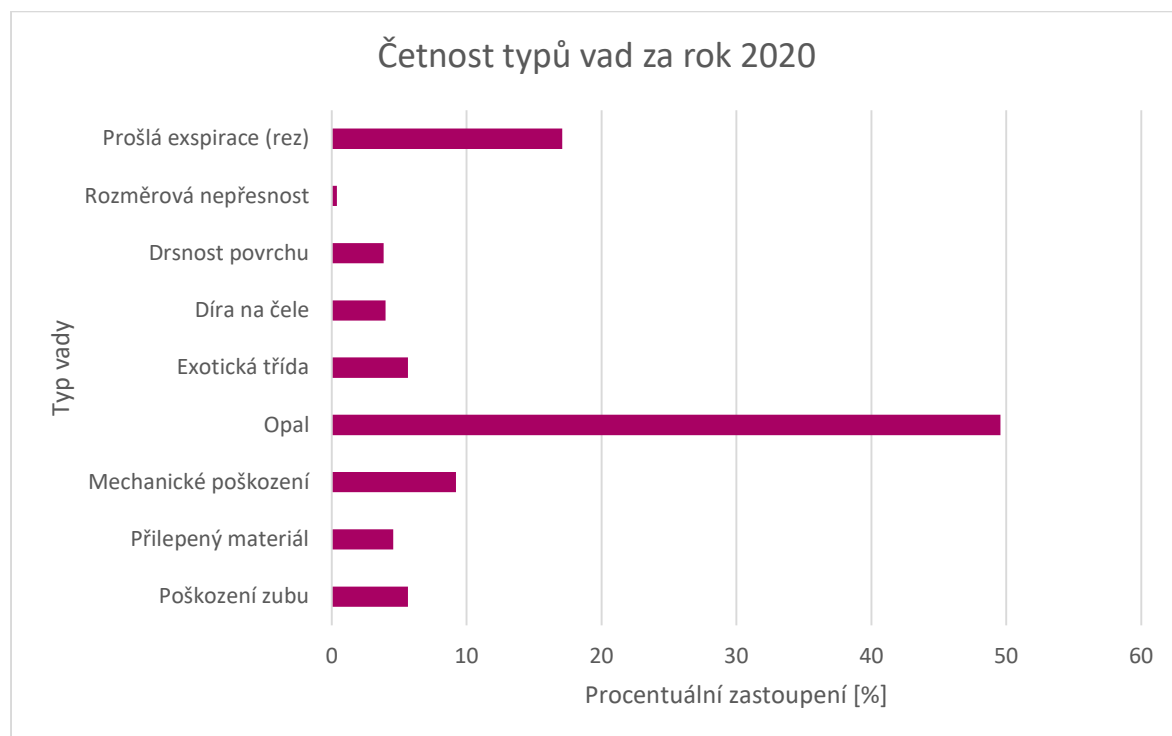
Obr. 40 Chybějící materiál, vada sintrování.

- Koroze

Vzhledem k nutnosti udržovat určitou skladovou zásobu všech tříd ozubených kol pro selektivní montáž, jsou méně využívané třídy děle v mezizásobě. Aby nedošlo k jejich korozi, je každému ozubenému kolu předepsáno datum expirace, po kterém již není možné jej namontovat.

3.4 Četnost vad

Tvorba opalu byl za rok 2020 nejčastější důvod pro vyřazení (šrotaci) ozubených kol. To je důvod, proč je primárně řešena eliminace této vady. Procentuální zastoupení typů vad je zobrazeno na grafu 41.



Obr. 41 Četnost vad.

Z přiloženého grafu je patrné, že kusy s opalem odpovídají téměř polovině všech vyřazených kusů. Další početnou skupinou jsou ozubená kola s prošlou expirací. Při nájezdu výrobní linky byla vytvořena větší skladová zásoba ve všech třídách, přičemž při reálném provozu nejsou okrajové třídy využívány. Z toho důvodu došlo k vypršení expirace a okruh vyráběných tříd zúžen.

Pro zjišťování účinků jednotlivých návrhů by bylo ideální měřit teplotu v oblasti řezu, kdy při jejím snižování by byla potvrzena jejich účinnost. Vzhledem k charakteru obrábění by však bylo komplikované použít termistor nebo termočlánek. Bylo zváženo použití termokamery, avšak ve stroji je více než 20 různých trysek rozptylujících procesní kapalinu, která měření znemožňuje. Zváženo bylo i vypnutí přívodu procesní kapaliny za účelem testování, ale v takovém případě by byly vyráběny neshodné kusy, což je neekonomické. Proto byl jako hlavní sledovaný parametr zvolen výskyt obrobků s opalem z vizuální kontroly. Díky tomu nedošlo k výraznému přerušování sériové výroby. Obrobky vyrobené při testování byly mimořádně kontrolovány pro posouzení jejich kvality. V případě odchylky byly vyřazeny.

4 NÁVRHY NA ELIMINACI VZNIKU OPALU

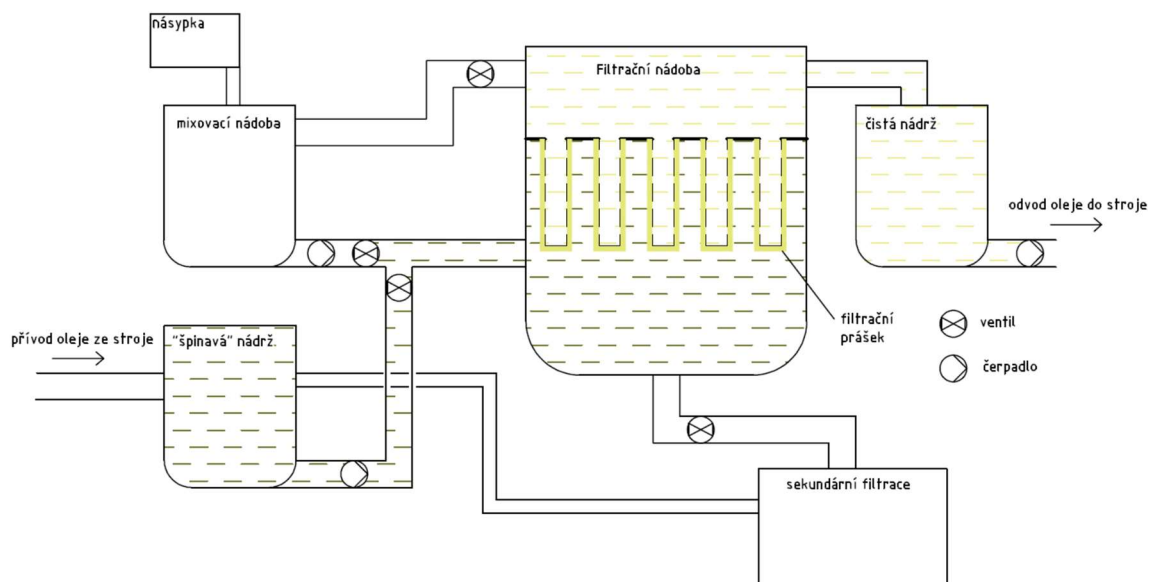
Poznámka: Klíčové hodnoty či údaje (posuvy, rychlosti a jiné procesní parametry) zkrusleny tak, aby nebylo vyzrazeno provozní know-how. Toto zkruslení však nemá vliv na závěry vyzvozené z testování.

4.1 Chlazení

4.1.1 Výměna čerpadla

Procesní kapalina (konkrétně olej) je v průběhu výroby průběžně filtrována v automatickém samostatném zařízení. To kromě vyzčištění média udržuje konstatní teplotu oleje přiváděného do stroje.

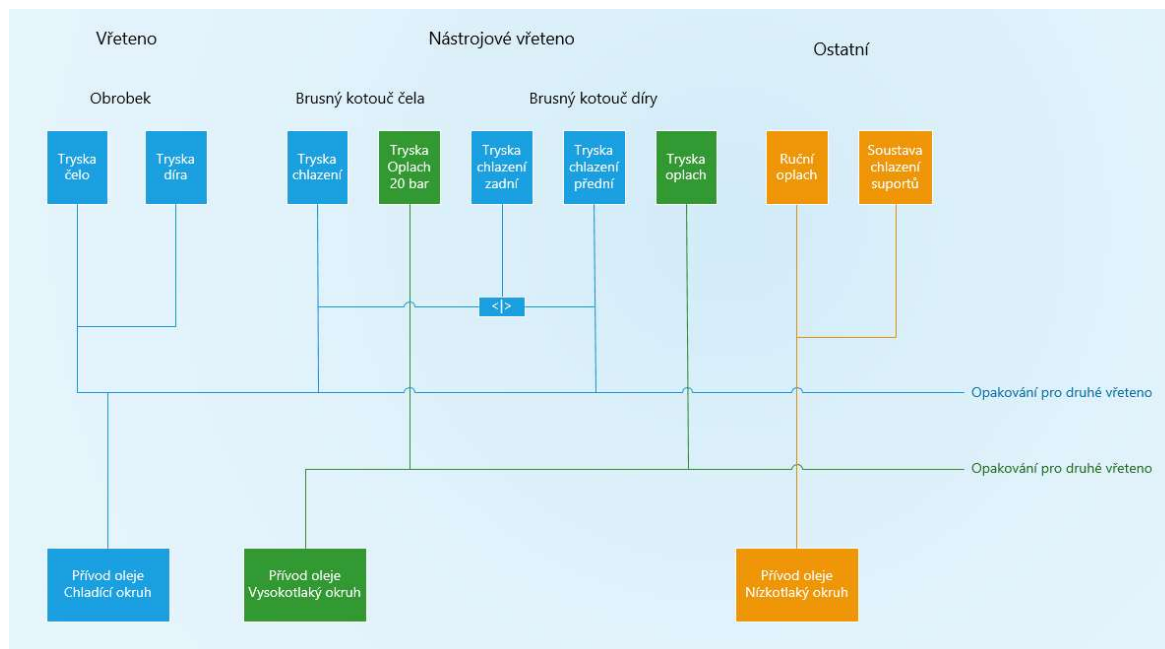
Filtrační zařízení (obr. 42) se skládá z tzv „špinavé“ nádrže, čisté nádrže, filtrační nádoby, mixovací nádoby a sekundární filtrace. Znečištěný olej třískami je přiveden do tzv. „špinavé nádrže“ přes magnetický filtr, který částečně odstraní magnetické třísky. Do mixovací nádoby je přiveden čistý olej a nálevkou vsypán filtrační prášek. Vzniklá suspenze je čerpadlem přivedena do filtrační nádoby, která je vevnitř tvořena děrovanými trubkami. Suspenze oleje a prášku je čerpána skrz trubky, přičemž filtrační prášek zůstává usazen na vnější straně trubek. Po načerpání filtrační nádrže se uzavře ventil z mixovací nádoby a stejným způsobem je přiveden znečištěný olej. Prouděním skrz děrované trubičky je olej čištěn, neboť částice větší než 0,5 μm se zachytí ve vstvě filtračního prášku. Filtrovaný olej proudí částečně do mixovací nádoby a částečně do čisté nádrže, odkud je dopravován zpět k obráběcímu stroji. Při dosažení maximálního tlaku na výstupu filtrovaného oleje je filtrace přerušena a znečištěný filtrační prášek je vzduchem vyztačen do sekundárního filtračního okruhu, kde se pomocí lisování odsaje přebytečný olej.



Obr. 42 Schema filtračního systému.

Výhodou tohoto zařízení je minimální potřeba obsluhy, je nutné pouze v pravidelných intervalech doplňovat čistý filtrační prášek a zároveň odvážet znečištěný. Čas na obsluhu zařízení se dá vyzčíslit v jednotkách hodin za měsíc.

Bruska využívaná na dokončování ozubených kol disponuje více než dvaceti tryskami rozptylující chladicí médium. Trysky jsou rozmístěny dle zjednodušeného hydraulického schématu obr. 43.



Obr. 43 Zjednodušené hydraulické schéma.

Při hledání příčiny pálení ozubených kol bylo vyzorováno, že při chodu stroje dochází ke snížení vstupního tlaku chladicího okruhu až o 25 % pod předepsanou hodnotu 6 bar. Stávající čerpadlo nebylo dostatečně silné na dodávání oleje při plném odběru za chodu obou nástrojových vřeten. Řešením byla výměna stávajícího čerpadla za silnější, které dokáže udržet tlak v předepsaných hodnotách i při maximálním úběru oleje.



Obr. 44 Nové čerpadlo.

Po instalaci nového, silnějšího čerpadla s přepadovou nádrží (viz obr. 44) byl dosažen stabilní tlak přívodu chladicího okruhu. Zároveň došlo k navýšení tlaku v tomto okruhu o dva bary. Tato změna však měla na vznik opalu minimální vliv, výskyt byl snížen v řádu jednotek procent.

4.2 Nástroj

Broušení čela součásti probíhá jednostranně zkoseným brousicím kotoučem zobrazeným na obrázku 45. Jako brusivo je používán kubický nitrid boru spojený keramickým pojivem. Tato kombinace je volena především s ohledem na životnost nástroje, kdy při dvousměnném provozu vydrží nižší desítky dnů. Výsledná zrnitost brousicího kotouče je 127 μm , což dle tabulky 2. odpovídá střední skupině.



Obr. 45 Používaný brousicí kotouč.

Aby bylo chlazení obrobku efektivnější, bylo navrženo vyhotovit do brusného kotouče chladicí drážky ve směru od středu kotouče. Proříznutí brousicího kotouče bylo provedeno interně v rámci závodu. Díky těmto drážkám se chladicí médium lépe dostane do místa řezu, čímž sníží teplotu při obrábění.



Obr. 46 Brousicí kotouč s chladicími drážkami.

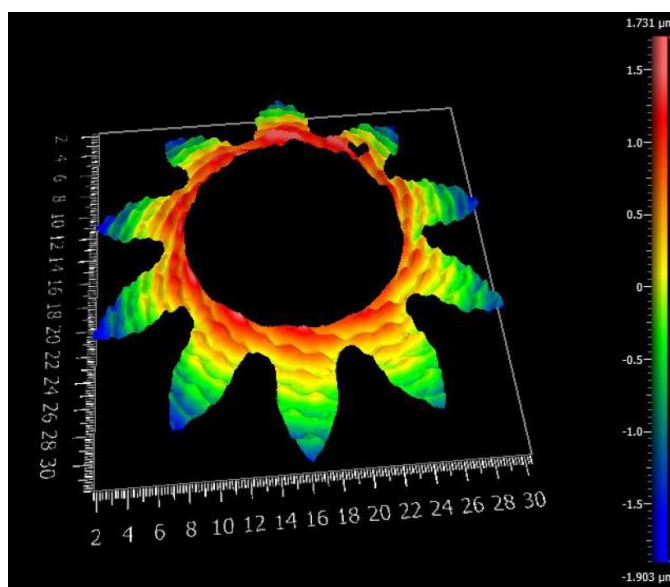
Při výměně kotouče za drážkovaný (obr. 46) se potvrdilo, že tyto drážky mají pozitivní vliv na vznik opalu. Zároveň byly obrobky vyhotovené drážkovaným kotoučem kompletně

proměřeny, přičemž výsledky nevykázaly změnu v rozměrové přesnosti dílů. Porovnání výskytu opalu s původním kotoučem a kotoučem s chadicími drážkami je zobrazen v tabulce 5.

Tabulka 5 Vliv vyhotovení drážek do brousícího kotouče.

	Kotouč bez drážek	Kotouč s drážkami
Kusů	240	240
Počet vyřazených kusů	10	1

Při dlouhodobějších zkouškách však bylo zjištěno, že vyhotovené drážky vnášejí do obráběcího procesu kmitání, jenž se projevuje zhoršenou kvalitou povrchu výsledné součásti viz obrázek 47.

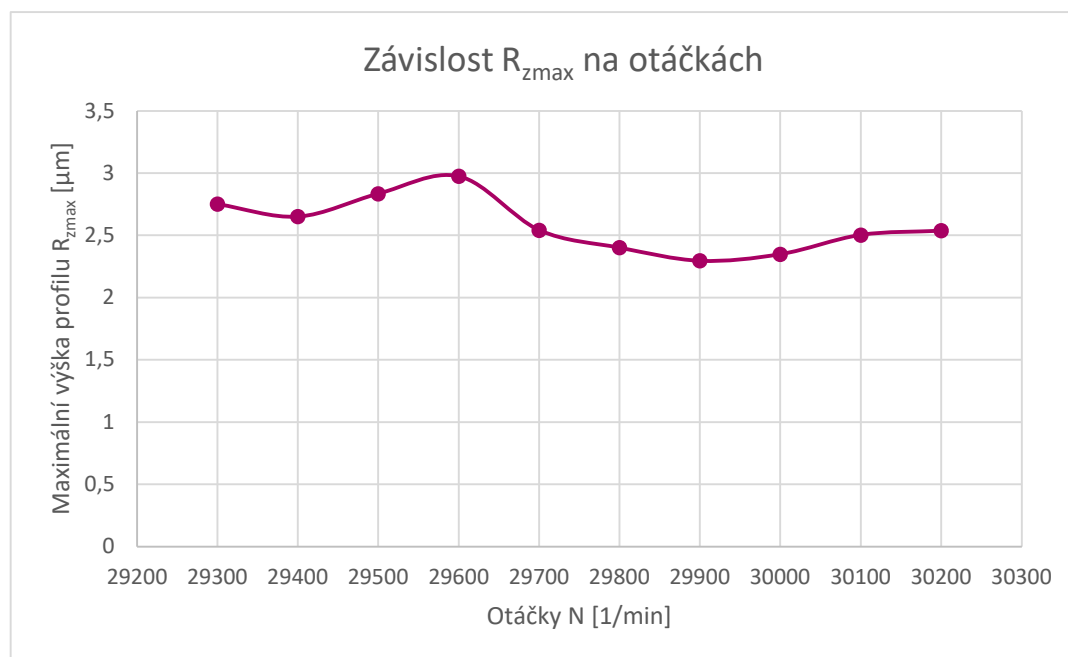


Obr. 47 Povrch součásti.

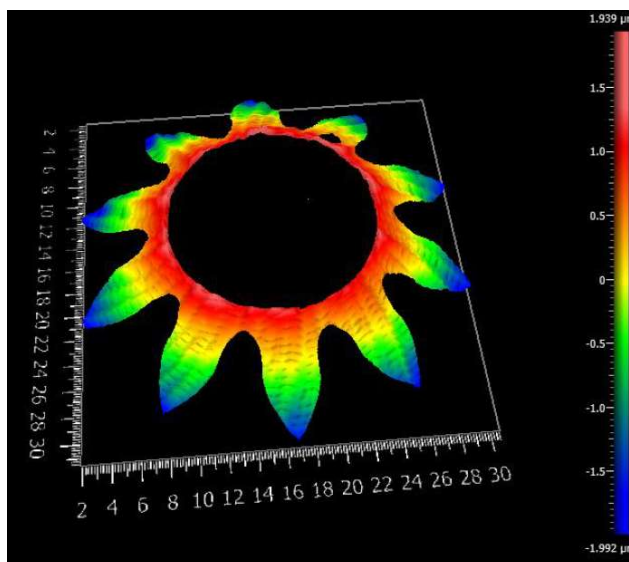
Ačkoliv jsou sledované parametry struktury povrchu dle výkresové dokumentace v toleranci, jakékoliv kmitání či vibrace může mít negativní vliv na životnost obráběcího stroje. Ložiska, vedení apod. jsou nadměrně namáhána, což je nežádoucí.

Kmitání soustavy je způsobeno, když frekvence buzení, v tomto případě otáčení, je blízká vlastní frekvenci celé soustavy. Změnou frekvence otáčení je možné amplitudu kmitání snížit. Bylo by vhodné provést modální analýzu pro zjištění vlastní frekvence, nicméně to je čas.

Pro snížení kmitání byl otestován vliv otáček na vibrace soustavy. Změnou otáček se mění frekvence buzení, přičemž cílem je nalézt takovou hodnotu otáček, při kterých je amplituda kmitání nejnižší. Byla sledována maximální hodnota výšky profilu Rz, jejíž závislost je zobrazena na obrázku 48.

Obr. 48 Závislost R_{zmax} na otáčkách.

Z grafu je patrné, že malá změna otáček (řádově stovky otáček za minutu) nemá velký vliv na výsledný parametr R_z . Kritériem pro posouzení vhodných otáček tak byla vizuální kontrola výstupu z optického profilometru Zygo. Jako nejméně zvlněný byl označen povrch při otáčkách $30\,300\text{ min}^{-1}$ zobrazen na obrázku 49.

Obrázek 49 Povrch obrobku při otáčkách $30\,300\text{ min}^{-1}$.

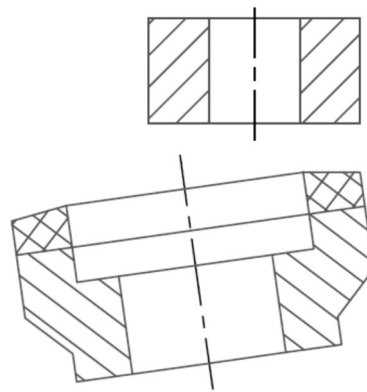
Dalším návrhem pro lepší distribuci chladicího média do místa řezu bylo použít brousící kotouč s větší pórovitostí. I přes počáteční problémy s výrobou takového kotouče (po slinování docházelo k rozpadu) byl vyzkoušen v provozu, avšak bez měřitelného vlivu na tvorbu opalu. Ani kotouč s větší zrnitostí brusiva neměl nijak zásadní vliv na výskyt této vady.

4.3 Procesní parametry

4.3.1 Rozbor stávajícího stavu

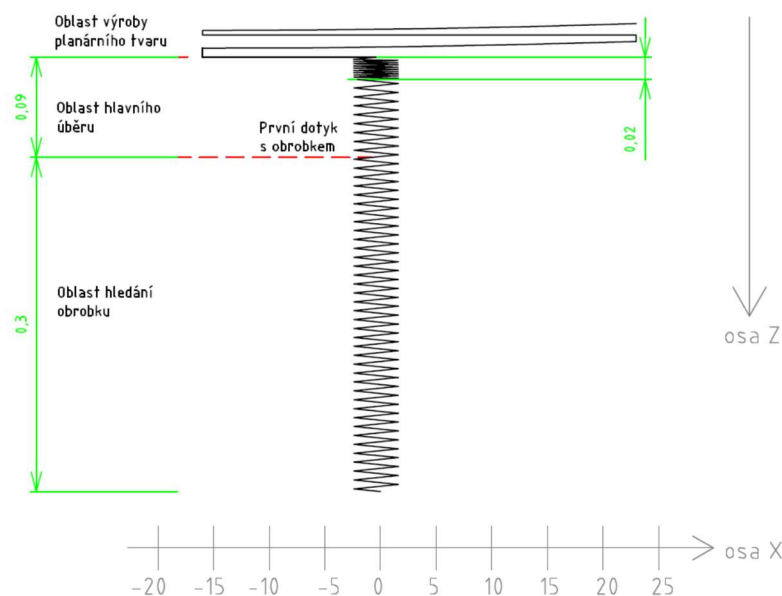
Vzhledem k tomu, že se jedná o převzatou výrobu, byl nutný hlubší rozbor výroby součásti. Schema nástroj obrobek je zobrazeno na obr. 50.

Z programu bylo vyčteno, že nástroj nejprve přijede do bezpečné vzdálenosti od součásti rychloposuvem. Je spuštěna oscilace v ose X a zároveň strojní posuv v ose Z směrem k součásti. První část své dráhy (řádově desítiny milimetru – závisí na reálné výšce polotovaru) jede nástroj naprázdno.



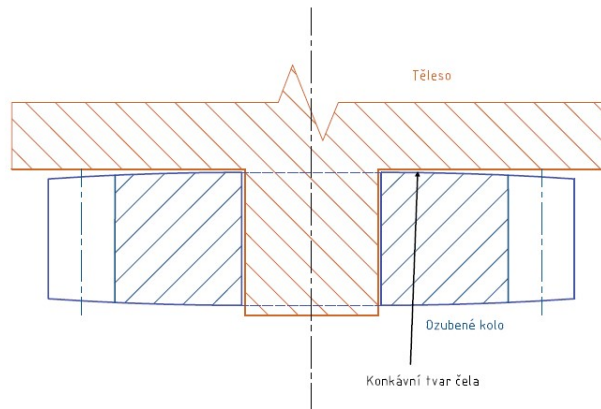
Obr. 50 Schema nástroj – obrobek.

Ve chvíli, kdy dojde k prvnímu dotyku brusného kotouče a obrobku, je senzorem detekováno zvýšení zvukové hladiny a stroj si odečte aktuální souřadnice osy Z. Od této pozice poté ubírá materiál do zadané hodnoty. V současném stavu je hodnota rychlosti posuvu v ose Z 12 mm/min. Posuvová rychlost zůstává stejná v oblasti hledání obrobku i při úběru materiálu, pouze na poslední dvě setiny milimetru je snížena na 3 mm/min. Dráha nástroje vůči obrobku je schematicky znázorněna na obr. 51.



Obr. 51 Dráha nástroje – současný stav výroby.

V poslední části broušení čela je realizována výroba konkávního tvaru součásti pohybem nástroje po zaoblené dráze. Vypouklý povrch (viz obr. 52) je na součásti z důvodu vytvoření vůle mezi tělesem a jednotlivými zuby. Ozubená kola tak dosedají na těleso na menším průměru, což má za následek snížení tření při otáčení ozubených kol a zároveň snížení rizika poškrábání tělesa o špičku zubu.



Obr. 52 Konkávní tvar čela.

Ze závislosti výkonu na nástrojovém vřetenu na čase (obrázek 53) je patrné, že k největšímu zatížení dochází v oblasti hlavního úběru materiálu, což odpovídá teoretickým předpokladům. V této oblasti dochází k největšímu přenosu energie do oblasti řezu a tím pádem i k zvýšení teploty. Předpokladem je, že v této části dochází ke vzniku opalu. Cílem bude výkon na vřetenu v oblasti hlavního úběru snížit.

Z výkonové křivky je nadále patrné, že vedlejší čas při obrábění (oblast hledání obrobku) je poměrně dlouhý – cca 3 vteřiny. Nachází se zde potenciál ke zrychlení celého procesu.



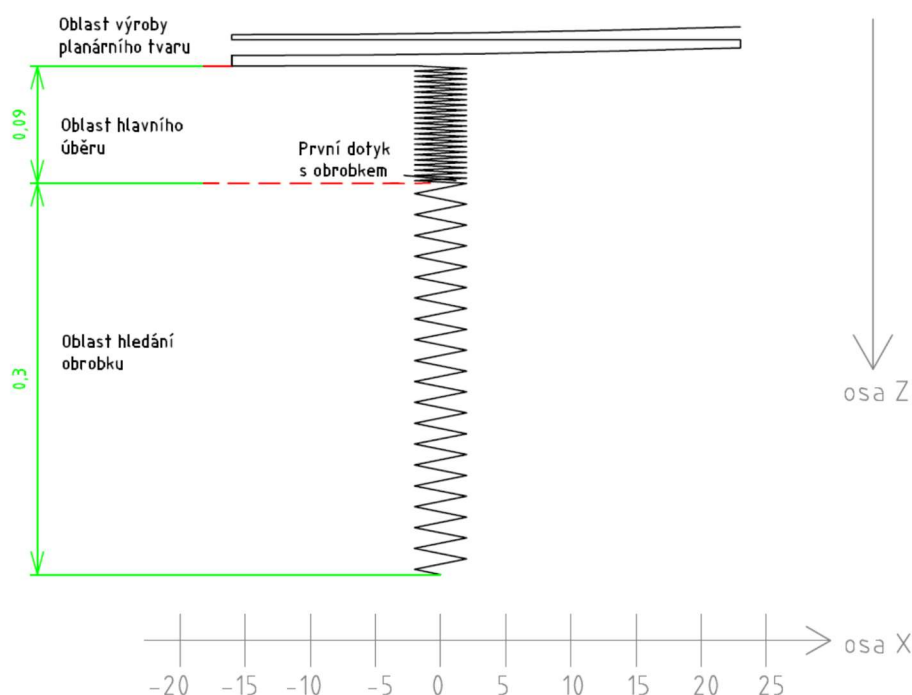
Obr. 53 Broušení čela, průběh výkonu na vřetenu.

4.3.2 Úprava posuvové rychlosti

Při vysokém výkonu nástroje je do oblasti řezu dodáváno více energie, která se z většiny mění na teplo. Předpokladem je, že při snížení výkonu v oblasti úběru materiálu bude vnesené teplo menší, což se pozitivně projeví na výskytu opalu.

Snížení výkonu lze mimo jiné dosáhnout snížením rychlosti posuvu v oblasti úběru materiálu. Dojde ke zmenšení průřezu třísky, čemuž je přímo úměrná řezná síla.

Dráha navrhovaného řešení je schematicky zobrazena na obr. 54.

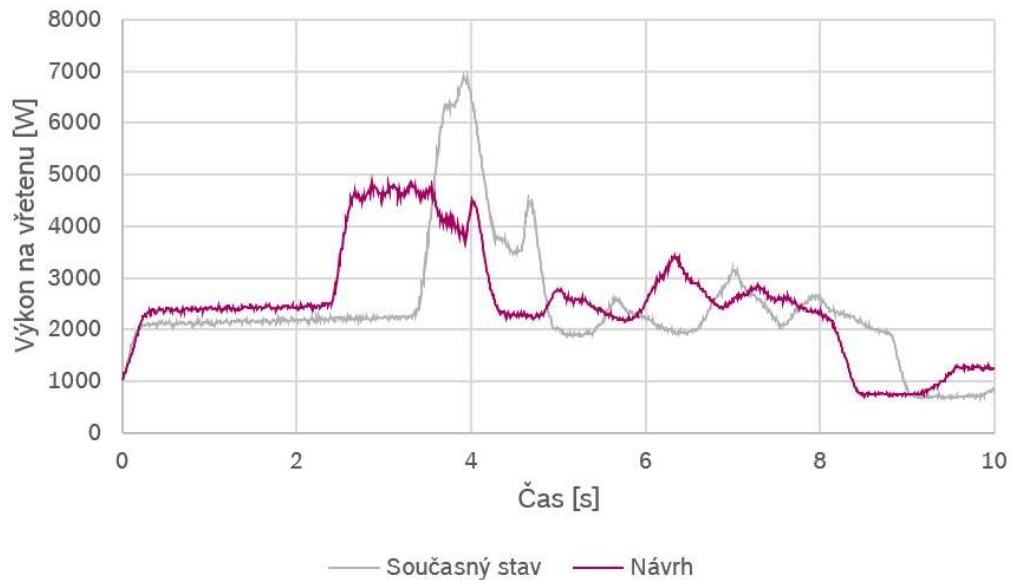


Obr. 54 Dráha nástroje navrhovaného řešení s upravenými rychlostmi posuvu.

Snížením rychlosti posuvu však dojde k prodloužení strojního času v dané oblasti, což je nežádoucí. Aby nedošlo ke zvýšení taktu stroje, je nutné zkrátit vedlejší čas. Ve chvíli, kdy se nástroj pohybuje „naprázdno“, je možné posuvovou rychlost v ose Z naopak zvýšit. Graf na obrázku 55 ukazuje porovnání původní výkonové křivky a navrhovaného řešení. Posuvová rychlost v hlavní oblasti byla snížena o 50%, přičemž v oblasti hledání obrobku byla o 50% zvýšena.

Bezpečná vzdálenost v ose Z, do které nástroj přijede rychloposuvem, je volena s ohledem na toleranci polotovaru minimálně 0,1 mm.

Vliv změny posuvů na výkonovou křivku



Obr. 55 Porovnání navrhovaného řešení s původním stavem.

Z grafu je patrné, že touto úpravou skutečně došlo k redukci strojního času, která lze ověřit teoretickým výpočtem. Vzhledem k tomu, že posuvová rychlost v ose Z je po částech konstantní, dá se strojní čas vyjádřit ze vztahu (7).

$$t_{AS} = \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{f_i} [\text{min}] \quad (7)$$

kde: l_i – dráha v i -tém úseku [mm],

f_i – posuvová rychlost v i -tém úseku [mm/min].

Pro současný stav výroby strojní čas t_{AS1} pro oblast hledání kusu a oblast hlavního úběru dle vztahu (7) odpovídá:

$$t_{AS1} = \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{f_i} = \frac{0,6}{12} + \frac{0,105}{12} + \frac{0,03}{3} = 0,069 \text{ min} = 4,125 \text{ s}$$

Při použití upravené posuvové rychlosti strojní čas v prvních dvou částech obrábění t_{AS2} odpovídá:

$$t_{AS1} = \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{f_i} = \frac{0,6}{18} + \frac{0,105}{6} + \frac{0,03}{3} = 0,061 \text{ min} = 3,65 \text{ s}$$

Při porovnání teoretických hodnot a reálného výrobního času lze potvrdit, že skutečně došlo ke zrychlení obráběcího procesu o cca 0,5 vteřiny.

- Zkoušení

Dané řešení bylo testováno, přičemž hlavním sledovaným parametrem byla tvorba opalu. Jako testovací vzorek bylo zvoleno 240 kusů, což odpovídá více než dvěma orovnávacím intervalům. Při testování byly vždy nastaveny požadované podmínky, proces se poté nechal stabilizovat a až poté proběhlo testování. Aby byly výsledky minimálně zkreslené ostatními vlivy, byl začátek testování vždy ve stejné fázi orovnávacího intervalu kotoučů.

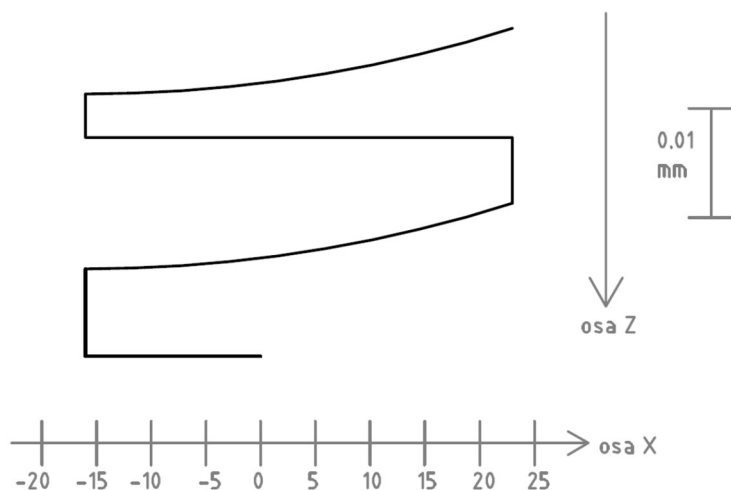
Při původních řezných podmínkách bylo nalezeno 27 kusů s opalem, přičemž po úpravě rychlostí posuvu bylo nalezeno 10 neshodných kusů. Z těchto výsledků lze usoudit, že posuvová rychlost v ose Z má značný vliv na tuto vadu. Následně byly provedeny další dvě varianty. Výsledky testování jsou shrnuty v tabulce 6.

Tabulka 6 Porovnání četnosti obrobků s opalem.

	Současný stav	Návrh 1	Návrh 2	Návrh 3
Rychlost posuvu naprázdno	12 mm/min	18 mm/min	24 mm/ min	24 mm/min
Rychlost posuvu hrubovací	12 mm/min	6,5 mm/min	6 mm/min	9 mm/min
Rychlost posuvu dokončovací	3 mm/min	4,5 mm/min	3 mm/min	3 mm/min
Počet vyřazených kusů	27	10	1	19
Čas obrábění (naměřeno)	9 sekund	8,5 sekund	8 sekund	8 sekund

4.3.3. Úprava programu

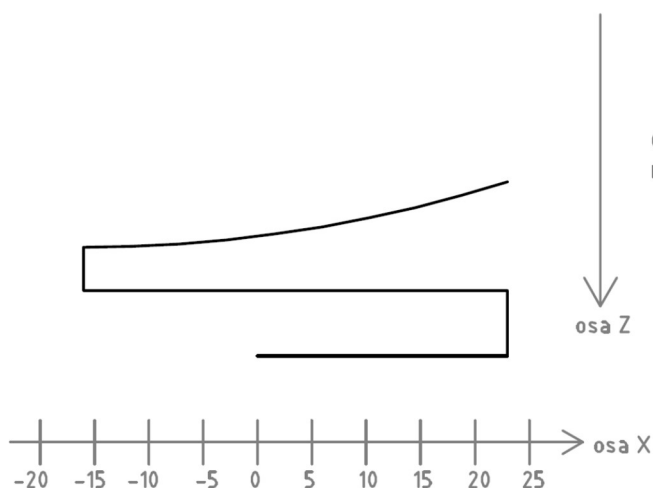
Při analýze pohybu nástroje bylo zjištěno, že poslední část obrábění (výroba konkávního čela) je realizována pohybem nástroje po předepsané dráze. Ta je schematicky znázorněna v obrázku 56.



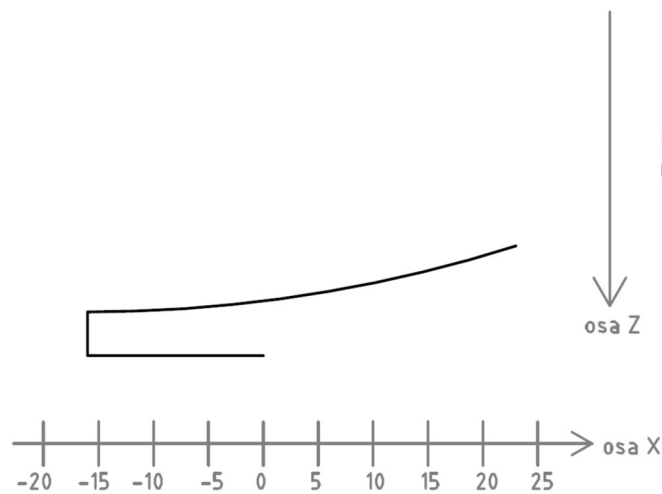
Obr. 56 Dráha nástroje při výrobě konkávního tvaru čela, současný stav

Ze znázorněné dráhy nástroje vyplývá, že nejprve dojde k obrobení čela a následným pohybem je tato tvarová plocha zarovnána do roviny. K dosažení požadované geometrie dojde až v posledním kroku. Není výhodné, aby nástroj vyráběl výslednou geometrii dvakrát, proto je vhodné redukovat tuto dráhu.

Obrázek 57 a 58. představují dvě návrhy, jakými lze dráhu zkrátit. Tím dojde ke snížení celkového úběru v ose Z (řádově o 0,01 mm) v poslední části obrábění, tento rozdíl bude přidán do oblasti hlavního úběru, čímž bude dosaženo požadovaných rozměrů výsledné součásti. Obě varianty byly otestovány a obrobek splňuje rozměrové požadavky.



Obr. 57 Navrhovaná dráha nástroje I.

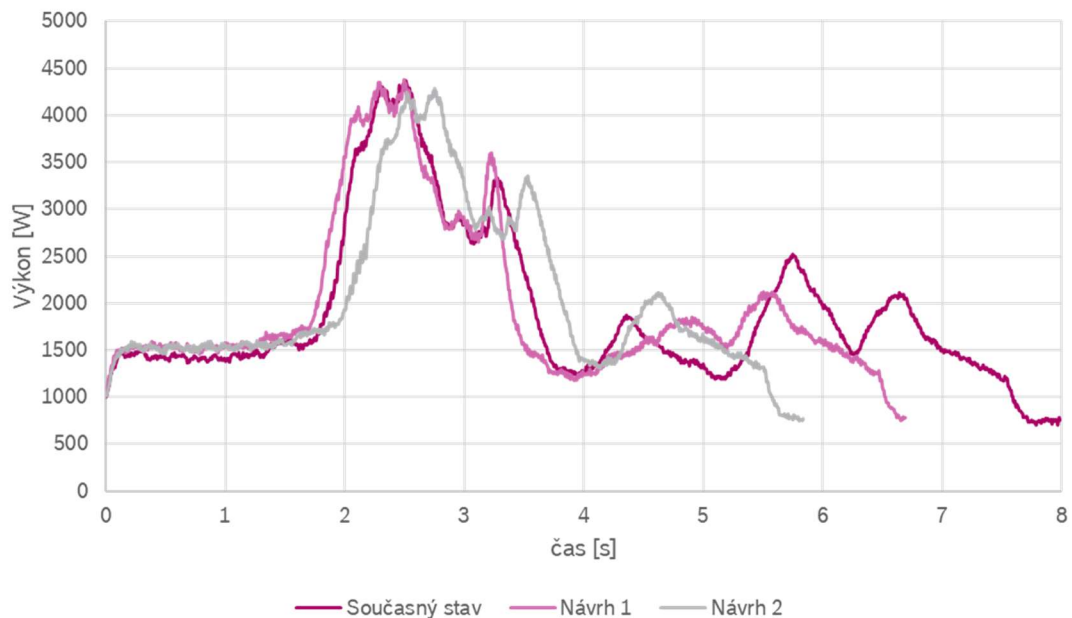


Obr. 58 Navrhovaná dráha nástroje II.

Aplikováním změny pohybu nástroje (odstranění dvou řádků z NC programu) dojde k výraznému zrychlení celého procesu. Jak vyplývá ze závislosti výkonu vřetena na čase, v současném stavu tato část obrábění trvá cca 4 vteřiny.

Časová úspora dosažená navrhovanými řešeními je viditelná na grafu závislosti výkonu na nástrojovém vřetenu na čase (obr. 59).

Porovnání



Obr. 59 Porovnání výkonové křivky.

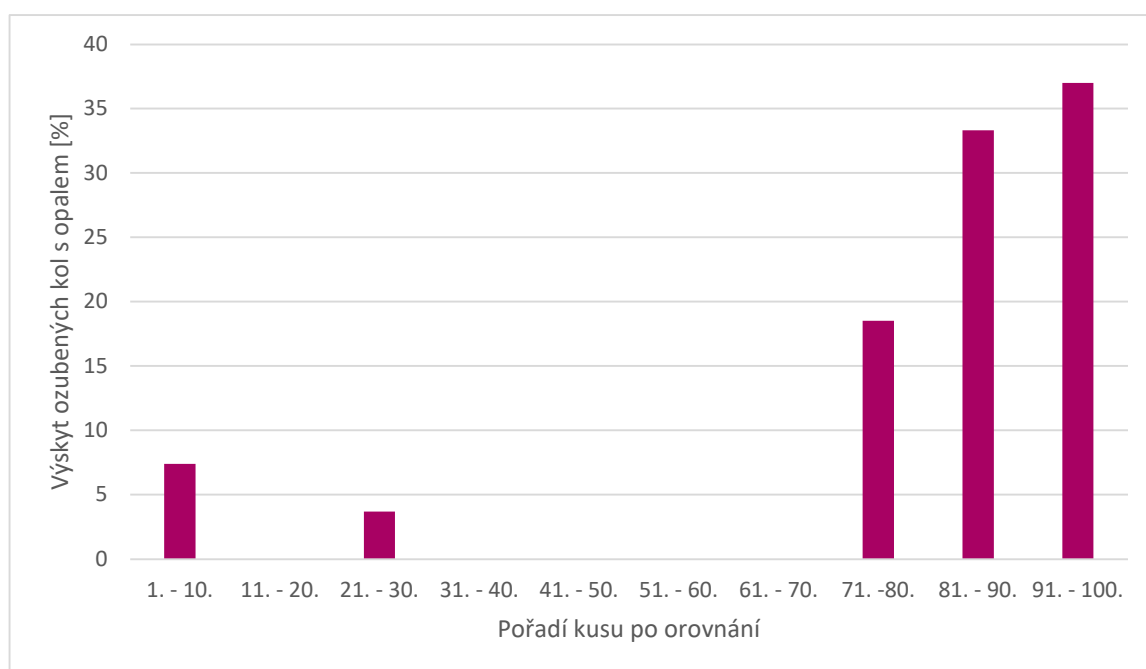
Jak vyplývá ze vztahu (5), zkrácení času obrábění má má přímý vliv na vnesené teplo do oblasti obrobku, což je žádoucí pro snížení výskytu opalu na povrchu. Vedlejším pozitivním efektem je snížení celkového taktu stroje a s tím spojené zefektivnění výroby.

4.4 Orovnávání

4.4.1 Změna intervalu orovnění

Jak vyplynulo z analýzy výroby ozubených kol, značný vliv na tvorbu opalu má orovňávání. Brousící kotouč na broušení čela byl v původním stavu orovněn po 100 obrobenech kusů. Orovnáním se následně obnoví geometrie nástroje a zároveň obnoví řezivost nástroje. Otupená zrna jsou orovňáním odstraněna a ostrá zrna spodních vrstev jsou obnažena.

Bylo zjištěno, že k tvorbě opalu dochází ke konci orovňovacího intervalu. Zrna, jež ztratila svoji ostrost, již nejsou efektivně schopna odebírat materiál. Dochází k většímu tření mez obrobkem a nástrojem, čímž se generuje více tepla v oblasti řezu. Závislost výskytu opalu na počtu kusu od orovnění je znázorněna na obr. 60.



Obr. 60 Výskyt opalu v závislosti na pořadí kusu od orovnění.

Z grafu je patrné, že k tvorbě opalu dochází především při obrábění posledních třiceti kusů. Snížením orovňovacího intervalu ze 100 kusů na 70 se předejde výrobě 90% neshodných kusů. Toto řešení však má svá negativa. Při snížení intervalu orovnění ze 100 kusů na 70 dojde ke snížení životnosti brusného kotouče až o 30%. Cílem je nastavit interval orovnění tak, aby byl co nejvyšší a zároveň nedocházelo k pálení.

4.4.2 Změna orovňovacích paramterů

Při zvýšení rychlosti posuvu a snížení otáček při orovnění je výsledná drsnost brusného kotouče vyšší. To se projeví i na kvalitě povrchu obrobku, kdy dojde k viditelnému nárůstu parametru Ra. Tato změna parametrů orovnění má však pozitivní vliv na tvorbu opalu. Jak je prezentováno v tabulce 7, snížení otáček a zvýšení posuvové rychlosti při orovnění snižuje četnost pálení povrchu ozubeného kola.

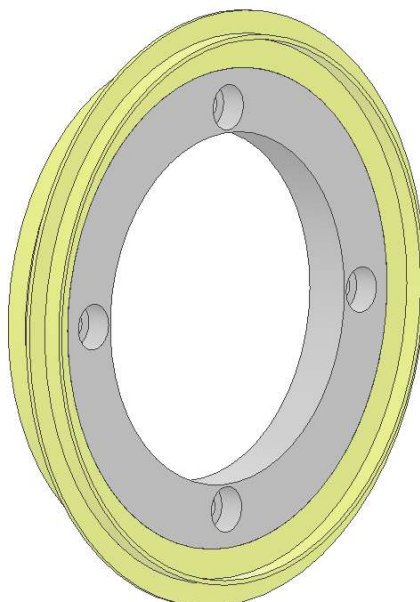
Tabulka 7

	Původně	Po změně
Otáčky orovnávače [min^{-1}]	32284	29284
Otáčky brousicího kotouče [min^{-1}]	1500	1000
Posuvová rychlost [mm/min]	500	1000
Testováno kusů	240	240
Počet vyřazených kusů	10	3

Vysvětlením této skutečnosti je, že při posužití nižší posuvové rychlosti a vyšších otáček je zbytečně dlouhý kontakt obou kotoučů, což způsobí zanesení pórů brousicího kotouče a následný špatný přívod procesního média.

4.4.3 Úprava orovnávacího kotouče

Pro orovnění obou nástrojů v operaci 10 se používá orovnávač tvořený diamantovým prachem v kovovém pojivu. Tvar nástroje je graficky znázorněn na obr. 61. Nástroj pro obrábění díry se orovnává na vnějším výstupku orovnávače a nástroj pro broušení čela na předním výstupku.



Obr. 61 Orovnávač nástrojů v operaci 10.

Dlouhodobě bylo vypořádováno, že postupným opotřebením orovnávacího kotouče dochází ke snížení výskytu opalu na čele ozubených kol. Při bližším prozkoumání opotřebeného kotouče jsou viditelné vyložené části výstupku orovnávače. Z toho vychází

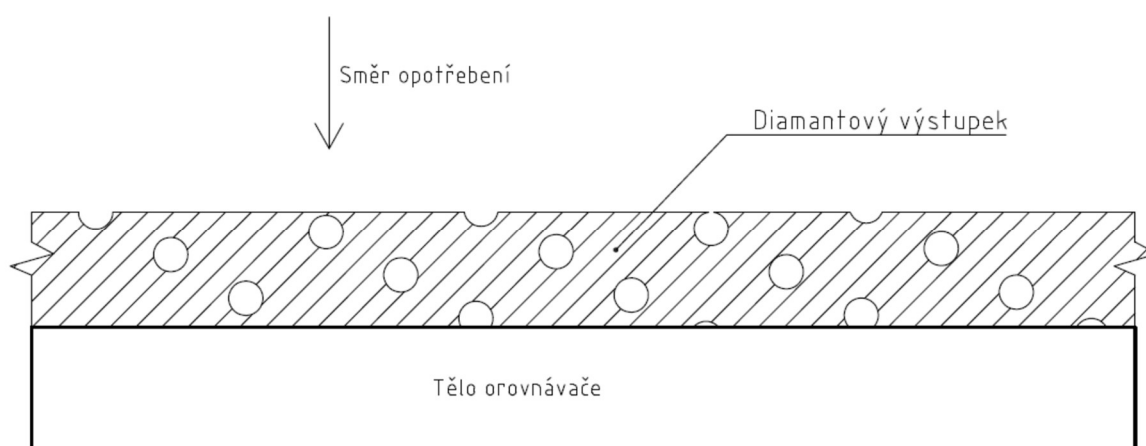
předpoklad, že drážky na orovnávacím kotouči mají pozitivní vliv na vznik opalu při následném broušení

Testování tohoto předpokladu proběhlo nejprve s novým orovnávacím kotoučem. Ten byl upnut do stroje a nechán dostatečnou dobu zaběhnout 2 směny). Na testovacím vzorku byl následně vizuální kontrolou zjištěn podíl obrobků s opalem. Poté byly do téhož orovnávače vyhotoveny drážky. Po vrácení kotouče do stroje a jeho zaběhnutí byl opět proveden výčet podílu obrobků s opalem na čele. Ostatní parametry zůstaly mezi testováním neměnné. Výsledky testování jsou shrnuty v tabulce 8.

Tabulka 8 Výsledky testování orovnávače s drážkami.

	Orovnávač bez drážek	Orovnávač s drážkami
Kusů	240	240
Počet vyřazených kusů	6	2

Výsledky potvrdily, že vyhotovené drážky snižují podíl obrobků s opalem na čele. Po zavedení orovnávače s drážkami do sériové výroby byla zvýšena kontrola obráběcího procesu, která ale nevykázala odchylky. Drážky do orovnávacího kotouče byly nejprve vyhotoveny přímo v závodě, přičemž následně muselo proběhnout jeho vyvážení. Po konzultaci s výrobcem byl navržen nový orovnávač s dírami po obvodu, které budou při opotřebení postupně uzavírány a otevírány nové. Díry budou rozmístěny tak, aby i při opotřebení zůstal orovnávač vyvážený. Obrázek 62 představuje schematický náhled rozmístění děr ve výstupku orovnávače.



Obrázek 62 Schematické rozmístění děr ve výstupku orovnávače.

5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Snaha o snížení podílu neshodných kusů, které jsou následně šrotovány, má i důležité ekonomické opodstatnění. Na každý obrobek, který je vyřazen, jsou vynaloženy nemalé náklady. Například se jedná o nákup polotovaru, náklady na již provedené úkony, mzdy zaměstnanců, nebo cena následné likvidace. Jak již bylo uvedeno, za rok 2020 byla polovina veškerých neshodných kusů vyřazena z důvodu tvorby opalu, přičemž jejich ceková hodnota dosáhla přibližně 340 000 Kč.

5.1 Výměna čerpadla

Návrhy a následné opatření pro eliminaci vzniku opalu na čele ozubených kol byly realizovány s ohledem na výrobu. Nejnákladnějším opatřením proti tvorbě opalu byla výměna čerpadla pro přívod procesní kapaliny. Jednalo se o jednorázový výdaj ve výši přibližně 102 000 Kč.

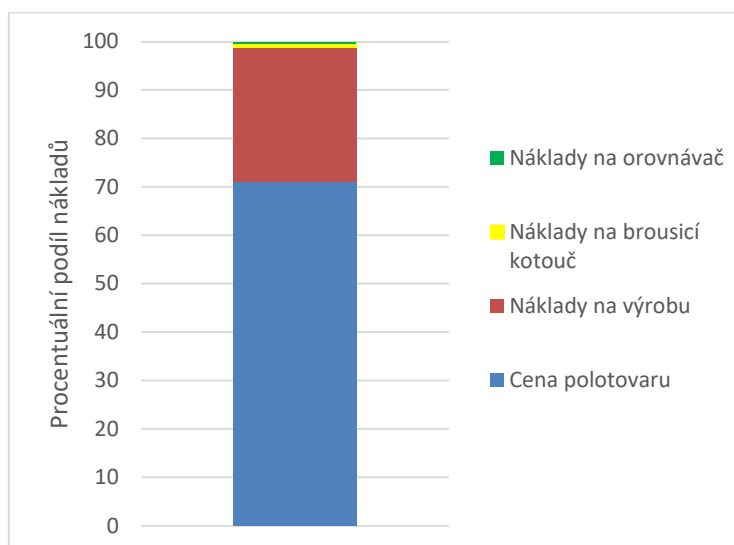
5.2 Změna procesních parametrů

Pro změnu posuvové rychlosti, nebo úpravě dráhy nástroje, nebylo potřeba vynaložit žádné finanční prostředky. Navíc díky těmto změnám došlo ke zrychlení taktu stroje v operaci 10 přibližně o 10%. Při zachování hodinové sazby stroje klesají náklady na výrobu 1 obrobku.

5.3 Změna používaných nástrojů

Náklady na brousící kotouč používaný pro broušení prvního čela ozubeného kola jsou v současné době přibližně 12 750 Kč. Vyhotovení drážek v rámci závodu bylo vyčísleno na 460 Kč. Vzhledem k tomu, že k výměně brousícího kotouče dochází přibližně po 40 000 kusech, zvýšení ceny výroby lze považovat za zanedbatelné.

I v případě nového orovnávače s dírami po obvodu dojde k navýšení pořizovací ceny, konkrétně o 10%. Výměna orovnávacího kotouče v současnosti probíhá po několika měsících (řádově přes 100 000 obrobků). Navýšení výrobních nákladů na 1 kus se dá také považovat za zanedbatelné.



Obrázek 63 Rozložení nákladů na výrobu jednoho kusu v operaci 10.

Graf na obrázku 63 prezentuje rozložení nákladů na výrobu v operaci 10. Lze z něj vyčíst, že největší podíl má cena polotovaru. Náklady na výrobu, mezi které patří například hodinová sazba stroje, náklady na jeho údržbu, nebo mzdy zaměstnanců, dosahují téměř 30%. Z těchto nákladů byly vyčleněny ceny broušícího kotouče a orovnávače, které jsou zobrazeny samostatně. Náklady na oba nástroje dosahují přibližně 0,5%. Při započítání dodatečných nákladů na nástroje v důsledku opatření se celková cena zvedne o 0,06%.

6 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo analyzovat vady při výrobě ozubených kol do zubového čerpadla. Následně byly představeny návrhy na eliminaci dominantní vady – tvorbě opalu při broušení čela. Funkčnost opatření byla následně otestována. Představené návrhy lze seřadit dle vlivu na tvorbu opalu:

1. změna procesních parametrů – posuvových rychlostí,
2. vyřezání chladicích drážek do broušícího kotouče,
3. zkrácení orovnávacího intervalu,
4. změna parametrů při orovnání,
5. výměna čerpadla přívodu procesní kapaliny.

Z ekonomického hlediska je pořadí obdobné, nejnákladnějším opatřením byla výměna čerpadla kvůli kolísání tlaku procesní kapaliny, kvalitativní ztráty však eliminovány nebyly. Vyřezání chladicích drážek do nástroje již dokázalo zmírnit četnost neshodných kusů, přičemž náklady na toto opatření jsou v daném objemu zanedbatelné. Největší vliv na tvorbu opalu na čele byl prokázán při snížení posuvové rychlosti v záběru. Pro tuto změnu navíc není potřeba vynaložit žádné finanční prostředky.

Při řešení zadaného problému a analýze obráběcího procesu byl nalezen prostor ke zkrácení výrobního času. V návaznosti na to byly navrženy změny vedoucí ke zrychlení taktu stroje. Konkrétně se jedná o:

1. zrychlení posuvové rychlosti při nájezdu nástroje,
2. zkrácení dráhy nástroje v poslední části obrábění.

Aplikováním těchto změn došlo ke snížení taktu operace 10 přibližně o 10%. Pro zvýšení produktivity celé výroby by bylo nutné snížit takt v následující operaci (na dalším stroji), která je tzv. úzkým místem výroby.

Návrhy již byly aplikovány do sériové výroby a došlo k razantnímu úbytku počtu vyřazených kusů v důsledku opalu na čele ozubeného kola. Vizualní kontrola na tuto vadu vyřadila od aplikování změn pouze 1 kus, přičemž kontrolováno bylo přes 20 000 obrobků.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Broušení. *ELUC* [online]. 2015 [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1240>
- [2] MARINESCU, Ioan D. *Tribology of abrasive machining processes*. 1. vydání. Norwich, NY: William Andrew Pub., 2004. ISBN 0-8155-1490-5.
- [3] DOBROVOLNÝ, Bohumil. *Broušení kovů: teoretické i praktické základy brusičské praxe*. 2. přeprac. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1962. Knižnice strojírenské výroby.
- [4] PALÁT, Hynek. *Honování* [online]. In: . [cit. 2021-03-10]. Dostupné z: https://www.sspu-opava.cz/static/UserFiles/File/_sablon/y/STT_III/VY_52_INOVACE_I-03-28.pdf
- [5] *Lapování, leštění* [online]. [cit. 2021-05-08]. Dostupné z: http://www.zamekkurim.cz/security/Dum%20-%20Digitalni%20ucebni%20materialy/10_Sada_Obrabeni_3/VY_32_INOVACE_10_04_Lapovani_lesteni.pdf
- [6] PALÁT, Hynek. *Lapování* [online]. [cit. 2021-03-10]. Dostupné z: https://www.sspu-opava.cz/static/UserFiles/File/_sablon/y/STT_III/VY_52_INOVACE_I-03-27.pdf
- [7] PALÁT, Hynek. *Broušení* [online]. In: . [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: https://www.sspu-opava.cz/static/UserFiles/File/_sablon/y/STT_III/VY_52_INOVACE_I-03-16.pdf
- [8] MARINESCU, Ioan, Mike HITCHINER, Eckart UHLMANN, W. ROWE a Ichiro INASAKI. *Handbook of Machining with Grinding Wheels*. 1. vydání. Taylor & Francis Group, 2007. ISBN 1574446711.
- [9] BRYCHTA, Josef. *Technologie II*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1822-1.
- [10] BROUŽINA, Jiří. *Analýza a kvantifikace přesnosti brousicího procesu* [online]. Brno, 2010 [cit. 2021-04-25]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/18637/final-thesis.pdf?sequence=6>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Jaroslav Prokop, CSc.
- [11] SCHNEIDER, George. Cutting Tool Applications, Chapter 16: Grinding Wheels and Operations. *American Machinist* [online]. 2020 [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: <https://www.americanmachinist.com/cutting-tools/media-gallery/21135367/chapter-16-grinding-wheels-and-operations-cutting-tool-applications>
- [12] *What are Diamond/CBN wheels (super abrasive wheels)?* [online]. [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: https://www.allied-material.co.jp/en/products/diamond/knowledge/about_diamond_cbn-wheel.html
- [13] Orovňávání brusných keramických kotoučů. *Tumlikovo* [online]. [cit. 2021-03-10]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/orovnavani-brusnych-keramickykh-kotoucu/>
- [14] BRIAN, William. *Principles of Modern Grinding Technology*. 1. vydání. Oxford: Elsevier, 2009. ISBN ISBN: 978-0-81-552018-4.

- [15] *Grinding Wheel Brochure: Solution for industry* [online]. Master Abrasives [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: <https://www.master-abrasives.co.uk/downloads/content/Master%20Grinding%20Wheel%20Brochure.pdf>
- [16] *Technologie broušení* [online]. 1. vydání. Kopřivnice: VOŠ, SOŠ A SOU KOPŘIVNICE, 2012 [cit. 2021-03-10]. Dostupné z: http://moodle2.voskop.eu/download/teu/U01_Technologie_brouseni.pdf
- [17] Základní rozdělení brusných kotoučů k ostření nástrojů. *Tumlikovo* [online]. [cit. 2021-03-10]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/zakladni-rozdeleni-brusnych-kotoucu-k-ostreni-nastroju/>
- [18] *Abrasives Manufacturing* [online]. [cit. 2021-05-18]. Dostupné z: <https://www3.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch11/final/c11s31.pdf>
- [19] *Diamond dressing wheels* [online]. [cit. 2021-05-09]. Dostupné z: <https://www.forturetools.com/product/diamond-dressing-wheels/>
- [20] SMETANOVÁ, Anna. *Orovnávání brusných kotoučů* [online]. [cit. 2021-04-22]. Dostupné z: http://www.zamekkurim.cz/security/Dum%20-%20Digitalni%20ucebni%20materialy/09_Sada_Obrabeni_2/VY_32_INOVACE_09_15_Orovnani_brusneho_kotouce.pdf
- [21] *Značení tvaru, rozměrů a specifikace* [online]. [cit. 2021-05-09]. Dostupné z: https://www.prodejbrusiva.cz/editor/image/stranky3_soubory/147/filename_147.pdf
- [22] TEORIE OBRÁBĚNÍ. *Střední Průmyslová Škola Strojnická a Vyšší Odborná Škola Technická* [online]. Brno [cit. 2021-04-28]. Dostupné z: <http://www.elitalycea.wz.cz/files/tep/tep19.pdf>
- [23] JERSÁK, Jan. *TEPLO A TEPLoty PŘI OBRÁBĚNÍ OPOTŘEBENÍ ŘEZNÝCH NÁSTR.* [online]. In: . s. 15 [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: http://educom.tul.cz/educom/inovace/TOB/VY_03_36-Teplo%20a%20teploty%20p%C5%99i%20obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD,%20opot%C5%99eben%C3%AD%20%C5%99ezn%C3%BDch%20n%C3%A1stroj%C5%AF_MZ_6%20%20.pdf
- [24] Povrchové úpravy. *Povrcháři* [online]. 2015(4), 26 [cit. 2021-04-19]. ISSN 1802-9833. Dostupné z: http://povrchari.cz/kestazeni/201504_povrchari.pdf
- [25] JECH, Jaroslav. *Tepelné zpracování oceli: metalografická příručka*. 4., přeprac. a dopl. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1983.
- [26] ČÁP, Robert a Jana PETRŮ. *Experimentální metody v obrábění*. 1. vydání. Ostrava: VŠB Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2533-5.
- [27] LIVOVSÝ, Lubomír. *Obvodové riešenie merania teploty pomocou termočlánkov* [online]. [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/mereni/id:27808/z-aktualniho-vydani-casopisu-obvodove-riesenie-merania-teploty-pomocou-termoclankov>
- [28] *47K Thermistor Output Table: Technický list* [online]. [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: http://2avrmz2nom8p47cc28p2743e-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2010/11/Thermistor_47K.pdf

- [29] SOVA, Jan a Jan KOVÁŘ. Termokamery a pyrometry. *Automa* [online]. **2014**(2), 7 [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/52891.pdf
- [30] SOVA, Jan a Karel KADLEC. Termokamery a pyrometry: princip měření, vlastnosti a využití. *All for power*. **2014**(1), 11.
- [31] Zubové čerpadlo. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Zubov%C3%A9_%C4%8Derpadlo
- [32] VOJÁČEK, Antonín. *Principy průmyslových čerpadel* [online]. [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/principy-prumyslovych-cerpadel-1-dil-zubova-cerpadla>
- [33] LANDHÄUBER, Felix. *Systém vstřikování s tlakovým zásobníkem Common Rail pro vznětové motory*. 1. české vyd. Přeložil Stanislav HANÁK. Praha: Robert Bosch, 2005. Technické vzdělávání. ISBN 80-903132-7-2.
- [34] *Vstřikovací systém Common Rail* [online]. [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/95765928-Vstrikovaci-system-common-rail.html>
- [35] PETRŮ, Jana a Robert ČEP. *Základy montáže: učební text*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-248-2773-5.
- [36] *EDX Analysis with SEM: How Does it Work?* [online]. [cit. 2021-04-30]. Dostupné z: <https://www.thermofisher.com/blog/microscopy/edx-analysis-with-sem-how-does-it-work/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Popis
CBN	kubický nitrit boru
EDX	energie dispersní rentgenová analýza

Symbol	Jednotka	Popis
b	[mm]	střední šířka třísky
d_s	[mm]	průměr broušícího kotouče
F_c	[N]	řezná síla ležící ve směru řezné rychlosti
F_f	[N]	posuvová síla
f_i	[mm/min]	posuvová rychlost v i-tém úseku
F_p	[N]	pasivní síla kolmá k řezné rychlosti
h	[mm]	střední tloušťka třísky
l_c	[mm]	délka kontaktní zóny
l_i	[mm]	dráha v i-tém úseku
n_s	[min ⁻¹]	otáčky broušícího kotouče
n_w	[min ⁻¹]	otáčky obrobku
P	[W]	výkon
Q	[J]	teplo
Q_K	[J]	teplo odvedené kapalinou
Q_N	[J]	teplo odvedené nástrojem
Q_O	[J]	teplo odvedené obrobkem
Q_P	[J]	teplo odvedené prostředím
Q_T	[J]	teplo odvedené třískou
R_a	[μm]	střední aritmetická hodnota drsnosti
R_Z	[μm]	výška nerovnosti profilu
t_{AS}	[min]	strojní čas
v_c	[m.min ⁻¹]	řezná rychlost

V_{cu}	[mm ³]	střední objem třísky
V_{fr}	[mm.min ⁻¹]	radiální rychlost posuvu
V_{ft}	[mm.min ⁻¹]	tangenciální rychlost posuvu
V_w	[m.min ⁻¹]	obvodová rychlost obrobku

