

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

Technická fakulta

**Hodnocení tepelného ovlivnění klikových hřídelí u  
axiálních ploch**

Diplomová práce

Vedoucí práce: Bc. Ing. Petr Hrabě, Ph.D.

Autor práce: Bc. Jiří Andrlé

PRAHA 2019

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Jiří Andrlé

Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

Hodnocení tepelného ovlivnění klikových hřídelí u axiálních ploch

Název anglicky

Evaluation of thermal crankshaft impact on axial surfaces

---

Cíle práce

Cílem diplomové práce je shromáždit a analyzovat aktuální poznatky o finálních technologických úpravách klikových hřídelí. Student shromáždí literární poznatky o předmětné problematice, ve které se zaměří především na rozbor problematiky týkající se broušení axiálních ploch.

V praktické části student provede praktické zkoušky broušení klikových hřídelí a analýzu naměřených dat.

Metodika

Současný stav řešeného problému (literární rešerše),

Cíl práce a metody jejího zpracování,

Výsledky experimentů a jejich diskuse,

Závěry a přínos práce.

Doporučený rozsah práce

cca 60 stran

Klíčová slova

Povrchové úpravy, broušení, plocha

---

Doporučené zdroje informací

BILÍK, O.: Obrábění I – 2.díl. 1. vydání. Ostrava: Editační středisko VŠB – TU Ostrava, 2002.

JANDEČKA, K.: Úvod k broušení tvarově složitých nástrojů I. Ústí nad Labem : Univerzita J.E. Purkyně, Knižnice strojírenské technologie. 2009.

KRÁL, M.: Engineering Technology, Praha : ČVUT, 2003.

KREIBICH, V.: Příčiny a důsledky nevhodných aplikací povrchových úprav, V Praze : České vysoké učení technické, 2004.

MAŇKOVÁ, I.: Progresivne technologie. 2. vydání. Košice: Viena – vydavatelství a tiskárny, 2000.

ŘASA, J., GABRIEL, V.: Strojírenská technologie 3: Metody, stroje a nástroje pro obrábění – 1.díl. 2. vydání. Praha: Scientia, 2005.

Vědecká literatura: Journal of Materials Processing Technology, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, Strojírenská technologie, Journal of materials science, Journal of material processing technology, Manufacturing technology.

---

Předběžný termín obhajoby

2018/19 LS – TF

Vedoucí práce

Bc. Ing. Petr Hrabě, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra materiálu a strojírenské technologie

---

Elektronicky schváleno dne 15. 2. 2019

prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Vedoucí katedry

---

Elektronicky schváleno dne 15. 2. 2019

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 01. 04. 2019

## Čestné prohlášení

„Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: *Hodnocení tepelného ovlivnění klikových hřídelí u axiálních ploch* vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Jsem si vědom, že moje diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí.

Jsem si vědom, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.“

V Praze dne .....

.....

Jiří Andrlé

## **Poděkování**

Touto cestou bych rád poděkoval všem, kteří mi při tvorbě diplomové práce pomohli. Především děkuji vedoucímu práce panu Bc. Ing. Petrovi Hraběti, Ph.D. za cenné rady, připomínky a čas, který mi věnoval. Dále děkuji panu Petrovi Hylenovi, paní Ing. Lucii Schmidové, Ph.D. a panu doc. Ing. Janu Jersákovi, CSc. za zapůjčení měřících přístrojů, za pomoc a rady při měření praktické části diplomové práce.

**Abstrakt:** Diplomová práce se zabývá popisem a analýzou technologie broušení při výrobě klikových hřídelí s hlavním zaměřením na axiální plochy a riziko vzniku tepelného poškození obrobku při obvodovém vnějším broušení do kulata. Je zde popsána technologie broušení od samotné podstaty této technologické operace, přes kinematiku broušení, typy brousících materiálů a pojiv a termodynamické jevy, které broušení doprovázejí. V práci jsou popsány metody hodnocení zbytkových napětí po technologické operaci broušení. V praktické části je tepelné poškození hodnoceno pomocí drsnosti broušeného povrchu a tato drsnost je následně porovnána s hodnotou magnetoelastického parametru naměřeného metodou hodnocení integrity povrchu pomocí analýzy Barkhausenova šumu. Výsledky měření a jejich analýz jsou využity v průmyslové praxi pro zefektivnění výroby kvalitních dílů dále využitelných v automobilovém průmyslu.

**Klíčová slova:** Povrchové úpravy; broušení; plocha

### **Evaluation of thermal crankshaft impact on axial surfaces**

**Summary:** The goal of this diploma thesis is the description and analysis of grinding technology in the production of the crankshafts with the main focus on the axial surfaces and the risk of grinding burn appearance on the workpiece after peripheral external grinding. The thesis describes grinding technology from the very essence of this technical operation, through grinding kinematics, types of grinding materials and binders and thermodynamic phenomena that accompany grinding. Methods of evaluation residual stresses after grinding are described. In the practical part, the thermal damage is evaluated by the roughness of the ground surface and this roughness is then compared with the magnetoelastic parameter value measured by the surface integrity method by Barkhausen noise analysis. Results of the measurements and analyses are used in industrial practice to make the production more effective and to produce high quality parts further used in the automotive industry.

**Keywords:** Surface finish; grinding; surface

## Obsah

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>ÚVOD .....</b>  | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>CÍLE A METODIKA PRÁCE .....</b>                             | <b>2</b>  |
| <b>3</b> | <b>SOUČASNÝ STAV SLEDOVANÉ PROBLEMATIKY .....</b>              | <b>3</b>  |
| 3.1      | TEORIE BROUŠENÍ KOVŮ .....                                     | 3         |
| 3.2      | PODSTATA BROUŠENÍ .....  | 3         |
| 3.3      | NAMÁHÁNÍ OBROBKU PŘI BROUŠENÍ .....                            | 4         |
| 3.4      | KINEMATIKA BROUŠENÍ .....                                      | 5         |
| 3.4.1    | <i>Rovinné broušení .....</i>                                  | <i>5</i>  |
| 3.4.2    | <i>Obvodové vnější broušení do kulata .....</i>                | <i>7</i>  |
| 3.5      | DRUHY BROUSÍCÍCH MATERIÁLŮ A POJIV .....                       | 8         |
| 3.5.1    | <i>Konvenční brousící materiály .....</i>                      | <i>9</i>  |
| 3.5.2    | <i>Kubický nitrid boru (CBN) .....</i>                         | <i>10</i> |
| 3.5.3    | <i>Diamant .....</i>   | <i>11</i> |
| 3.6      | POJIVA .....   | 11        |
| 3.6.1    | <i>Organická pojiva .....</i>                                  | <i>11</i> |
| 3.6.2    | <i>Keramická pojiva .....</i>                                  | <i>12</i> |
| 3.6.3    | <i>Kovová pojiva .....</i>                                     | <i>12</i> |
| 3.7      | TERMODYNAMICKÉ JEVY PŘI BROUŠENÍ .....                         | 13        |
| 3.8      | ZBYTKOVÁ NAPĚTÍ .....  | 15        |
| 3.8.1    | <i>Zbytková napětí dle mechanismu vzniku .....</i>             | <i>15</i> |
| 3.8.2    | <i>Zbytková napětí dle velikosti rovnovážného objemu .....</i> | <i>16</i> |
| 3.9      | HĹOUBKOVÉ PROFILY ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ .....                      | 19        |
| 3.10     | METODY MĚŘENÍ A HODNOCENÍ ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ .....              | 21        |
| 3.10.1   | <i>Odvrtávací metoda .....</i>                                 | <i>22</i> |
| 3.10.2   | <i>Difrakční analýza .....</i>                                 | <i>24</i> |
| 3.10.3   | <i>Měření Barkhausenova šumu .....</i>                         | <i>25</i> |
| 3.10.4   | <i>Leptání nitalem .....</i>                                   | <i>28</i> |
| <b>4</b> | <b>PRAKTICKÁ ČÁST PRÁCE .....</b>                              | <b>29</b> |
| 4.1      | KLIKOVÁ HRÍDEL .....   | 29        |
| 4.2      | VYHODNOCOVÁNÍ OPALŮ .....                                      | 30        |
| 4.3      | MATERIÁLY A CHEMICKÉ SLOŽENÍ .....                             | 30        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 4.4      | TECHNOLOGIE BROUŠENÍ KLIKOVÝCH HŘÍDELŮ.....                 | 32        |
| 4.5      | OROVNÁVÁNÍ .....  | 32        |
| 4.6      | HODNOCENÍ DRSNOSTI POVRCHU .....                            | 34        |
| 4.6.1    | <i>Princip měření drsnosti .....</i>                        | <i>34</i> |
| 4.6.2    | <i>Drsnost povrchu a opotřebení brousícího kotouče.....</i> | <i>34</i> |
| 4.7      | ZKOUŠKA OBROBITELNOSTI MATERIÁLU SIDENOR.....               | 35        |
| 4.7.1    | <i>Popis zkoušky.....</i>                                   | <i>35</i> |
| 4.8      | POROVNÁNÍ OBROBITELNOSTI RŮZNÝCH DODAVATELŮ SUROVINY .....  | 38        |
| 4.9      | ANALÝZA BARKHAUSENOVA ŠUMU .....                            | 41        |
| <b>5</b> | <b>ZÁVĚR.....</b>   | <b>45</b> |
| <b>6</b> | <b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>                      | <b>47</b> |
| <b>7</b> | <b>PŘÍLOHY .....</b>  | <b>53</b> |



## Seznam obrázků

|  |    |
|--|----|
| Obr. 3.1 Schéma fází při broušení (1) .....  | 3  |
| Obr. 3.2 Napětí pod povrchem při modelovém působení brousícího zrna na povrch (1) .....                  | 4  |
| Obr. 3.3 Schéma rovinného broušení (6).....  | 5  |
| Obr. 3.4 Závislost tvrdosti brousících materiálů na teplotě (2).....                                     | 10 |
| Obr. 3.6 Tepelný tok generovaný při broušení (19) .....  | 13 |
| Obr. 3.7 Zbytková napětí dle rovnovážného objemu (50) (28).....  | 16 |
| Obr. 3.8 Rozložení teplot a schema vzniku zbytkových napětí při broušení (17).....                       | 18 |
| Obr. 3.9 Průběhy hloubkových profilů zbytkového napětí po broušení (31).....                             | 19 |
| Obr. 3.10 Průběhy hloubkových profilů zbytkového napětí po broušení (31).....                            | 19 |
| Obr. 3.11 Typický naměřený průběh zbytkových napětí (48).....  | 20 |
| Obr. 3.12 Deformace otvoru po odvrtání při tahovém zbytkovém napětí v materiálu (47).....                | 22 |
| Obr. 3.13 Schéma tenzometrické růžice pro měření deformací od uvolněných zbytkových napětí (33).....     | 24 |
| Obr. 3.14 Mezní hodnota MP pro hodnocení integrity povrchu a kvality dílů (51).....                      | 26 |
| Obr. 3.15 Závislost zbytkových napětí a tvrdosti na magnetoelastickém parametru (51) .....               | 26 |
| Obr. 3.16 Schématické zobrazení snímače Barkhausenova šumu (52).....                                     | 27 |
| Obr. 4.1 Schéma klikové hřídele (52) .....   | 29 |
| Obr. 4.2 Naměřené hodnoty drsnosti povrchu HL III pro materiál Sidenor, kotouč MachRotec .....           | 35 |
| Obr. 4.3 Naměřené hodnoty drsnosti povrchu HL III pro materiál Sidenor, kotouč Tesch Standard .....      | 36 |
| Obr. 4.4 Graf závislosti drsnosti povrchu na počtu obrobených kusů po orovnění na straně ke konečku..... | 39 |
| Obr. 4.5 Graf závislosti drsnosti povrchu na počtu obrobených kusů po orovnění na straně k přírubě.....  | 39 |
| Obr. 4.6 Měřicí přístroj Rollscan 300 při měření klikové hřídele .....                                   | 41 |
| Obr. 4.7 Snímač pro měření boků ozubených kol č. 5912 ve styku s měřenou plochou .....                   | 42 |
| Obr. 4.8 Vybrané měřené body na axiální ploše HL III, a) strana FS, b) strana ZS .....                   | 43 |

## Seznam tabulek

|  |    |
|--|----|
| Tab. 3.1 Porovnání některých detekčních metod tepelného poškození po broušení (48) .....                 | 21 |
| Tab. 4.1 Vysvětlivky ke schématu klikové hřídele .....   | 29 |
| Tab. 4.2 Třídy tepelného poškození .....   | 30 |
| Tab. 4.3 Parametry orovnávání brousících kotoučů .....   | 33 |
| Tab. 4.4 Parametry programů pro měření drsnosti povrchu .....  | 34 |
| Tab. 4.5 Naměřené hodnoty drsnosti povrchu a vlnitosti.<br>Materiál Sidenor, kotouč Tesch Standard ..... | 37 |
| Tab. 4.6 Naměřené hodnoty drsnosti povrchu a vlnitosti.<br>Materiál Sidenor, kotouč MachRotec 11.1 ..... | 37 |
| Tab. 4.7 Naměřené hodnoty drsnosti povrchu pro různé suroviny, strana k přírubě .....                    | 40 |
| Tab. 4.8 Naměřené hodnoty drsnosti povrchu pro různé suroviny, strana ke konečku .....                   | 40 |

## Seznam použitých zkratk a symbolů

|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| $v_w$ [m.s <sup>-1</sup> ]      | - obvodová rychlost obrobku                   |
| $b$ [mm]                        | - axiální posuv                               |
| $w$ [mm]                        | - šířka kotouče                               |
| $a$ [mm]                        | - radiální posuv                              |
| $D_s$ [mm]                      | - průměr brousícího kotouče                   |
| $D_w$ [mm]                      | - průměr obrobku                              |
| $n_w$ [min <sup>-1</sup> ]      | - frekvence otáčení obrobku                   |
| $j$ [-]                         | - poměr rychlosti                             |
| $v_c$ [m.s <sup>-1</sup> ]      | - řezná rychlost                              |
| $n_s$ [min <sup>-1</sup> ]      | - frekvence otáčení brousícího kotouče        |
| $l_g$ [mm]                      | - délka styčného oblouku                      |
| $\tau$ [ms]                     | - doba kontaktu zrna s obrobkem               |
| $\alpha_p$ [rad]                | - úhel záběru                                 |
| $l_k$ [mm]                      | - kinematická délka styku                     |
| $v_{wo}$ [m.min <sup>-1</sup> ] | - obvodová rychlost obrobku                   |
| CBN                             | - kubický nitrid boru                         |
| HV [kg.mm <sup>-2</sup> ]       | - tvrdost dle Vickerse                        |
| $R_z$ [μm]                      | - maximální výška profilu při měření drsnosti |
| $l_f$ [mm]                      | - základní délka měřeného profilu drsnosti    |
| $l_t$ [mm]                      | - celková délka pohybu snímače                |

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| $l_n$ [mm]                  | - měřená délka drsnosti povrchu               |
| $v_t$ [mm.s <sup>-1</sup> ] | - rychlost pohybu snímače]                    |
| P [W]                       | - brousící výkon                              |
| $b_w$ [mm]                  | - šířka kontaktu kotouče s obrobkem           |
| $q_o$ [J]                   | - teplo odvedené obrobkem                     |
| $q_z$ [J]                   | - teplo odvedené abrazivním zrnem (nástrojem) |
| $q_k$ [J]                   | - teplo odvedené kapalinou                    |
| $q_t$ [J]                   | - teplo odvedené třískou                      |
| ZN                          | - zbytkové napětí                             |
| MP                          | - magnetoelastický parametr                   |

## 1 Úvod

Proces výroby automobilových součástí je stejně jako většina dalších průmyslových odvětví ovlivněna snahou o výrobu stále přesnějších, dokonalejších a v neposlední řadě také levnějších dílů. Automobilový průmysl je navíc jakožto jeden z nejviditelnějších oborů vystavován stále většímu tlaku na snižování emisí. Tyto faktory vyúsťují ve snahu výrobců automobilů co nejvíce zefektivnit samotný proces výroby, což se samozřejmě týká i výroby klikových hřídelí. Výroba tohoto důležitého komponentu zahrnuje nespočet různorodých technologických operací včetně broušení, které je považováno za jeden z nejméně pochopených obráběcích procesů. Při broušení klikových hřídelí po indukčním kalení může nastat komplikace v podobě spálenin obráběného povrchu, což je běžná známka tepelného poškození, které je jedním z hlavních omezení při broušení s ohledem na vysokou kvalitu.

Ve snaze o zrychlení procesu výroby a požadavku na co největší přesnost obrobeneho materiálu však nelze opomíjet zbytková napětí a integritu povrchu, které jsou ovlivňovány samotným procesem broušení. Je potřeba zvolit veškeré parametry obrábění tak, aby byl zachován takt výroby a zároveň vyhovující kvalita produkovaných dílů. Pro dynamicky zatížené strojní součásti je velice důležité, aby bylo celkové napětí v nejvíce zatížené tenké povrchové vrstvě tlakové. Celkové napětí je součtem zbytkových napětí obrobene součásti a namáhání způsobeným vnějšími silami a momenty. Pro zajištění dlouhé životnosti klikové hřídele je velmi důležité nastavit parametry výroby tak, aby zbytková napětí v povrchové vrstvě byla vhodně rozložena a nepřekračovala stanovené meze.

Existuje mnoho metod, které mohou kvalitativně popsat stav zbytkového napětí v komponentu. Volba vhodné techniky se tak váže na podmínky výroby, časové možnosti, velikost a počet měřených dílů a v neposlední řadě finance. Jednou z vhodných metod je měření Barkhausenova šumu, které se jeví jako nejrychlejší a nejjednodušší měření ze strany obsluhy. Měření je založeno na feromagnetickém jevu, který je vyvolán měnicím se magnetickým polem ve feromagnetickém materiálu. Vzhledem k tomu, že charakteristika Barkhausenova šumu je ovlivněna mikrostrukturou, tvrdostí a stavem napětí magnetizovaného materiálu, je vhodné jej použít v průmyslu pro rychlou kontrolu kvality, kde je čas měření velmi důležitý.

## 2 Cíle a metodika práce

**Cíle práce:** Cílem této diplomové práce je shromáždit a analyzovat aktuální poznatky o finálních technologických úpravách klikových hřídelí, především technologii broušení. Hlavní zaměření se týká problematiky broušení axiálních ploch. Mezi dílčí cíle patří popsání rizika vzniku tepelného poškození při broušení, jeho rozbor a popsání vztahu mezi tepelným poškozením a zbytkovým napětím v materiálu, včetně popisu dostupných metod zjišťování zbytkových napětí. Tato část diplomové práce je zpracována formou literární rešerše, mimo jiné prostřednictvím aktuálních vědeckých článků z elektronických informačních zdrojů ScienceDirect, ProQuest, ResearchGate a Web of Science. V praktické části je za cíl stanoveno porovnání vztahu mezi drsností povrchu po broušení a vznikem tepelného poškození, porovnání drsnosti různých materiálů. V neposlední řadě se praktická část zaměřuje na měření Barkhausenova šumu na broušených plochách a jeho porovnáním s drsností povrchu.

**Metodika:** Literární rešerše aktuálních poznatků z oblasti broušení klikových hřídelí a popis metod měření zbytkových napětí. V praktické části naměření relevantních dat, jejich zpracování a vyhodnocení. Výběr vhodných metod hodnocení tepelného poškození klikových hřídelí a jejich porovnání. Doporučení pro průmyslovou praxi a další výzkum.

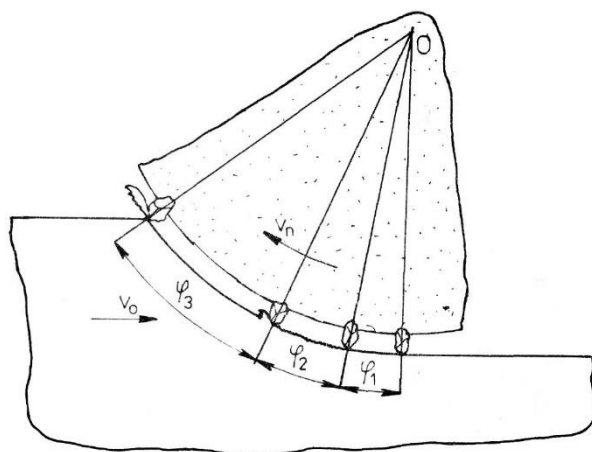
### 3 Současný stav sledované problematiky

#### 3.1 Teorie broušení kovů

Broušení, jako jedna z metod abrazivního obrábění je v lidské činnosti využívána více než 2000 let. Pokud nebudeme považovat rané pokusy člověka používat pískovec jako abrazivní nástroj pro broušení ručních nástrojů z kamene, později z bronzu či železa, jistě jako příklad broušení poslouží používání železných pilníků v Řecku a Římské říši. Postup této hojně využívané technologie však pokročil takovým způsobem, že dnes můžeme být svědky vývoje vedoucího k současným brusným s programovým řízením, používajícím brousící kotouče z umělých diamantů a kubického nitridu boru. [1] [2] [3]

#### 3.2 Podstata broušení

Broušení spočívá v obrábění materiálu mnohobřitým nástrojem, který se vyznačuje odlišnou, nedefinovanou geometrií těchto břitů. Tyto břity jsou tvořeny hranami jednotlivých zrn brousícího materiálu – nástroje. Velké množství zrn je spojeno dohromady pomocí pojícího materiálu a dohromady tak tvoří brousící nástroj, který může mít tvar brousícího pásu či kotouče. Broušení představuje jednu z nejvíce využívaných dokončovacích operací při obrábění strojírenských součástí. Je často používáno v případě obrábění tvrdých obrobků, u kterých je vyžadován hladký povrch funkčních ploch a zároveň vysoký parametr přesnosti. Pro tento dokončovací proces je typické odebrání velkého množství malých třísek. [3] [4]

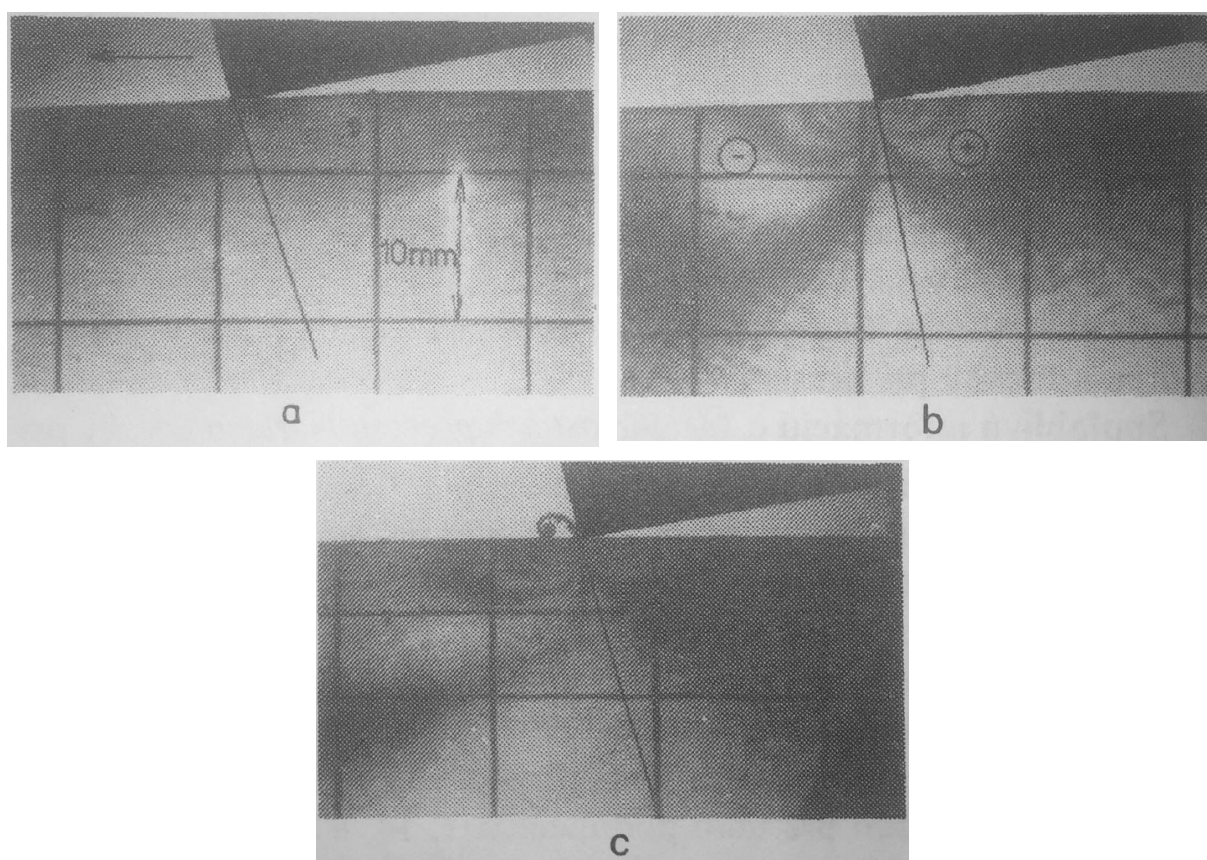


Obr. 3.1 Schéma fází při broušení [1]

$\varphi_1$  – fáze elastické deformace povrchu,  $\varphi_2$  – fáze plastické deformace povrchu před brousícím zrnem,  $\varphi_3$  – fáze tvoření třísky

### 3.3 Namáhání obrobku při broušení

Při pohybu brousícího kotouče po povrchu obrobku na obrobek působí různé typy namáhání. Každé zrno, které odřezává materiál při pohybu v kontaktní zóně, prochází třemi stádii, což je znázorněno na Obr. 3.1: elastická (pružná) deformace povrchu, plastická deformace povrchu a odebrání třísky. Některé prameny [3] dělí plastickou deformaci povrchu na stádium bez odebrání třísky (hrnutí materiálu) a na samotné řezání s odběrem třísky. Schéma těchto procesů je znázorněno na Obr. 3.2. [1] [3]



Obr. 3.2 Napětí pod povrchem při modelovém působení brousícího zrna na povrch [1]

*a – fáze elastické deformace, b – fáze plastické deformace, c – fáze tvoření třísky*

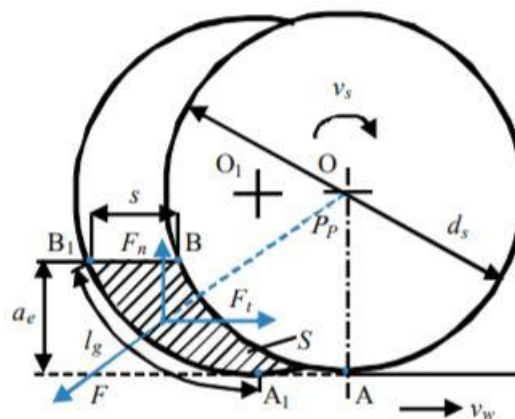


### 3.4 Kinematika broušení

Řezné parametry hrají důležitou roli při určování základních veličin, jako je tloušťka třísky nebo kontaktní plocha. Jedná se především o kinematické výpočty, které závisí na konkrétním typu broušení. Tato část práce se zaměří na dva hlavní typy broušení: rovinné a do kulata.

#### 3.4.1 Rovinné broušení

Tento typ broušení je navržen tak, aby produkoval vysoce přesné ploché rovinné povrchy s malou drsností povrchu. Přestože rovinné broušení není v porovnání s jinými typy broušení v praxi tolik využívané, je pro pochopení kinematických procesů díky své jednoduchosti nejvhodnější. Nejprve je nutné definovat určité rychlosti, pohyby a rozměry, abychom mohli popsat řezné parametry. Rychlost obrobku  $v_w$  je taková rychlost, kterou se pohybuje obrobek vůči brousícímu nástroji, v tomto případě brousícímu kotouči. Při rovinném broušení mění  $v_w$  svoji orientaci na konci záběru, přičemž je současně obrobek posunut podél osy otáčení vřetene o vzdálenost  $b$ , axiální posuv. Tato vzdálenost je většinou několikrát menší než šířka kotouče  $w$ . Hloubka, radiální hloubka, či radiální posuv  $a$  definuje vzdálenost, kterou kotouč vystupuje pod neobroušenou plochu obrobku. Radiální posuv je nutně menší nebo stejný jako přírůstek na broušení, tedy množství materiálu určené k broušení, v řádu od 0,1 do 1 mm. [5] [1] [2]



Obr. 3.3 Schéma rovinného broušení [6]

S výše definovanými pojmy mohou být formulovány následující geometrické a kinematické veličiny.

Penetrace brousícího kotouče do obrobku vede k odstranění materiálu z určité plochy tohoto obrobku. Tato **plocha obrobeného materiálu**  $S$  vyjádřená hloubkou řezu může být vypočtena jako [6]

$$S = l_g \cdot s = \frac{v_w}{v_c} \cdot a \cdot D_s \quad [mm^2] \quad (1)$$

kde:  $l_g$  [mm] je délka styčného oblouku,

$s$  [mm] je délka posuvu,

$v_w$  [m.s<sup>-1</sup>] je rychlost obrobku,

$v_c$  [m.s<sup>-1</sup>] je řezná rychlost brousícího kotouče,

$a$  [mm] je radiální posuv,

$D_s$  [mm] je průměr brousícího kotouče.

Ze vztahu je zřejmé, že plocha  $S$  je nepřímo úměrná k poměru rychlostí  $v_c/v_w$  a roste se zvětšujícím se průměrem brousícího kotouče a hloubkou broušení. [5]

Stykový oblouk obrobku a brousícího kotouče lze vyjádřit pomocí různých parametrů, jako je geometrická délka styku, kinematická délka styku nebo skutečná délka styku. [7]

**Délka styčného oblouku** je pro běžné podmínky vyjádřena vztahem [5]

$$l_g = \sqrt{a \cdot D_s} \quad [mm] \quad (2)$$

**Doba kontaktu zrna s obrobkem**  $\tau$  v délce styčného oblouku je dána geometrickou kontaktní délkou dělenou řeznou rychlostí [6]

$$\tau = \frac{l_g}{v_c} \quad [ms] \quad (3)$$

**Řezná rychlost**  $v_c$  je definována jako tangenciální rychlost brousícího kotouče ve zvoleném bodě. [4]

$$v_c = \frac{\pi \cdot D_s \cdot n_s}{60 \cdot 10^3} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (4)$$

kde:  $n_s$  [ $\text{min}^{-1}$ ] je frekvence otáčení brousícího kotouče.

Výsledný vektor síly  $F$ , kterou působí zrna brousícího kotouče na materiál obrobku, obecně roste s velikostí plochy obrobeného materiálu a mimo jiné závisí na geometrii broušení a její kinematice, viz Obr. 3.3. Další faktory ovlivňující velikost síly  $F$  jsou mechanické vlastnosti materiálu obrobku, tloušťka třísky, opotřebení brousícího kotouče a podmínky styku brousících zrn a obrobku (kontaktní napětí a koeficient tření). Směr vektoru  $F$  je určen vypočteným **úhlem záběru**  $\alpha_p$ . [6]

$$\alpha_p = \frac{l_g}{2} \cdot \frac{4}{\pi \cdot D_s} \cdot 90^\circ = 57,32 \sqrt{\frac{a}{D_s}} \quad [rad] \quad (5)$$

### 3. 4. 2 Obvodové vnější broušení do kulata

Obrobek, stejně jako brousící kotouč, konají při obvodovém vnějším broušení do kulata rotační pohyb. Tato metoda abrazivního obrábění je zároveň s bezhrotým broušením nejvíce používaná při výrobě ložisek a ložiskových ploch. Zároveň se tento typ broušení používá při výrobě klikových hřídelů. Oba tyto procesy vytváří velmi přesné povrchy s nízkou drsností povrchu. [5]

Obvodové vnější broušení do kulata lze dále rozdělit podle hlavního pohybu posuvu stolu vzhledem k brousícímu kotouči na následující typy:

- a) axiální broušení (rovnoběžný posuv stolu s osou kotouče)
- b) tangenciální broušení (rovnoběžný posuv stolu s vektorem obvodové rychlosti kotouče ve zvoleném bodě)
- c) radiální broušení (ve zvoleném bodě je hlavní posuv stolu vzhledem k brousícímu kotouči radiální)
- d) obvodové zapichovací broušení (plynulý radiální posuv stolu)
- e) čelní zapichovací broušení (plynulý axiální posuv stolu). [7] [8]

Určité parametry, jako řezná rychlost či délka styčného oblouku se dají vyjádřit obdobně jako u rovinného broušení. Proto budou dále uvedeny pouze vztahy, které jsou odlišné či ještě nebyly definovány.

**Obvodová rychlost obrobku**  $v_w$  při rotačním broušení lze vyjádřit vztahem [4]

$$v_w = \frac{\pi \cdot D_w \cdot n_w}{60} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (6)$$

kde:  $D_w$  [mm] je průměr obrobku,

$n_w$  [ $\text{min}^{-1}$ ] je frekvence otáčení obrobku.

**Kinematická délka styku**  $l_k$  pro broušení do kulata lze vyjádřit vztahem [7]

$$l_k = l_g \cdot \left(1 + \frac{1}{j}\right) \quad [mm] \quad (7)$$

kde:  $j$  [-] je poměr rychlosti, který se pro daný typ broušení stanoví dle vztahu

$$j = \frac{60 \cdot v_c}{v_w} \quad [-] \quad (8)$$

Vzhledem ke složitosti vztahů pro výpočet parametrů třísek odebíraných jednotlivými zrny brousícího nástroje se pro výpočty využívá ekvivalentní (střední) tloušťka třísky  $h_{eq}$ . Pokud budeme znát tuto hodnotu, je možné vypočítat dynamické a energetické parametry brousícího procesu. Při odvozování tohoto parametru se vychází z výchozího materiálu vstupujícího do oblasti broušení na jedné straně a na třískách vycházejících z tohoto procesu na straně druhé.

**Ekvivalentní tloušťka třísky**  $h_{eq}$  se pak vypočítá jako [4]

$$h_{eq} = \frac{v_w}{60 \cdot v_c} \cdot a \quad [mm] \quad (9)$$

### 3.5 Druhy brousících materiálů a pojiv

Brousící materiály se kromě aplikací vyžadujících volná zrna (brousící, leštící a lapovací prášky), zrna nalepená k pružnému podkladu (brousící a leštící papíry a plátna, brousící pásy) a zrna rozptýlená v tekutinách a mazadlech (brousící a leštící pasty) nejčastěji vyskytuje ve formě zrn spojených pojivy v tuhá tělesa příslušného tvaru (brousící kotouče, segmenty). Tímto způsobem vyrobený brousící kotouč se tak skládá z tisíců velmi malých řezných hran ve formě

abrazivních zrn, které jsou k sobě spojeny pomocí pojícího materiálu, který zároveň obsahuje vzduchové mezery a prázdné prostory. Při správně zvolených brousících parametrech jsou již otupená zrna z brousícího kotouče vylamována, a tak uvolňují místo novým ostrým zrnům, čímž je zajištěna samoostřicí funkce. [9] [4] [5] [10]

Nejdůležitějším parametrem brousícího materiálu je jeho tvrdost. Je důležité, aby byla zachována i při vysokých teplotách, které při broušení vznikají, a aby brusivo nebylo chemicky reaktivní a nerozptylovalo se do obráběného materiálu. U většiny materiálů však jejich tvrdost s rostoucí teplotou klesá, jedinou výjimkou je oxid křemičitý  $\text{SiO}_2$ , který se při vysokých teplotách transformuje do tvrdší struktury. Nejtvrdším brousícím materiálem je diamant, následovaný kubickým nitridem boru. Každý materiál má však svá specifika, výhody a nevýhody pro broušení různých materiálů. Při výběru vhodného brousícího materiálu se musí brát v potaz i tribologické podmínky, opotřebením kotoučů a chemické působení na obráběný materiál. Jednotlivé brousící materiály lze rozdělit do třech hlavních skupin – konvenční brousící materiály, diamantové brousící materiály a brousící materiály z kubického nitridu boru. Poslední zmíněné skupiny se někdy souhrnně označují jako superabraziva. [2] [4]

### **3. 5. 1 Konvenční brousící materiály**

V technické praxi se používají standardní brousící materiály na bázi oxidu hlinitého  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , karbidu křemíku  $\text{SiC}$  a oxidu zirkoničitého ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + 10\text{-}20\% \text{ZrO}$ ). Mezi další přírodní abraziva patří smírek, pískovec, oxid železitý či granát, ale tyto materiály nejsou běžně používané pro výrobu brousících kotoučů. [2]

Umělý korund, materiál na bázi oxidu hlinitého, je velice tvrdý materiál používaný k broušení železných materiálů včetně ocelí. Tento typ brusiva se běžně používá právě na ocel, ocel na odlitky, temperované litiny a tvrdé bronzy. Umělý korund se dále dělí na několik modifikací.

Bílý korund, někdy také elektrokorund bílý, je jeho nejčistší forma, která se vyznačuje výbornou samoostřicí schopností díky snadnému vylamování opotřebených zrn. Proto se používá pro broušení rychlořezných, kalených a nerezavějících ocelí a pro broušení nástrojů.

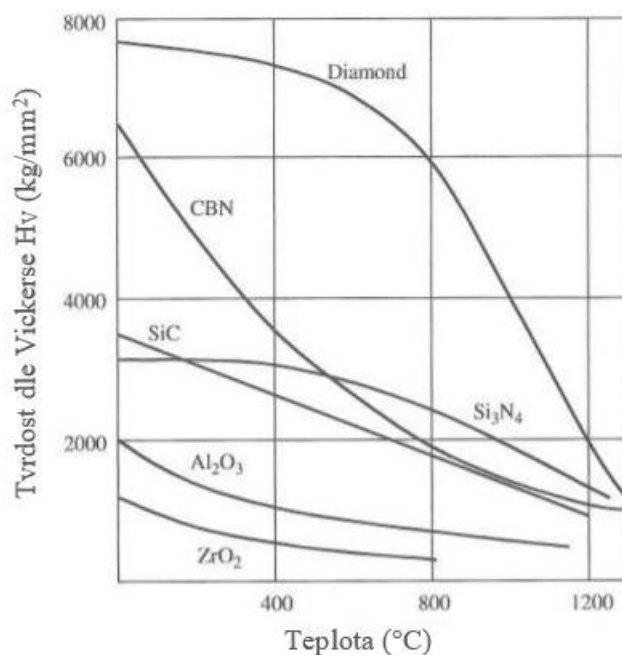
Elektrokorund růžový obsahuje oxid chromu, díky kterému má charakteristickou růžovou barvu. Přídavek 0,5 - 5 % oxidu chromu zvyšuje drolivost. Přidáním oxidu titanu se zvyšuje tvrdost. Tato modifikace se používá pro broušení vysoce legovaných ocelí velké pevnosti před kalením.

Poslední modifikací je elektrokorund hnědý, který se používá pro broušení vysokopevnostních materiálů, například legovaných ocelí, rychlořezných ocelí, tvrdých bronzů a také pro hrubovací práce. [2] [4] [9]

Brousící materiály typu SiC jsou tvrdší než materiály na bázi oxidu hlinitého. Jsou tak nejtvrďšími konvenčními abrazivy, avšak mají nižší odolnost proti nárazu a vykazují rychlejší opotřebení při broušení kovů s vysokou afinitou k uhlíku, jako jsou železo a nikl než výše popsané umělé korundy. Používají se proto primárně pro neželezné materiály, ale lze je v některých aplikacích použít pro broušení šedé a temperované litiny. Karbid křemíku se používá ve dvou variacích. Černá varianta se používá na litinu, bronz, hliník, minerální a keramické materiály. Tvrdší a čistší zelená forma karbidu křemíku nachází uplatnění při broušení slinutých karbidů, keramických hmot a skla. [2] [4] [9]

### 3. 5. 2 Kubický nitrid boru (CBN)

Kubický nitrid boru je obecně druhý nejtvrďší materiál používaný při broušení. Přestože je jeho cena vyšší než cena konvenčních abraziv, výsledné náklady mohou být nižší díky jeho menšímu opotřebení. Proto v mnoha případech nahrazuje standardní brousící materiály pro přesné broušení kalených ocelí. Dalším výhodou použití brousících CBN kotoučů je jejich schopnost zachovávat přesnou toleranci broušených součástí. Jeho použití je částečně limitováno vyšším



Obr. 3.4 Závislost tvrdosti brousících materiálů na teplotě [2]

opotřebením při používání řezných kapalin na bázi vody než při použití tekutin na základě oleje bez příměsí vody. Již zmiňovaná tvrdost kubického nitridu boru klesá s rostoucí teplotou kvůli transformaci z kubické na šesterečnou soustavu. Tvrdost CBN je přesto vyšší než u konvenčních abraziv i při relativně vysokých teplotách, což je zřejmé z Obr. 3.4. [2] [11]

### **3.5.3 Diamant**

Diamant, jako nejtvrděší materiál používaný při broušení může být použit pro broušení velmi tvrdých materiálů včetně nejtvrděší keramiky. Další výhodou diamantu je zachování jeho tvrdosti i při vysokých teplotách, což znázorňuje graf na Obr. 3.4. Diamant je stabilní až do 760 °C na vzduchu, ve vakuu až do 1400 °C. Jelikož je diamant určitou formou uhlíku, není vhodný pro broušení ocelí. Rozpustnost uhlíku v nízkouhlíkovém železe a oceli způsobuje rychlé opotřebení diamantových kotoučů. Chemicko-termické degradace činí diamant nevhodným pro broušení ocelí a slitin na bázi niklu. Diamant je extrémně odolný vůči mechanickému opotřebení třením. Opotřebení má tendenci být spojováno s chemicko-termickou degradací za přístupu kyslíku při vysokých teplotách. Většinu aplikací při broušení zastávají převážně syntetické diamanty. Přírodní alternativy jsou ale stále používané v určitých specifických procesech i přes jejich vysokou cenu. Částečně jsou přírodní diamanty používány pro orovnávací nástroje. [2] [12]

## **3.6 Pojiva**

Pojiva, spojující jednotlivá abrazivní zrna do požadovaného tvaru a zároveň ovlivňující i maximální povolenou obvodovou rychlost kotouče, se dají rozdělit do třech hlavních skupin: organická či pryskyřičná pojiva, keramická (sintrovaná) pojiva a kovová pojiva. Vazba zrn brusiva má výrazný vliv na samoostřicí schopnost nástroje (umožňuje uvolňovat již opotřebená a otupená zrna a nahrazovat je ostrými). Mezi hlavní nároky na pojiva patří schopnost odolávat vlivům teplot a vlivům procesních kapalin. [2] [13] [14]

### **3.6.1 Organická pojiva**

Pojiva organická se vyznačují větší elasticitou než ostatní, což je hlavním důvodem jejich volby při požadavku na bezpečnost při vysokých brousících rychlostech, a potřeby více leštěného povrchu. Tato pojiva se používají převážně v kombinaci s konvenčními abrazivy, ale při požadavku na extrémně nízkou drsnost povrchu jsou používány i ve spojení se superabrazivy. Mezi organická pojiva patří pryž, šelak, umělé pryskyřice (bakelit) a polyurethan. Nejpoužívanější v oblasti strojírenství je pryskyřičné pojivo, kterým lze brousit za sucha i

s chlazením. Kovová pojiva budou uvedena samostatně. Mezi nevýhody organických pojiv patří zejména podléhání rychlému opotřebení za vysokých teplot. Další problém u přírodních pojiv nastává při skladování, jelikož je nutné sledovat jejich stárnutí s ohledem na bezpečnost. [2] [13] [14]

### **3. 6. 2 Keramická pojiva**

U keramických pojiv je vazba mnohem silnější než u pojiv organických, ale stále značně slabší než u pojiv kovových. Velká výhoda sintrovaných pojiv spočívá ve snadnosti jejich tvarování, a tak vytvoření tvaru pro broušení daných profilů. Orovnávání kotoučů s keramickými pojivy umožňuje jejich znovunaostření v případě, že je kotouč příliš otupený či nepravidelný. V technické praxi se jedná o velmi často používané pojivo, zejména u umělého korundu. U superabraziv je většina brousících kotoučů z kubického nitridu boru (CBN) právě s keramickou vazbou. Keramická pojiva se skládají ze směsi skel, jílu a tavidel (borax, živec). Po smíchání brusiva, pojiva a dalších přísad je směs pěchována do forem příslušných tvarů. Následně se vytvarované kotouče vypalují při řízeném tepelném procesu při teplotách až 1300 °C. [2] [13] [14]

### **3. 6. 3 Kovová pojiva**

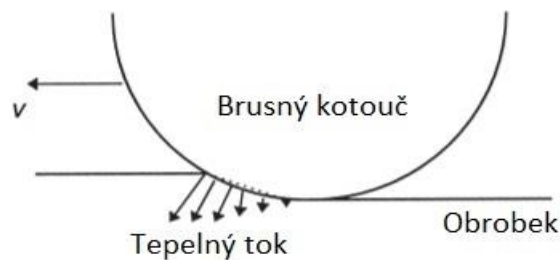
Kovová pojiva se využívají pro CBN a diamant, tedy superabraziva pro nejnáročnější brousící aplikace s nejvyššími nároky na stálost tvaru a tvar řezné hrany. Abrazivní zrna mohou být pomocí kovového pojiva nanášena na brousící kotouč, kovový či karbonový, v jedné samostatné či více vrstvách. Jednovrstvé brousící kotouče jsou velmi drahé z důvodu náročné výroby, navíc vyžadována velká přesnost, jelikož tyto kotouče nemohou být orovnávány. Výroba brousících kotoučů s kovovými pojivy se provádí dvěma různými způsoby. Brousící zrna, typicky CBN nebo diamant, jsou nanášena na brousící kotouč pomocí přesného kovového povlaku prostřednictvím galvanického pokovení. Alternativním způsobem využitelným pro určité operace je pájení, které umožňuje nanášení tenčího povlaku obklopujícího brousící zrna, a tudíž se tímto nástrojem dá dosáhnout efektivnějšího broušení vzhledem k rozložení zrn. I přes vysokou cenu a nemožnost takto vyrobené nástroje orovnávat se galvanicky pokovené brousící nástroje úspěšně využívají při přesném vysokorychlostním broušení, s vysokými objemovými výkony a dlouhou životností kotoučů. [2] [13] [14] [15] [12] [16]



### 3.7 Termodynamické jevy při broušení

Při broušení se přibližně 98 % vynaložené práce přemění v teplo, jen 2 % celkové práce se spotřebuje na pružné deformace, deformaci mřížky a vytvoření nového povrchu. [4]

Termodynamickou soustavu při broušení tvoří obrobek, tříska, brousící kotouč a procesní kapalina. Broušení doprovází značný vývoj tepla, hlavně v místě tvoření třísky, čímž se ohřívají kontaktní vrstvy brousících zrn a pojiva. Současně dochází k ohřevu povrchové vrstvy obráběného materiálu. Nejvyšší teplota při broušení vzniká na kontaktních površích zrn odebírajících třísku. V důsledku zvýšené teploty při broušení může vzniknout hned několik forem poškození obrobku. To se může projevit růstem zrna, precipitací či změkčením, fázovou transformací vedoucí k opětovnému vytvrzení, temperováním povrchové vrstvy, tepelnou roztažností či smrštivostí, prasklinami a tahovým zbytkovým napětím a chemickými reakcemi vedoucími k viditelným opalům. [2] [1]



Obr. 3.6 Tepelný tok generovaný při broušení [19]

Rozložení teploty v povrchové vrstvě je znázorněno na Obr. 3.8, z něhož je zřejmé, že nejvyšší teploty obrobek dosahuje přímo na jeho povrchu. Po překročení teploty  $T_2$  je plasticky deformována povrchová vrstva 1. Při této plastické deformaci se ve vrstvě 1 nenachází žádná vnitřní napětí a nepůsobí tak na vrstvu 2. Teplota  $T_3$ , které je dosaženo na rozhraní vrstev 2 a 3 již nedosahuje takových hodnot, aby jí byla tato vrstva tepelně ovlivněna. [17]

Teplo vznikající při broušení je odváděno obrobkem, abrazivním zrnem, procesní kapalinou a třískou. Poměr těchto tepel je závislý zejména na obráběném materiálu, dále na typu procesní kapaliny, rychlosti posuvu, materiálu brousícího kotouče, tepelných vodivostech a dalších parametrech. Pro každý konkrétní typ broušení je tento poměr zcela individuální a nelze ho tak sumarizovat. Nutnost minimalizace tepla přecházejícího do obrobku je důležitá převážně z důvodu prevence tepelného poškození. Tepelný tok lze u broušení rozdělit do čtyř hlavních skupin, přičemž celkové teplo úzce souvisí s brousícím výkonem. Součet všech složek tepla tak lze vyjádřit jako celkové teplo [18]

$$q = q_o + q_z + q_k + q_t = \frac{P}{b_w \cdot l_k} [J] \quad (10)$$

kde:  $q$  [J] je celkové teplo vzniklé při broušení,

$q_o$  [J] je teplo odvedené obrobkem,

$q_z$  [J] je teplo odvedené abrazivním zrnem (nástrojem),

$q_k$  [J] je teplo odvedené kapalinou,

$q_t$  [J] je teplo odvedené třískou,

$P$  [W] je brousící výkon,

$b_w$  [mm] je šířka kontaktu kotouče s obrobkem.

Zásadní vliv na riziko vzniku tepelného poškození má teplo přecházející do obrobku. Předpokládá se, že tepelný tok, který vstupuje do obrobku má přibližně trojúhelníkové rozložení, protože rychlost generování energie je přibližně úměrná rychlosti odstraňování materiálu, tedy objemovému výkonu. Rychlost odstranění se v kontaktní zóně mění téměř lineárně, jak je znázorněno na Obr. 3.6 a tepelný tok je proto nejintenzivnější na přední hraně kontaktní oblasti. [19] [20]

Hlavní příčinou vývinu velkého množství tepla při procesu broušení je vysoká rezná rychlost  $v_c$  a negativní úhel čela  $\gamma_n$ . Vznikající vysoká teplota v kontaktní ploše může být příčinou velkého povrchového pnutí v materiálu v hloubce několika  $\mu\text{m}$ , což má za následek vznik trhlinek. [4]

Tepelné poškození je jedním z hlavních faktorů, které limitují brousící proces. Tepelným poškozením je ovlivněna jak kvalita výrobku, tak i velikost produkce. Broušením při nízkých teplotách vznikají tlaková zbytková napětí a zlepšuje se únavová životnost. Tento příznivý jev je způsoben mechanickou silou působící při broušení na povrch, která má podobný účinek jako jiné mechanické povrchové úpravy, například kuličkování. Na druhou stranu vysokoteplotní broušení tvrdých součástí vytváří tahová zbytková napětí, která zkracují únavovou životnost. [19]

### 3. 8 Zbytková napětí

Zbytkové napětí (ZN) je v literatuře [21] definováno jako “napětí, vznikající v důsledku nehomogenní deformace a můžeme jej obecně definovat jako víceosé napětí, působící ve výrobku po velmi dlouhou dobu přesto, že všechny jeho části mají stejnou teplotu a na výrobek již nepůsobí žádné vnější síly.“ Při pominutí účinku vnějších sil musí celková úroveň zbytkových napětí splňovat rovnovážné podmínky.

#### 3. 8. 1 Zbytková napětí dle mechanismu vzniku

Příčiny vzniku zbytkových napětí mohou mít podobu různého tepelného namáhání jednotlivých vrstev materiálu, nerovnoměrných plastických deformací při obrábění nebo strukturních změn, případně chemických procesů. Zbytková napětí mohou být ve svém důsledku příčinou deformace součástí při obrábění, zvýšené náchylnosti ke vzniku trhlin a ke snížení odolnosti vůči únavovému opotřebení. Zbytková napětí mají na materiály a jejich vlastnosti podobný účinek jako vnější namáhání. [21] [22] Příčiny vzniku zbytkových napětí se dělí na následující:

##### a) Nerovnoměrný ohřev a ochlazování materiálu

Jedním ze zdrojů zbytkových napětí je rozdílná rychlost ochlazování jednotlivých částí dílu při tepelném zpracování. Rozdíl teplot jádra a povrchu se označuje jako teplotní gradient. Při ohřevu dílu při tepelném zpracování dochází k rychlejšímu ohřevu povrchové vrstvy než ohřevu jádra. Při ochlazování se povrchová vrstva ochlazuje rychleji než jádro. V průběhu ochlazování dochází ke smršťování povrchové vrstvy, její plastické deformaci a vzniku zbytkových tahových napětí, jelikož tato tahová napětí dosahují vyšších hodnot než vnitřní tlaková napětí. Velikost tepelných zbytkových napětí v povrchové vrstvě je ovlivněna rozdílem vnitřních tahových napětí při chladnutí a vnitřních tahových napětí při ohřevu.

##### b) Nerovnoměrná plastická deformace

Velmi malé redukce v povrchové vrstvě při povrchových úpravách, jako je válečkování, kuličkování, lapování leštění aj. mohou způsobit zbytkové napětí v povrchové vrstvě, které se označuje jako zbytková komprese. Toto napětí je způsobeno větší deformací povrchu ve vztahu k jádru materiálu. [23] Když je plastická deformace omezena pouze na určitou část dílu blízkou povrchu, u kuličkování přibližně 500  $\mu\text{m}$  [24] a neproniká do hlubších vrstev, plastická expanze povrchu musí být doprovázena elastickou kompresí povrchu zároveň s elastickým rozpínáním jádra.

### c) Změny struktury

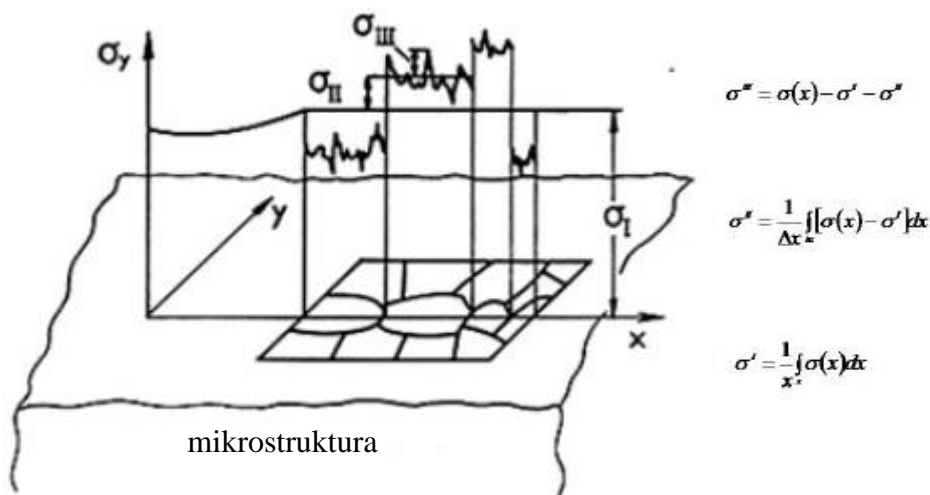
Nerovnoměrné změny struktury jsou vyvolané působením tepla a mechanickými silami, typicky při procesu řezání. Vznik strukturních napětí je způsoben fázovou transformací a vzniku nových strukturních složek. Tyto složky jsou definovány rozdílnými mechanickými a fyzikálními vlastnostmi. Dalším rozdílem mezi původními a vyloučenými strukturními složkami je jiný měrný objem, přispívající ke vzniku napětí. V tomto případě je tak důležité uvažovat vhodné podmínky řezání a rychlost změn probíhajících stavů.

### d) Chemické změny

Zbytková napětí mohou být způsobena i reakcí pevných a plynných částic pronikajících do povrchové vrstvy materiálu, především jejich absorpcí a difuzí. [25] [22] [26] [27]

## 3. 8. 2 Zbytková napětí dle velikosti rovnovážného objemu

Zbytková napětí se dělí také podle lokální prostorové změny na napětí I. druhu (makroskopická), II. druhu (mikroskopická) a III. druhu (submikroskopická) viz Obr. 3.7.



Obr. 3.7 Zbytková napětí dle rovnovážného objemu [49] [28]

$\sigma^I$  makroskopická,  $\sigma^{II}$  mikroskopická,  $\sigma^{III}$  submikroskopická

#### a) Makroskopická napětí

Někdy jsou označována také jako technologická, jelikož vznikají jako důsledek působení výrobních operací a technologických procesů při výrobě součástí. Silová a momentová rovnováha makroskopických napětí je dosažena v celém objemu výrobku a při jejím porušení dochází k deformaci tělesa. Orientace tohoto druhu napětí závisí zejména na geometrii součástí. Nevhodné tvary kalených součástí, jako ostré přechody, zápichy a hrany zvyšují vnitřní napětí I. druhu. Matematicky lze tato napětí vyjádřit jako průměr hodnot napětí v příslušné oblasti tělesa.

#### b) Mikroskopická napětí

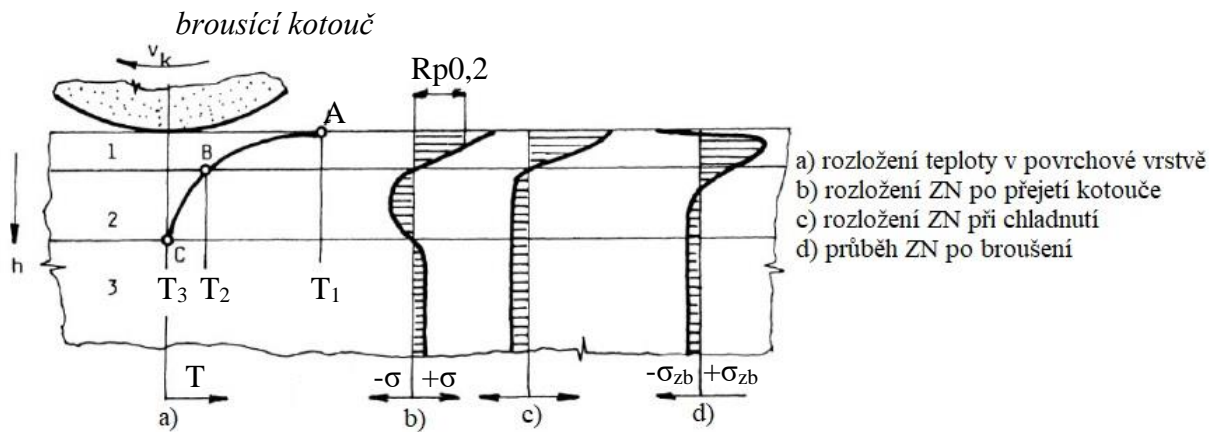
Rovnováhy dosahují v oblastech řádově srovnatelných s velikostí zrna či několika subzrn. Jejich vznik je spojován s fázovou transformací nebo deformací kovu, kdy různá zrna vykazují odlišné stavy napětí. U soustav s více fázemi mohou být jednotlivá zrna napjata opačně. Orientace napětí II. druhu není závislá na geometrii výrobku jako v případě makroskopických napětí. Jejich velikost představuje průměrnou odchylku od napětí I. druhu v daném místě. Lze se setkat i s označením homogenní mikroskopická napětí.

#### c) Submikroskopická napětí

Projevují se v nepatrných objemech velikosti řádově elementárních buněk krystalové mřížky. Jejich příčina tkví např. v krystalografických defektech a elastická distorze krystalové mřížky ve velikosti od zlomku nanometru do hodnoty mřížkového parametru. Typickým příkladem je bodová mřížková porucha. Napětí III. druhu není závislé na tvaru součástí. Matematicky lze submikroskopická napětí vyjádřit jako místní odchylku od průměrného mikroskopického napětí.

V technické praxi se u reálných výrobků se všemi druhy napětí setkáváme současně. Jednotlivá napětí spolu souvisí a navzájem se ovlivňují. Celková vnitřní napjatost je výsledkem superpozice napětí I., II. a III. druhu. [21] [28] [29] [30]

Po broušení a zchlazení broušeného materiálu se zbytková napětí v závislosti na hloubce mění což je znázorněno na Obr. 3.8. Těsně pod povrchem je superpozicí deformačních a strukturálních změn způsobeno tlakové zbytkové napětí. S narůstající hloubkou toto napětí ale poměrně rychle klesá a již v malé hloubce přechází vlivem přechodu z plastické do pružně plastické deformace a snaze se zkrátit do tahového napětí. Toto tahové napětí je nejrizikovější z hlediska integrity povrchu a vzniku mikrotrhlin, které se nacházejí těsně pod povrchem. Při vizuální kontrole tak nemusí být na pohled vidět a je nutné je detekovat některou z metod měření zbytkových napětí nebo tepelného poškození po broušení. Ve větší hloubce ve vrstvách, které již nebyly tepelně ovlivněny (vrstva 3 na Obr. 3.8) pak napětí opět přechází do záporných hodnot, kde se takové napětí označuje jako vyrovnávací tlakové napětí.

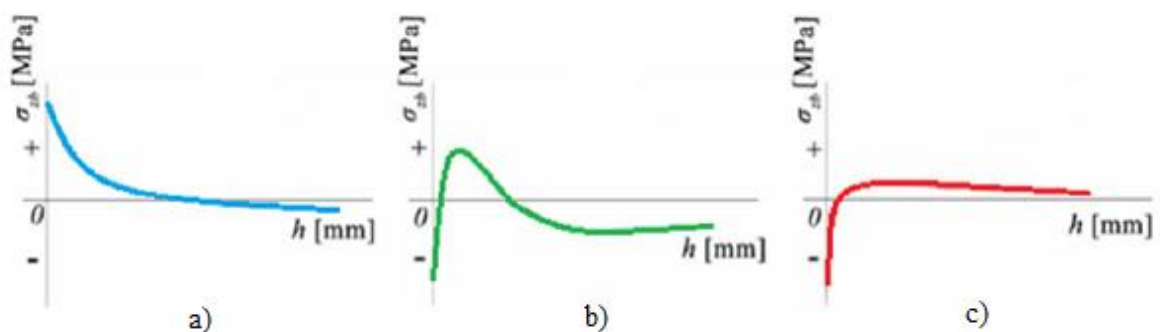


Obr. 3.8 Rozložení teplot a schema vzniku zbytkových napětí při broušení [17]

### 3.9 Hloubkové profily zbytkových napětí

Zbytková napětí lze popsat třemi základními typy hloubkových profilů. Ty jsou ovlivněny zejména kombinací mechanického a tepelného účinku při broušení. Při převládajícím vlivu tepelného účinku viz Obr. 3.6 a) dosahují zbytková napětí v povrchové a podpovrchové oblasti obrobku kladných hodnot (tahové napětí). Vlivem těchto napětí v povrchové vrstvě může dojít ke vzniku a šíření mikrotrhlin, což je způsobeno tím, že velikost tahových napětí překročí mez pevnosti materiálu. U dalšího průběhu hloubkového profilu zbytkových napětí, znázorněného na Obr. 3.6 b) docházelo při broušení ke kombinaci tepelného a mechanického účinku. Tento průběh je při broušení nejčastější. Největší zbytková napětí se nacházejí pod povrchem součásti, kde mohou nabývat jak kladných (tahových), tak záporných (tlakových) hodnot. Jejich charakter a velikost je závislý na poměru výše zmíněných účinků. Stejně jako v případě prvního průběhu hloubkových profilů i v tomto případě může při překročení meze pevnosti ke vzniku a šíření mikrotrhlin. Ve třetím případě viz Obr. 3.6 c) při broušení převládal vliv mechanického účinku. Zbytkové napětí je na povrchu součásti tlakové a s rostoucí hloubkou výrazně klesá. V podpovrchové vrstvě přechází do tahového napětí malé velikosti. [31] [26] [17]

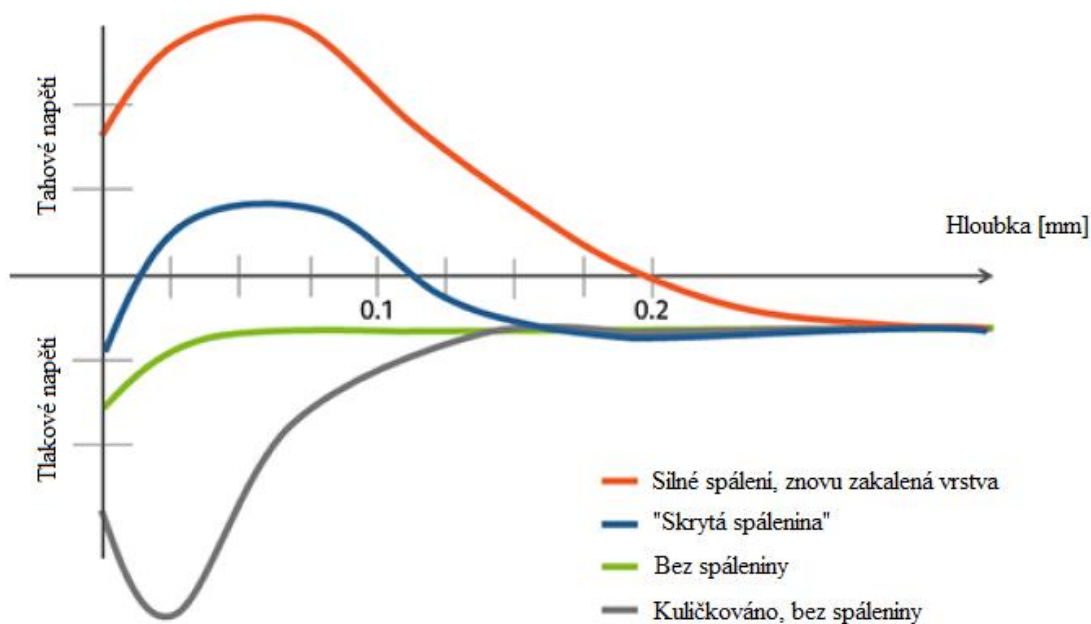
Zbytková napětí po broušení obecně v závislosti na druhu materiálu, způsobu jeho tepelného zpracování a použitých technologických podmínkách obrábění zvyšují nebo snižují pevnost, dynamickou únosnost, odolnost proti opotřebení a další parametry finálního výrobku. Při porovnání zbytkových napětí můžeme jako příznivější z hlediska ovlivnění výše uvedených vlastností označit tlaková zbytková napětí. To je také jeden z důvodů používání mechanických povrchových úprav materiálů. [32]



Obr. 3.9 Průběhy hloubkových profilů zbytkového napětí po broušení [31]

*a – převládající vliv tepelného účinku, b – kombinace tepelného a mechanického účinku, c – převládající vliv mechanického účinku*

Kombinací profilů z Obr. 3.9 získáme hloubkový profil, který je charakteristický pro reálná měření. Závislost zbytkových napětí na hloubce zobrazuje Obr. 3.11. U tepelně poškozeného povrchu, typicky po broušení, zbytková napětí zasahují řádově desítky mikrometrů pod povrch dílu. Z tohoto grafu je také patrné, jaký vliv na ZN mají některé povrchové úpravy, typicky kuličkování. U spálených povrchů souvisí velikost ZN s velikostí tepelného poškození. Nejen v případě opalu spojeného s opětovným zakalením je nejvyšší ZN těsně pod povrchem, typicky několik desítek mikrometrů. Toto napětí poté výrazně klesá a u silných spálenin přechází do záporných hodnot typicky v hloubce 200  $\mu\text{m}$ . [26]



Obr. 3.11 Typický naměřený průběh zbytkových napětí [48]



### 3. 10 Metody měření a hodnocení zbytkových napětí

Metod a způsobů zjišťování zbytkových napětí existuje mnoho. Jejich základní porovnání včetně hlavních výhod a nevýhod je znázorněno v Tab. 3.1. Metody zjišťování zbytkových napětí se primárně dělí na destruktivní, semidestruktivní a nedestruktivní. U destruktivních metod dochází porušením celistvosti součásti k uvolnění zbytkových napětí. To se projevuje deformací vzorku, která je měřena a z její velikosti lze následně vyhodnotit velikost napětí. Hlavní nevýhodou této metody je porušení součásti a nemožnost jejího použití. Semidestruktivní metody se liší pouze částečným porušením celistvosti vzorku, ve většině případů tak lze součást dále použít. Poslední kategorie nedestruktivních metod je často využívána pro svoji výhodu v podobě nepoškození měřených součástí a vzorků. Zbytková napětí jsou v tomto případě stanovena pomocí vztahů mezi fyzikálními, respektive krystalografickými vlastnostmi materiálu a zbytkovým napětím. [33] [32]

| Vlastnost                         | Barkhausenův šum | Leptání nitalem | Mikrotvrdot | RTG difrakční analýza |
|-----------------------------------|------------------|-----------------|-------------|-----------------------|
| Nedestruktivní                    | Ano              | Ne*             | Ne          | Ano (Ne**)            |
| Použití chemikálií                | Ne               | Ano             | Ne          | Ne (Ano**)            |
| Automatizované                    | Ano              | Ne              | Ne          | Ne                    |
| Spolehlivé                        | Ano              | Ne              | Ne          | Ano                   |
| Vyhodnocení různých vrstev        | Ano              | Ne              | Ne          | Ne (Ano***)           |
| Riziko vodíkového křehnutí        | Ne               | Ano             | Ne          | Ne                    |
| Ovlivněno napětí i mikrostruktura | Ano              | Ne              | Ne          | Ano                   |
| Časově náročné                    | Ne               | Ano             | Ano         | Ano                   |

\* V mnoha průmyslových odvětvích nelze díl po leptání nitalem použít

\*\* U hloubkových profilů je nutné vzorek chemicky odleptat

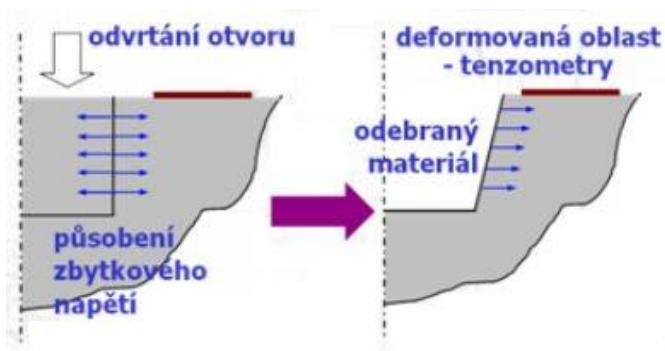
\*\*\* Závisí na tloušťce materiálu a materiálu povrchové vrstvy

Tab. 3.1 Porovnání některých detekčních metod tepelného poškození po broušení [48]

### 3. 10. 1 Odvrtávací metoda

Odvrtávací metoda, patřící do skupiny semidestruktivních technologií, je patrně nejrozšířenější technikou měření zbytkových napětí. O tom svědčí i fakt, že se jedná o jednu z mála metod, pro kterou je stanovena norma, v tomto případě se jedná o standard ASTM E837-99. Jako semidestruktivní se označuje proto, že je způsobeno pouze malé narušení celistvosti povrchu, které nemusí mít vliv na funkční využití měřené součásti. Jedná se o relativně jednoduchou, levnou, rychlou a univerzální metodu.

Princip této metody spočívá v odvrtávání malého otvoru do součásti obsahující zbytkové napětí a následného měření lokálně uvolněného povrchového napětí. Hodnota takto uvolněného napětí může být vypočtena pomocí empirických vztahů a kalkulací odvozených z experimentů a metodou konečných prvků. V praxi to znamená vyvrtání otvoru malého průměru a hloubky (obojí přibližně 1 až 4 mm) do středu tzv. tenzometrické růžice, která pomocí tenzometrů měří příslušné deformace odpovídající uvolněnému napětí, viz Obr. 3.12. Pomocí přepočtů a koeficientů je určena velikost a směr zbytkových napětí.



Obr. 3.12 Deformace otvoru po odvrtání při tahovém zbytkovém napětí v materiálu [47]

Za určitých podmínek, jako je průchozí otvor, homogenita a izotropie materiálu a elastické oblasti deformace lze vyjádřit napjatost v okolí vyvrtané díry pomocí analytických vztahů. Příslušná řešení vychází ze zjednodušení úlohy na dvojrozměrnou. Při předpokladu v dostatečně velké desky zatížené zbytkovým napětím vyvolá vyvrtaný malý otvor pouze lokální změnu napětí v těsném okolí otvoru. Výsledná změna napětí odpovídající uvolněnému napětí lze spočítat odečtením počátečního zbytkového napětí od napětí vzniklého po vyvrtání díry. Pomocí analogie Hookova zákona tak můžeme stanovit následující vztah pro radiální deformaci způsobenou uvolněným napětím

$$\varepsilon_r = (A\sigma_x + A\sigma_y) + (B\sigma_x - B\sigma_y) \cos 2\varphi \quad (11)$$

kde:  $\sigma_x$  a  $\sigma_y$  [MPa] vyjadřují hlavní napětí,

$\varphi$  [rad] je směr hlavního napětí od tenzometru 1 po směru hodin

koeficienty A, B jsou definovány jako

$$A = -\frac{1 + \mu}{2E} \frac{1}{R} \quad (12)$$

$$B = -\frac{1 + \mu}{2E} \left( \frac{4}{1 + \mu} \frac{1}{R^2} - \frac{3}{R^4} \right) \quad (13)$$

kde: E [MPa] je Youngův modul pružnosti,

$\mu$  [-] je Poissonova konstanta,

$$R = \frac{r}{r_a} \quad (14)$$

kde: r [mm] je vzdálenost tenzometru od středu otvoru

$r_a$  [mm] je poloměr vyvrtaného otvoru

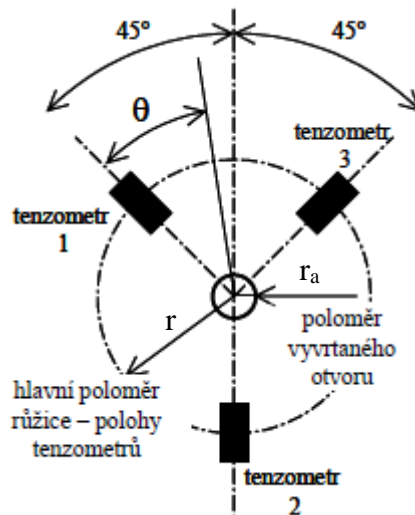
Pro typicky komerčně dostupnou a používanou tenzometrickou ruziči znázorněnou na Obr. 3.13, která je pro úhly  $\varphi = 0; 45; 90^\circ$  je řešení předchozích rovnic

$$\sigma_{x,y} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4A} \pm \frac{\sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2}}{4B} \quad (15)$$

$$\varphi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2}{\varepsilon_3 - \varepsilon_1} \right) \quad (16)$$

kde:  $\varepsilon_{1,2,3}$  jsou deformace naměřené tenzometry 1-3 dle Obr. 3.13.

Je důležité upozornit, že výše uvedené vztahy odpovídají předpokladu průchozí vyvrtané díry, homogenity a izotropnosti materiálu desky a dvojrozměrné lineárně elastické oblasti deformace. [33] [34] [28]



Obr. 3.13 Schéma tenzometrické růžice pro měření deformací od uvolněných zbytkových napětí [33]

### 3. 10. 2 Difrakční analýza

Rentgenová difrakce či rentgenová difrakční analýza je často využívaná metoda pro hodnocení integrity povrchu strojově obráběných povrchů. Jedná se o nejrozšířenější metodou strukturní analýzy povrchových vrstev. Princip této metody zužitkovává fakt, že když je v kovu napětí, ať již z důsledku působení vnější síly či zbytkové, výsledná elastická deformace způsobuje změny vzdáleností mřížkových rovin v kovové krystalové mřížce. Metodou rentgenové difrakční analýzy je možné tyto mezirovinné vzdálenosti, respektive jejich změny měřit. Z naměřených deformací lze pomocí vztahů z teorie elasticity dále stanovit výsledné napětí v materiálu.

Když je kov jako polykrystalická látka vystavena napětí, které je menší než jeho mez kluzu, je toto napětí zachyceno meziatomárními deformacemi. Hodnoty napětí se získají z těchto elastických deformací pomocí znalostí elastických konstant materiálu za předpokladů, že napětí je úměrné deformaci a že se jedná o homogenní, téměř izotropní materiály, jako je většina kovů a slitin. Měřicí přístroje pro měření rentgenového záření obsahují škálu od laboratorních difraktometrů po přenosné difraktometry až po speciální zařízení v podobě rentgenových detektorů vysoce citlivých na polohu. [35] [36] [30] [17]

### 3. 10. 3 Měření Barkhausenova šumu

V porovnání s ostatními nedestruktivními metodami hodnocení materiálů je metoda hodnocení akustických emisí v materiálech více komplexní. Metoda je založena na principu fenoménu popsánoho Heinrichem Barkhausenem v roce 1919. Ten spočívá ve vlivu zbytkových napětí, tvrdosti a podpovrchové struktury na magnetickou doménu feromagnetických materiálů. Generovaný signál při působení magnetického pole na feromagnetický materiál se nazývá Barkhausenův šum. Tento akustický signál má významnou souvislost s nespojitostmi v materiálu během jeho magnetizace. Pomocí něj je tak možné hodnotit integritu obrobeného povrchu po broušení, včetně monitorování tepelného poškození. [36] [37]

Pro měření většiny materiálů má Barkhausenův šum frekvenční spektrum, které začíná na magnetizačním kmitočtu a končí okolo 250 kHz. Šum se vlivem vířivých proudů indukovaných při šíření v materiálu tlumí. Tento útlum je exponenciálně závislý na vzdálenosti, kterou musí v materiálu urazit. Vlivem útlumu je tak omezena hloubka, ve které je ještě možné změřit amplitudu vysílaného signálu. Měřicí hloubka je tak při běžném měření omezena na 0,01 až 1,5 mm a je závislá především na frekvenčním rozsahu generovaného signálu a vodivosti a permeabilitě materiálu zkoušeného vzorku. [26]

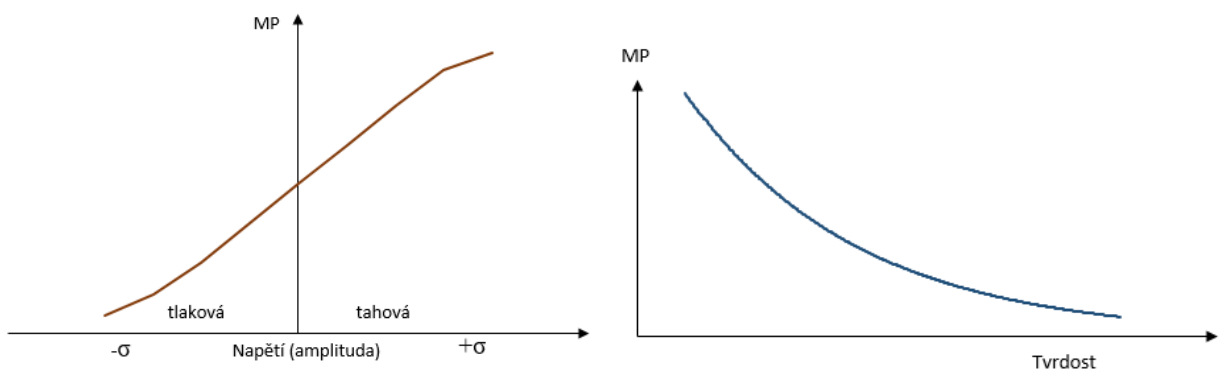
Intenzita zachyceného signálu Barkhausenova šumu je primárně ovlivněna dvěma parametry. Přítomností a rozložením elastických napětí a metalurgickou strukturou. Zbytková napětí ovlivňují orientaci jednotlivých malých magnetických oblastí v materiálu, takzvaných domén. [38]. Díky vztahu mezi orientací domén a elastických napětí v materiálu je u většiny materiálů spojeno tlakové napětí se snižováním intenzity Barkhausenova šumu. Naproti tomu tahové zbytkové napětí v materiálu intenzitu Barkhausenova šumu zvyšuje. [39] [26]

Metalurgická struktura může být pro snadnější pochopení nahrazena pojmem tvrdost, jelikož s ní přímo souvisí. [40]. S rostoucí tvrdostí intenzita Barkhausenova šumu klesá a naopak. Díky souvislosti mezi strukturou materiálu a jeho tvrdostí tak lze na základě Barkhausenova šumu popsat mikrostrukturu zkoumaného vzorku, tudíž i související parametry, které svým způsobem mikrostrukturu a zbytkové napětí ovlivňují. Mezi takové parametry patří zejména tepelně ovlivněné oblasti po broušení, oduhličené oblasti či nezakalené hrany. [26]

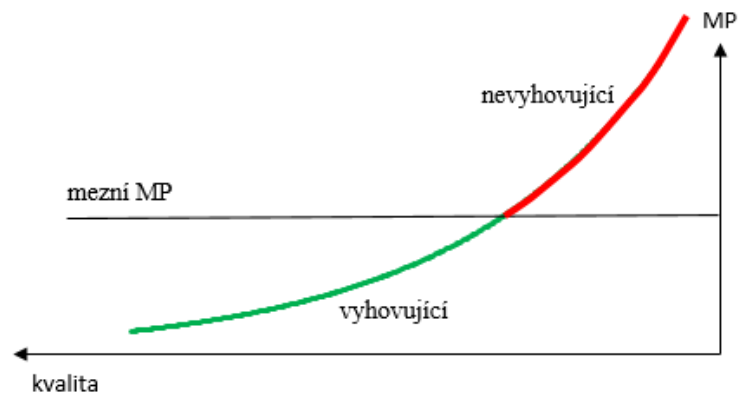
Měření Barkhausenova šumu je zejména výhodné použít při hodnocení tepelného poškození po broušení. Díky schopnosti této metody měřit zbytková napětí do hloubky několika desítek mikrometrů je možné zachytit celý tento průběh, viz Obr. 3.11.

## Amplituda a magnetoelastický parametr

Amplituda Barkhausenova šumu je odpovídající jednotce pojmenované magnetoelastický parametr (MP). Tento parametr je tak ukazatelem integrity povrchu. Dobře obrobený povrch bez podpovrchových vad s vysokou tvrdostí a převládajícím tlakovým zbytkovým napětím se tak vyznačuje nízkou hodnotou MP (Obr. 3.15), stejně jako nízkou amplitudou. Při nárůstu zbytkových napětí, především tahových, a poklesu tvrdosti, případně při výskytu podpovrchových vad, se tyto změny a defekty projeví nárůstem MP (Obr. 3.14). Zároveň je pak možné empiricky stanovit mezní hodnotu MP na takovou hodnotu, při níž je stále zachována požadovaná kvalita obráběných ploch.



Obr. 3.15 Závislost zbytkových napětí a tvrdosti na magnetoelastickém parametru [50]

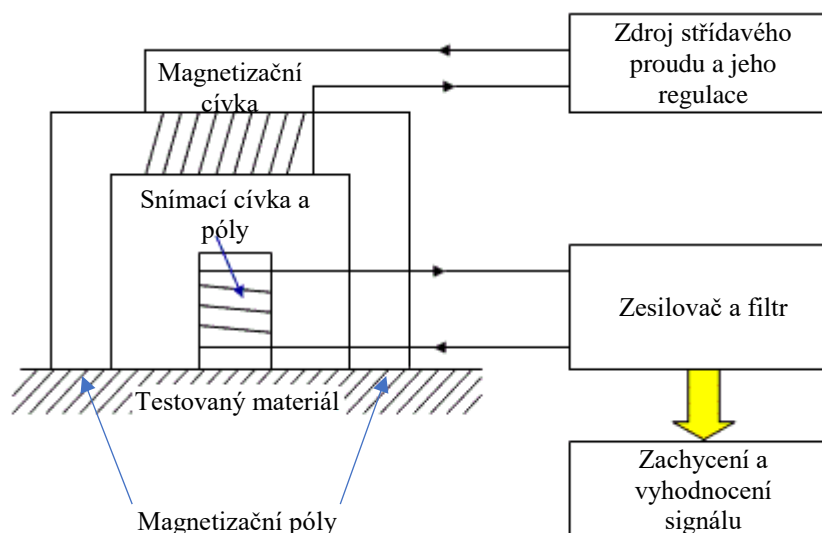


Obr. 3.14 Mezní hodnota MP pro hodnocení integrity povrchu a kvality dílů

[50]

## Snímač pro měření Barkhausenova šumu

Základní snímač se skládá z magnetizační cívky, magnetizačních pólů, snímací cívky, snímacích pólů a potřebné elektroniky. Pomocí magnetizační cívky je měřený vzorek lokálně zmagnetizován, čímž jsou indukovány periodické změny v doménách. Tyto změny magnetizace jsou pak zachyceny snímací cívkou prostřednictvím snímacích pólů. Vyhodnocovací elektronika následně zpracuje a vyhodnotí změny magnetizace. Pro měření MP Barkhausenova šumu již byla vyvinuta řada snímačů. Ty se liší pouze konstrukčním uspořádáním a tvarem uzpůsobeným konkrétnímu měření. Můžeme se tak setkat s rozličnými tvary snímačů pro měření rovinných a kulových ploch či boků zubů ozubených kol. Vyrábí se jak snímače pro ruční, tak i automatické použití. Základní uspořádání snímačů a jejich princip je stále stejný viz Obr. 3.16.



Obr. 3.16 Schématické zobrazení snímače Barkhausenova šumu [52]

### 3. 10. 4 Leptání nitalem

Odleptávání vrstev kyselinou, typicky nitalem, což je roztok ethanolu a kyseliny dusičné, je běžně používaná metoda detekce spálenin po technologické operaci broušení. Působením nitalu se naleptá povrchová vrstva vzorku, přičemž jsou odkryty mikrostrukturní variace zkoumaného materiálu. Tato metoda je standardizovaná mezinárodním standardem ISO 14104 a je široce využívaná v technické praxi. Hlavní nevýhodou této metody je práce s nebezpečnými látkami, jelikož se k odleptávání vrstev používá roztok kyseliny dusičné. Dalším omezením je v určitých případech její destruktivnost, například u klikových hřídelí.

Přehřátá část dílu po broušení nemusí jevit žádné známky viditelného tepelného poškození. Toto poškození však může být odhaleno právě po leptání nitalem. Doba samotného leptání je závislá na typu materiálu a hloubce poškození, může dosahovat hodnot od několika vteřin do minuty i více. Po odleptání určité vrstvy vzorku je odhalena jeho mikrostruktura. V případě přehřáté oblasti po broušení se po leptání poškozená oblast jeví jako tmavší oproti zbytku odleptaného pole, ve kterém k přehřátí nedošlo. [41] [42]

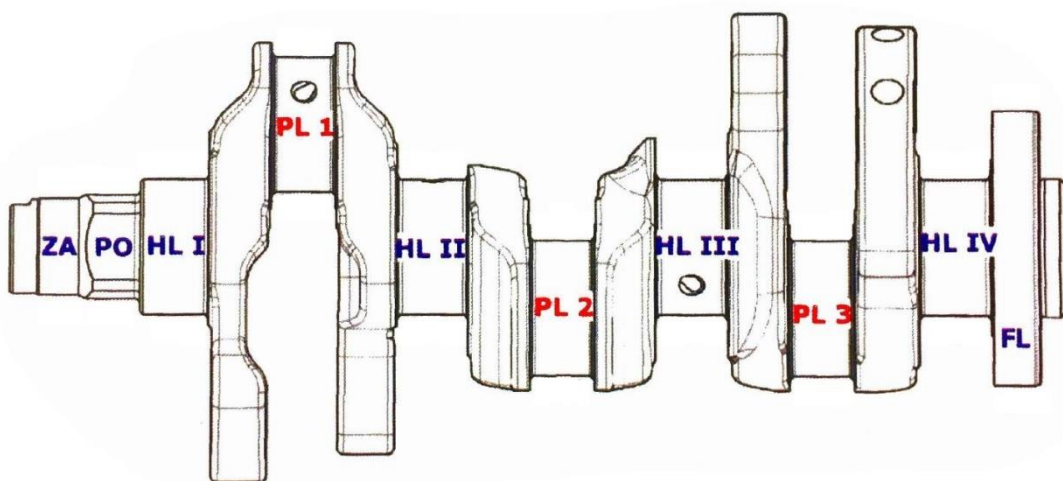


## 4 Praktická část práce

Praktická část této práce se zaměřuje na problematiku vzniku tepelného poškození při broušení axiálních ploch klikových hřídelů. Určité materiály vykazují vyšší tendenci ke vzniku tepelného poškození při broušení než jiné, a proto se první oddíl praktické části práce zaměřuje právě na vliv chemického složení výchozího materiálu na riziko vzniku tepelného poškození.

### 4.1 Kliková hřídel

Kliková hřídel je součást motoru, která slouží k přeměně translačního pohybu pístů, na které působí síla od tlaku plynů ve spalovacím prostoru, na pohyb rotační, případně naopak. Jedná se o základní a nezbytnou součást pístových spalovacích motorů. Kliková hřídel se skládá z válcových čepů, navzájem spojených rameny klikové hřídele. Tyto čepy se dělí podle jejich umístění na čepy osové (hlavní - HL I až HL IV), umístěné v ose otáčení hřídele a na čepy, které jsou vůči této ose rotace posunuté, a označují se jako čepy ojniční (PL 1 až PL 3), viz Obr. 4.1.



Obr. 4.1 Schéma klikové hřídele [51]

|    |             |
|----|-------------|
| HL | Hlavní čep  |
| PL | Ojniční čep |
| ZA | Hnací čep   |
| PO | Polygon     |
| FL | Přívuba     |

Tab. 4.1 Vysvětlivky ke schématu klikové hřídele

## 4.2 Vyhodnocování opalů

Analýza přepálení povrchu po broušení se provádí laboratorně dle ISO 14104. Kontrola se zaměřuje především na 1. a 3. ojnicí ložisko a 3. hlavní ložisko. 3. hlavní ložisko je kontrolováno z důvodu největší axiální plochy, která se při této operaci brousí. 1. a 3. ojnicí ložisko jsou každé broušeno jiným kotoučem, proto se kontrola provádí u obou z nich. Následně je vytvořena tabulka s výčtem naměřených hodnot pro jednotlivé plochy. Opaly se klasifikují do jednotlivých tříd podle stupně popálení a ovlivnění struktury materiálu. Tyto třídy jsou popsány v Tab. 4.2.

| TŘÍDA – OZNAČENÍ | POPIS             | VZHLED  |
|------------------|-------------------|---|
| Třída A          | Bez opalů         | Rovnoměrná šedá barva                           |
| Třída B          | Slabé popuštění   | Úzké světlé indikace                            |
| Třída D          | Silné popuštění   | Široké tmavé indikace                           |
| Třída E          | Opětovné zakalení | Bílá oblast ohraničená velmi tmavými indikacemi |

Tab. 4.2 Třídy tepelného poškození

## 4.3 Materiály a chemické složení

Na rozdílné typy klikových hřídelů jsou zpracovávány materiály od různých výrobců, jejichž porovnání je v příloze D. Materiál TL 1438 dle normy ČSN EN 10267, tedy feriticko – perlitická ocel vytvrditelná z teploty tváření, je k obrábění dodáván ve formě výkoveků buď přímo od dodavatelů, nebo z kovárny Škoda Auto. Tuto výchozí surovinu dodávají tři různí dodavatelé. Surovina od výrobce Riva Acciaio (ITA), kovaná ve společnosti ACSA (ITA) byla dříve dodávána se standardním obsahem titanu dle normy, tedy v rozmezí od 0,015 do 0,035 %. Toto množství titanu v materiálu se ukázalo být nevyhovující z hlediska obrábění, jelikož při broušení axiálních ploch docházelo k tepelnému poškození a vzniku opalů. Proto bylo s výrobcem dojednáno snížení obsahu titanu z původních 0,019 % na snížených 0,004 %. Dalším zpracovávaným materiálem je surovina OEMK (RU) od společnosti Metalloinvest, kovaný v kovárně Škoda Auto. Tato surovina se vyznačuje méně stabilním obsahem titanu v rozsahu od 0,017 do 0,023 %. Posledním materiálem používaným na výrobu klikových hřídelů je materiál od výrobce Sidenor Basauri (ESP), kovaný ve stejnojmenné kovárně. Obsah titanu v materiálu od společnosti Sidenor se pohybuje okolo 0,008 %, což je přibližně mezi obsahem titanu suroviny OEMK a suroviny ACSA se sníženým obsahem titanu.

Tento materiál se jeví jako nejvhodnější z hlediska obrobitelnosti. Chemické složení všech dodávaných materiálů je po přijetí od dodavatele kontrolováno v metalurgické laboratoři. Při porovnání chemického složení deklarovaného výrobcem a změřeným chemickým složením z metalurgické laboratoře lze konstatovat, že jsou tyto hodnoty téměř shodné, případně jen s malými odchylkami.

Z hlediska mechanických vlastností jednotlivých zpracovávaných materiálů vyhovují všichni dodavatelé. Hodnoty tvrdosti podle Brinella se pohybují v rozmezí od 260 do 290 HBW 5/750. Požadavky dle normy na mez pevnosti v tahu  $R_m = 800 \div 1000$  Mpa, smluvní mez kluzu  $R_{p0,2} > 520$  MPa, tažnost  $A > 12$  %.

V průběhu zpracování jednotlivých materiálů byla zjištěna zásadní závislost vlivu chemického složení na obrobitelnost, a tudíž i vznik tepelného poškození při broušení. Největší vliv byl vyhodnocen u titanu, který se využívá jako očkovací přísada pro zjemnění zrna ocelí. [29]. Na druhou stranu ale titan činí ocel houževnatější a obtížněji obrobitelnou, což má za následek vliv i na proces broušení, zejména trvanlivost nástrojů a orovňovací cyklus.

#### 4.4 Technologie broušení klikových hřídelů

Tato kapitola je věnována detailnímu popisu operace broušení. Klikové hřídele jsou broušeny metodou obvodového broušení do kulata. Tento typ broušení je popsán v kapitole 3.3.2. Broušení ojnicích a hlavních čepů klikové hřídele probíhá ve dvou krocích. V prvním kroku se čepy brousí nahrubo s úběrem materiálu přibližně 0,5 mm a na další operaci se čepy brousí načisto již s ohledem na co nejmenší drsnost povrchu. Hrubovací vysokorychlostní ( $150 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) broušení probíhá na strojích Junker Jucrank 6S 10-10, přičemž broušení nahrubo se z kapacitních důvodů uskutečňuje paralelně na dvou strojích s označením 100.1 respektive 100.2. Stroj 100.1 je vybaven brousícími kotouči z kubického nitridu boru (CBN) od společnosti Mach Rotec s označením AFM041-10 Spec 11.1c. Druhý stroj 100.2 je vybaven brousícími CBN kotouči od firmy Tesch v provedení 500 x 19,4 x 9,5 14L1 B151 C200 V574. Procesní kapalinou při broušení je aditivovaný řezný olej IsoCut. Orovnávací cykly na brousících strojích standardně nastavuje obsluha dle vizuálního posouzení obrobků. Běžně je na stroji 100.1 nastaven automatický orovnávací cyklus po 30/60 kusech (orovnání strany kotouče/orovnání obvodu kotouče). Pro stroj 100.2 jsou tyto hodnoty 50/100 kusů.

#### 4.5 Orovnávání

Nelze očekávat, že tupý a opotřebovaný brusný kotouč bude splňovat požadavky na kvalitu výroby stejně jako ostrý kotouč. Jelikož tupá brousící zrna obtížněji vnikají do materiálu, zvýší se podíl tření oproti vnikání brousících zrn do materiálu. Při opotřebení brousícího kotouče je snížena ostrost zrn a výška jejich výčnělků. Tupá zrna pak způsobují v důsledku většího tření i zvýšení brousící teploty a riziko vzniku tepelného poškození. [43] [44]

Orovnávání a jeho parametry tak hrají velice důležitou roli při snaze o co nejkvalitnější výrobky. Obzvláště nesprávné orovnávané i potažmo vyhovujícího kotouče může být zdrojem neuspokojivého stavu obrobků. Proto je potřeba nastavit orovnávací cyklus a parametry orovnávané tak, aby byla dodržena stanovená kvalita výroby a zároveň nebyly negativně ovlivněny náklady na brousící kotouče a orovnávací rolny a byla zachována i efektivita procesu. [45]

Při broušení klikových hřídelí použitých na další analýzu v rámci praktické části této práce orovnávaní probíhalo na strojích Junker Jucrank 6S 10-10 s parametry v Tab. 4.3.

|   |                         |
|---|-------------------------|
| Lineární rychlost brousícího kotouče při orovnávaní | 150 m.s <sup>-1</sup>   |
| Lineární rychlost orovnávací rolny                  | 139,5 m.s <sup>-1</sup> |
| Poměr rychlostí kotouč/rolna                        | 0,93                    |
| Úběr při orovnávaní čela kotouče                    | 0,004 mm                |
| Úběr při orovnávaní boku kotouče                    | 0,005 mm                |

Tab. 4.3 Parametry orovnávaní brousících kotoučů

Teoreticky a v ideálním případě by měla být rychlost brousícího kotouče i orovnávací rolny stejná. V praxi se však setkáváme s menší rychlostí orovnávacího nástroje vůči kotouči. Tento poměr rychlostí se pohybuje v rozmezí od 0,89 do 0,96. Bylo vysledováno, že zvýšením tohoto poměru, tedy rychlosti orovnávací rolny se zvýší výsledná drsnost broušeného povrchu. Naopak s klesajícím poměrem rychlostí drsnost klesá.

## 4.6 Hodnocení drsnosti povrchu

Při broušení klikových hřídelí, zejména největší axiální plochy u třetího hlavního ložiska, je dán požadavek na drsnost povrchu broušené plochy v rozsahu  $R_z = 0\sim 3,3$ . V praxi je ale tolerována i větší drsnost povrchu, jelikož jde pouze o hrubování a následně je konečná drsnost povrchu ještě upravena broušením na čisto a poté jsou ještě plochy na další operaci lapovány. Drsnost po hrubování by však neměla klesnout pod  $R_z = 1,5$  protože bylo empiricky stanoveno, že při dosažení této hodnoty již začíná docházet ke vzniku tepelného poškození axiálních ploch.

### 4.6.1 Princip měření drsnosti

Měření drsnosti bylo prováděno prostřednictvím měření maximální výšky profilu  $R_z$  na drsnoměru Hommel - Etamic W20, dle normy DIN EN ISO 4287 s přednastavenými programy pro měření drsnosti axiálních ploch na HL III a boků PL1 a PL3, z důvodu rozdílné velikosti měřených ploch.  $R_z$  v tomto případě vyjadřuje součet výšky nejvyššího výstupku a nejhlubší rýhy uvnitř základní délky  $l_r$ , kde  $l_n = 5 l_r$ . K měření byl použit snímač TK300. Parametry jednotlivých měřících programů pro HL III, PL 1 a PL3 jsou uvedeny v Tab. 4.4.

| Parametr                     | Značka | Název                              |                                    |
|------------------------------|--------|------------------------------------|------------------------------------|
|                              |        | Axiál HL III                       | Boky PL1, PL3                      |
| Celková délka pohybu snímače | $l_t$  | 4,8 mm                             | 1,5 mm                             |
| Měřená délka                 | $l_n$  | 4 mm                               | 1,25 mm                            |
| Měřicí rozsah                | -      | 80 $\mu\text{m}$                   | 80 $\mu\text{m}$                   |
| Rychlost pohybu snímače      | $v_t$  | 0,50 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ | 0,50 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ |
| Norma                        | -      | ISO 4287                           | ISO 4287                           |

Tab. 4.4 Parametry programů pro měření drsnosti povrchu.

### 4.6.2 Drsnost povrchu a opotřebení brousícího kotouče

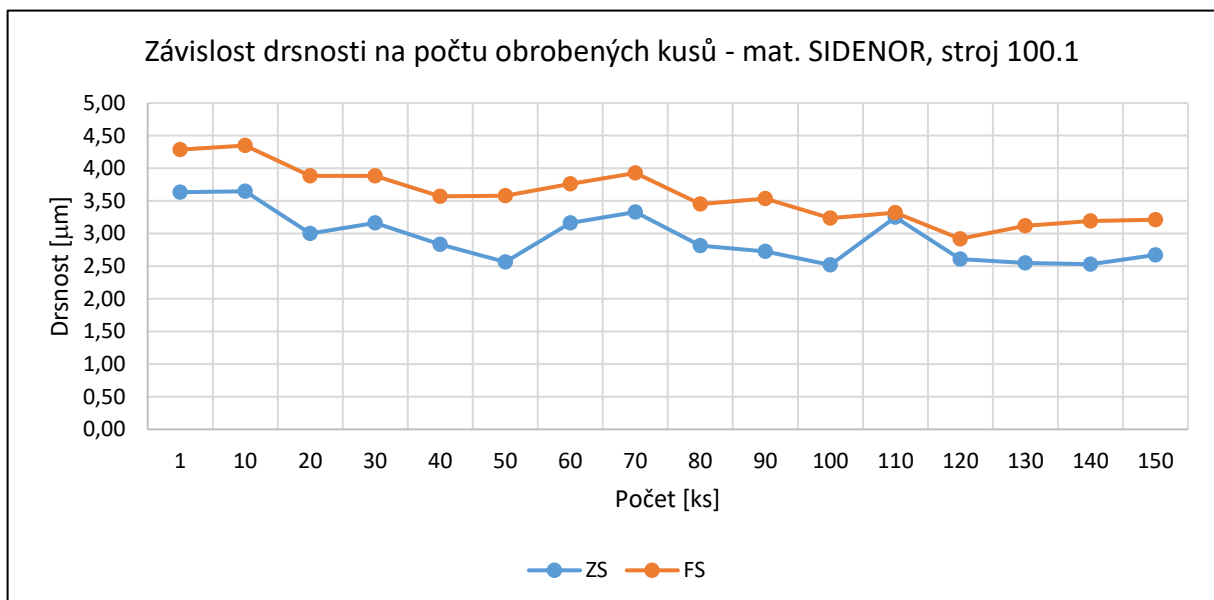
Drsnost povrchu broušené plochy přímo souvisí s opotřebením brousícího kotouče. Po orovnání broušená plocha vyžaduje větší drsnost povrchu, která se s narůstajícím opotřebením kotouče snižuje. Proto se jako jedna z možností sledování tendence ke vzniku opalů používá metoda měření drsnosti obrobeného povrchu. Z tohoto důvodu byla stanovena zkouška pro ověření obrobitelnosti materiálu firmy Sidenor s důrazem na operaci broušení na hrubo.

## 4.7 Zkouška obrobitelnosti materiálu Sidenor

V rámci ověření obrobitelnosti materiálu od nového dodavatele byla stanovena zkouška popsaná v kapitole 4.7.1. V rámci této zkoušky se hodnotila obrobitelnost cca 600 ks výkovků z materiálu firmy Sidenor.

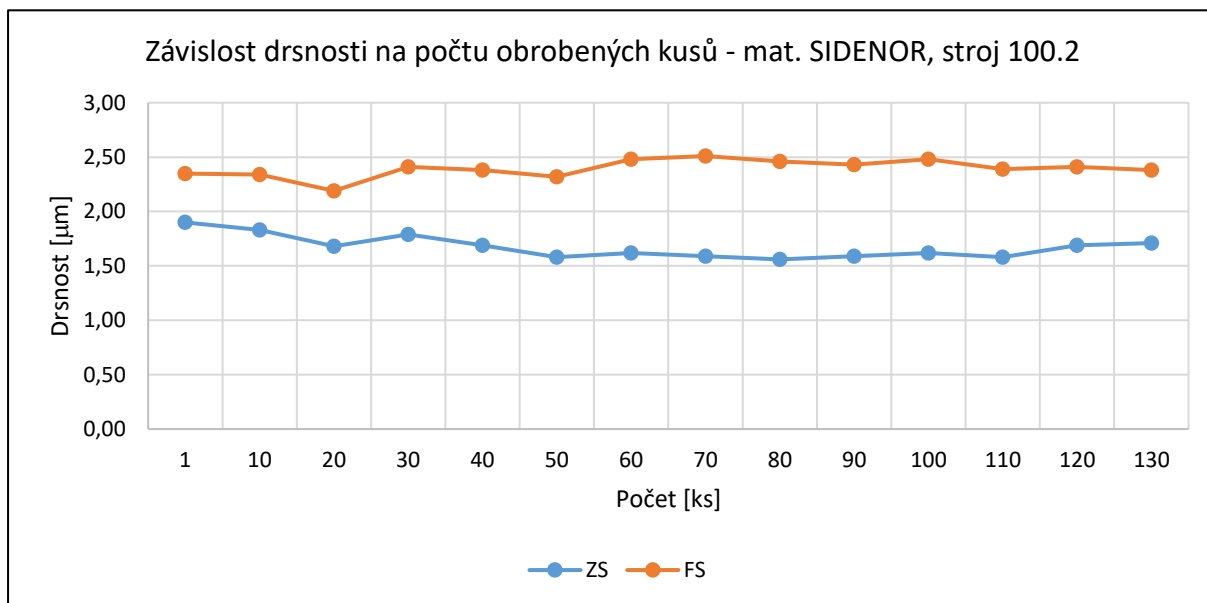
### 4.7.1 Popis zkoušky

V průběhu nasazení polotovarů na linku před první operací byly všechny kusy viditelně označeny. Všechny operace před operací broušení na hrubo byly provedeny standardně, přičemž při broušení byl používán pouze stroj 100.1 s brousícím kotoučem MachRotec 11.1. Tento kotouč byl před začátkem zkoušky orován a byl nastaven orovnávací cyklus po 300 ks. Bylo naplánováno, že po zpracování 300 dílů se orovnávací cyklus nastaví na 150 ks. Každý desátý zpracovaný kus byl separován pro vyhodnocení tepelného ovlivnění broušeného povrchu. Dále byla na každém desátém kusu změřena drsnost povrchu axiálních ploch HL III. Po zpracování 157 kusů došlo k poruše stroje, a tak byla operace přesunuta na paralelní stroj 100.2 s brousícím kotoučem Tesch Standard. Na tomto stroji bylo zpracováno dalších 130 kusů, načež došlo k zborcení radiusu a tím i k ukončení zkoušky. Přestože nedošlo k obrobení všech plánovaných 600 kusů polotovarů, zkouška byla vyhodnocena a výsledné hodnoty zpracovány na Obr. 4.2 pro stroj 100.1, respektive Obr. 4.3 pro stroj 100.2.



Obr. 4.2 Naměřené hodnoty drsnosti povrchu HL III pro materiál Sidenor, kotouč MachRotec

Z těchto hodnot a výsledných grafů lze i přes neobrobení stanoveného počtu kusů dedikovat relativně malé opotřebení brousícího kotouče, a tak udržení vysokých hodnot drsnosti povrchu. Hodnoty drsnosti povrchu totiž s počtem obrobených kusů klesají pomalu, a za celou dobu zkoušky se nedostanou pod kritickou hodnotu drsnosti  $R_z = 1,5$ .



Obr. 4.3 Naměřené hodnoty drsnosti povrchu HL III pro materiál Sidenor, kotouč Tesch Standard

Z hodnot a grafů je patrné, že i přes broušení bez orovnávaní je hodnota drsnosti povrchu stále vyhovující, zejména u kotouče Tesch Standard na operaci 100.2 je dosažená drsnost téměř konstantní, což vypovídá o malém opotřebení kotouče při broušení tohoto materiálu. U kotouče MachRotec 11.1 drsnost povrchu s počtem obrobených kusů klesá. Stále je však i po broušení 150 kusů nad kritickou hranicí  $R_z = 1,5$ , tudíž se nepředpokládalo žádné tepelné poškození obrobku. To bylo potvrzeno i laboratorními zkouškami přepálení povrchu 150. kusu po broušení v metalurgické laboratoři, s hodnotami B-D, slabé až silnější vyhřátí, což je hodnoceno jako vyhovující.



| Četnost měření:<br>každý 10. kus  | Označení dílu:<br>04C-105-101-AJ |          | Záznam o kontrole měření drsnosti - operace 100.1 |                     |  |                     |
|---|----------------------------------|----------|---|---------------------|--|---------------------|
|   |                                  |          | Drsnost čelních ploch u Ø 30 - 3.HL (ZS)          |                     | Drsnost čelních ploch u Ø 85 - 3.HL (FS) |                     |
| Rozsah drsnosti   |                                  |          | 0 < 3,3   | 0 < 1,5             | 0 < 3,3                                  | 0 < 1,5             |
| Datum   | ks. po orovnnání                 | Op. 100/ | R <sub>z</sub> [µm]                               | W <sub>t</sub> [µm] | R <sub>z</sub> [µm]                      | W <sub>t</sub> [µm] |
| 14.12.  | 1                                | 1        | 3,63  | 0,46                | 4,29                                     | 1,32                |
|   | 10                               | 1        | 3,65  | 1,02                | 4,35                                     | 1,43                |
|   | 20                               | 1        | 3,00  | 0,88                | 3,88                                     | 1,72                |
|   | 30                               | 1        | 3,16  | 0,84                | 3,88                                     | 1,49                |
|   | 40                               | 1        | 2,84  | 0,83                | 3,57                                     | 1,72                |
|   | 50                               | 1        | 2,57  | 0,99                | 3,58                                     | 1,17                |
|   | 60                               | 1        | 3,16  | 0,90                | 3,76                                     | 1,33                |
|   | 70                               | 1        | 3,33  | 1,03                | 3,93                                     | 1,39                |
|   | 80                               | 1        | 2,82  | 0,83                | 3,45                                     | 1,83                |
|   | 90                               | 1        | 2,73  | 0,95                | 3,54                                     | 1,62                |
|   | 100                              | 1        | 2,52  | 0,77                | 3,24                                     | 1,30                |
|   | 110                              | 1        | 3,25  | 1,28                | 3,32                                     | 1,43                |
|   | 120                              | 1        | 2,61  | 0,8                 | 2,92                                     | 1,02                |
|   | 130                              | 1        | 2,55  | 0,63                | 3,12                                     | 1,21                |
|   | 140                              | 1        | 2,53  | 1,24                | 3,19                                     | 1,23                |
|   | 150                              | 1        | 2,67  | 1,01                | 3,21                                     | 1,4                 |
| Operace 100.1 - kotouče MachRotec 11.1a<br>Po 157. kusu ukončení zkoušky z důvodu poruchy stroje. |                                  |          |   |                     |  |                     |

Tab. 4.6 Naměřené hodnoty drsnosti povrchu a vlnitosti.

Materiál Sidenor, kotouč MachRotec 11.1

| Četnost měření:<br>každý 10. kus  | Označení dílu:<br>04C-105-101-AJ |          | Záznam o kontrole měření drsnosti - operace 100.2 |                     |  |                     |
|---|----------------------------------|----------|---|---------------------|--|---------------------|
|   |                                  |          | Drsnost čelních ploch u Ø 30 - 3.HL (ZS)          |                     | Drsnost čelních ploch u Ø 85 - 3.HL (FS) |                     |
| Rozsah drsnosti   |                                  |          | 0 < 3,3   | 0 < 1,5             | 0 < 3,3                                  | 0 < 1,5             |
| Datum   | ks. po orovnnání                 | Op. 100/ | R <sub>z</sub> [µm]                               | W <sub>t</sub> [µm] | R <sub>z</sub> [µm]                      | W <sub>t</sub> [µm] |
| 15.12.  | 1                                | 2        | 1,90  | 0,65                | 2,35                                     | 0,55                |
|   | 10                               | 2        | 1,83  | 0,64                | 2,34                                     | 0,52                |
|   | 20                               | 2        | 1,68  | 0,59                | 2,19                                     | 0,87                |
|   | 30                               | 2        | 1,79  | 0,66                | 2,41                                     | 0,91                |
|   | 40                               | 2        | 1,69  | 0,61                | 2,38                                     | 0,96                |
|   | 50                               | 2        | 1,58  | 0,52                | 2,32                                     | 0,57                |
|   | 60                               | 2        | 1,62  | 0,50                | 2,48                                     | 0,61                |
|   | 70                               | 2        | 1,59  | 0,58                | 2,51                                     | 0,45                |
|   | 80                               | 2        | 1,56  | 0,54                | 2,46                                     | 0,51                |
|   | 90                               | 2        | 1,59  | 0,61                | 2,43                                     | 0,62                |
|   | 100                              | 2        | 1,62  | 0,58                | 2,48                                     | 0,67                |
|   | 110                              | 2        | 1,58  | 0,59                | 2,39                                     | 0,71                |
|   | 120                              | 2        | 1,69  | 0,52                | 2,41                                     | 0,61                |
|   | 130                              | 2        | 1,71  | 0,49                | 2,38                                     | 0,52                |
| Operace 100.2 - kotouče Tesch Standard<br>Po 130. kusu ukončení zkoušky z důvodu zborcení radiusu |                                  |          |   |                     |  |                     |

Tab. 4.5 Naměřené hodnoty drsnosti povrchu a vlnitosti.

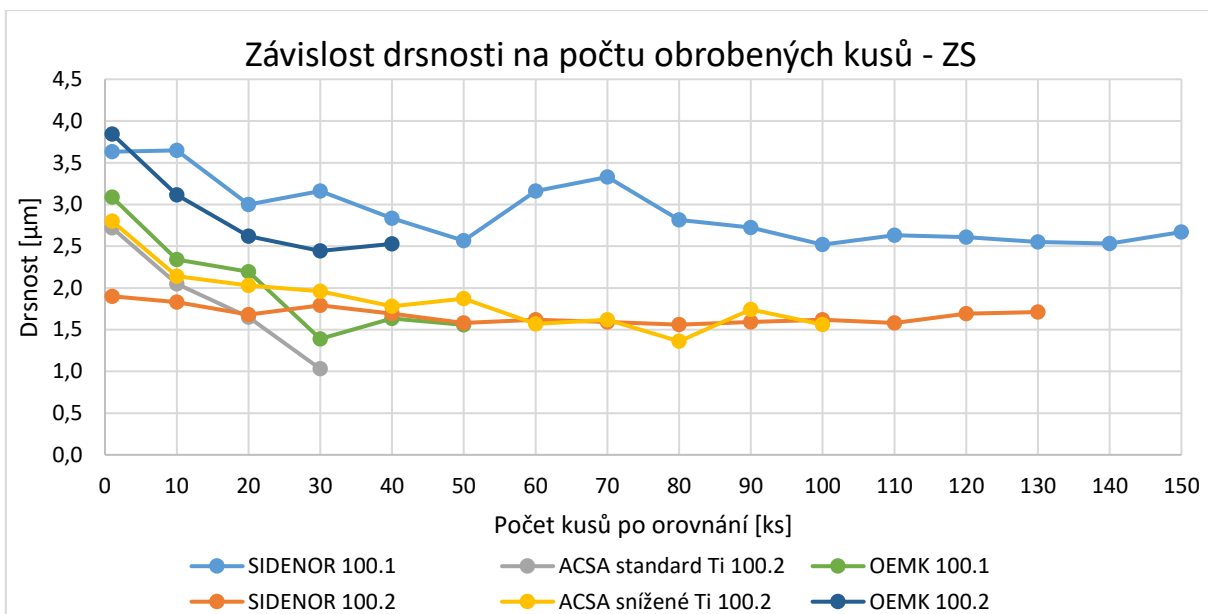
Materiál Sidenor, kotouč Tesch Standard

#### 4.8 Porovnání obrobitelnosti různých dodavatelů suroviny

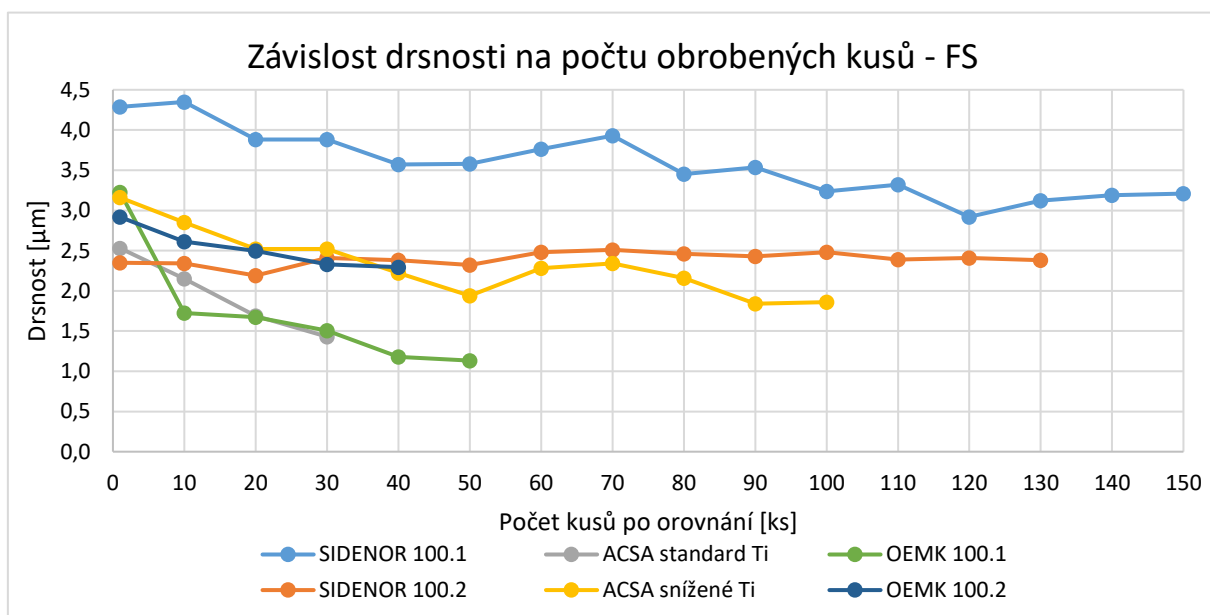
Následně bylo vytvořeno porovnání drsností při broušení jednotlivých materiálů – Sidenor, ACSA, OEMK, a to jak kotoučem Tesch Standard, tak kotoučem MachRotec spec 11.1. Z těchto hodnot v Tab. 4.8 pro ZS – strana ke konečku a v Tab. 4.7 pro FS – strana k přírubě a dále ze zpracovaných grafů na Obr. 4.4 a Obr. 4.5 lze určit, že se jako nejvhodnější materiál jeví surovina SIDENOR, jelikož při broušení vykazuje nejstabilnější hodnoty drsnosti povrchu bez orovnávacího cyklu, jen s mírnou klesající tendencí. Orovňovací cyklus tak lze nastavit až na 150 kusů.

Největší rozdíly vykazuje materiál ACSA, hlavně rozdílné tavby s různým obsahem titanu (původní obsah do 0,02 %, snížený na max. 0,01 %). Původní materiál zcela nevyhovoval při broušení, hodnoty drsnosti povrchu rapidně klesaly, pod hranici drsnosti  $R_z = 1,5$  se tato surovina dostala už po obrobení řádově dvou desítek kusů, což je z hlediska produktivity a nastavení orovňovacího cyklu zcela nevyhovující. Po avizovaném snížení obsahu titanu pod 0,01 % došlo ke zdatnému zlepšení průběhu drsnosti. Po změně materiálového složení bylo dosaženo možnosti zvýšení orovňovacího cyklu z 30 na 100 kusů, to znamená nárůst o více než 330 %. Navíc je při delším orovňovacím cyklu kratší celkový takt operace, jelikož orovňávání neprobíhá tak často.

Materiál OEMK je z hlediska závislosti drsnosti povrchu na počtu obrobených kusů méně stabilní než Sidenor. Na kotouči MachRotec dokonce parametr drsnosti povrchu na straně k přírubě od 40. kusu klesl pod hranici  $R_z = 1,5$ . To není z hlediska rizika vzniku tepelného poškození přípustné. Zásadní rozdíl mezi jednotlivými kotouči MachRotec a Tesch v závislosti na orovňovacím cyklu nebyl zjištěn. V případě materiálu Sidenor je však patrné, že kotouč Tesch brousí s menší drsností povrchu než kotouč MachRotec Spec 11.1. Při porovnání nákladů na jeden kus mezi oběma kotouči navíc není téměř žádný rozdíl.



Obr. 4.4 Graf závislosti drsnosti povrchu na počtu obrobených kusů po orovnění na straně ke konečku



Obr. 4.5 Graf závislosti drsnosti povrchu na počtu obrobených kusů po orovnění na straně k přírubě

| Četnost měření:<br>každý 10. kus | Označení dílu:<br>04C-105-101-AJ,<br>04C-105-101-AT,<br>04C-105-101-C |      | Záznam o kontrole měření drsnosti, drsnost čelních ploch 3. HL - FS<br>Rz [ $\mu\text{m}$ ] |                    |                     |                     |                     |
|----------------------------------|---|------|---|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                                  | Materiál  |      | SIDENOR<br>(MachRotec)  | SIDENOR<br>(Tesch) | ACSA<br>Ti < 0,02 % | ACSA<br>Ti < 0,01 % | OEMK<br>(MachRotec) |
| ks. po orovnění                  | Op. 100/  |      |   |                    |                     |                     |                     |
| 1                                | 1,2   | 4,29 | 2,35  | 2,53               | 3,16                | 3,23                | 2,92                |
| 10                               | 1,2   | 4,35 | 2,34  | 2,15               | 2,85                | 1,73                | 2,61                |
| 20                               | 1,2   | 3,88 | 2,19  | 1,69               | 2,52                | 1,67                | 2,50                |
| 30                               | 1,2   | 3,88 | 2,41  | 1,43               | 2,52                | 1,51                | 2,33                |
| 40                               | 1,2   | 3,57 | 2,38  |                    | 2,22                | 1,18                | 2,30                |
| 50                               | 1,2   | 3,58 | 2,32  |                    | 1,94                | 1,13                |                     |
| 60                               | 1,2   | 3,76 | 2,48  |                    | 2,28                |                     |                     |
| 70                               | 1,2   | 3,93 | 2,51  |                    | 2,34                |                     |                     |
| 80                               | 1,2   | 3,45 | 2,46  |                    | 2,16                |                     |                     |
| 90                               | 1,2   | 3,54 | 2,43  |                    | 1,84                |                     |                     |
| 100                              | 1,2   | 3,24 | 2,48  |                    | 1,86                |                     |                     |
| 110                              | 1,2   | 3,32 | 2,39  |                    |                     |                     |                     |
| 120                              | 1,2   | 2,92 | 2,41  |                    |                     |                     |                     |
| 130                              | 1,2   | 3,12 | 2,38  |                    |                     |                     |                     |
| 140                              | 1,2   | 3,19 |   |                    |                     |                     |                     |
| 150                              | 1,2   | 3,21 |   |                    |                     |                     |                     |

Tab. 4.7 Naměřené hodnoty drsnosti povrchu pro různé suroviny, strana k přírubě

| Četnost měření:<br>každý 10. kus | Označení dílu:<br>04C-105-101-AJ,<br>04C-105-101-AT,<br>04C-105-101-C |      | Záznam o kontrole měření drsnosti, drsnost čelních ploch 3. HL - ZS<br>Rz [ $\mu\text{m}$ ] |                    |                     |                     |                     |
|----------------------------------|---|------|---|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                                  | Materiál  |      | SIDENOR<br>(MachRotec)  | SIDENOR<br>(Tesch) | ACSA<br>Ti < 0,02 % | ACSA<br>Ti < 0,01 % | OEMK<br>(MachRotec) |
| ks. po orovnění                  | Op. 100/  |      |   |                    |                     |                     |                     |
| 1                                | 1,2   | 3,63 | 1,90  | 2,72               | 2,80                | 3,09                | 3,85                |
| 10                               | 1,2   | 3,65 | 1,83  | 2,05               | 2,14                | 2,34                | 3,12                |
| 20                               | 1,2   | 3,00 | 1,68  | 1,65               | 2,03                | 2,20                | 2,62                |
| 30                               | 1,2   | 3,16 | 1,79  | 1,03               | 1,96                | 1,39                | 2,44                |
| 40                               | 1,2   | 2,84 | 1,69  |                    | 1,78                | 1,63                | 2,53                |
| 50                               | 1,2   | 2,57 | 1,58  |                    | 1,87                | 1,56                |                     |
| 60                               | 1,2   | 3,16 | 1,62  |                    | 1,57                |                     |                     |
| 70                               | 1,2   | 3,33 | 1,59  |                    | 1,62                |                     |                     |
| 80                               | 1,2   | 2,82 | 1,56  |                    | 1,36                |                     |                     |
| 90                               | 1,2   | 2,73 | 1,59  |                    | 1,74                |                     |                     |
| 100                              | 1,2   | 2,52 | 1,62  |                    | 1,56                |                     |                     |
| 110                              | 1,2   | 2,63 | 1,58  |                    |                     |                     |                     |
| 120                              | 1,2   | 2,61 | 1,69  |                    |                     |                     |                     |
| 130                              | 1,2   | 2,55 | 1,71  |                    |                     |                     |                     |
| 140                              | 1,2   | 2,53 |   |                    |                     |                     |                     |
| 150                              | 1,2   | 2,67 |   |                    |                     |                     |                     |

Tab. 4.8 Naměřené hodnoty drsnosti povrchu pro různé suroviny, strana ke konečku

## 4.9 Analýza Barkhausenova šumu

Z hlediska poškození povrchu po broušení mohou dle literatury [46] nastat tři stavy:

- a) Povrch je vyhovující a není vizuálně poškozený
- b) Povrch není vyhovující a je vizuálně poškozený
- c) Povrch není vyhovující a není vizuálně poškozený

Zejména u třetího stavu, kdy není možné tepelné poškození odhalit vizuálně, je nutné použít některou z metod detekce tepelného poškození. V případě této práce byla zvolena metoda analýzy Barkhausenova šumu.

Pro hodnocení integrity povrchu pomocí Barkhausenova šumu bylo použito měřící zařízení MicroScan 600-1, které se skládá z jednotky Rollscan 300, programů Viewscan a Microscan. Princip metody měření je popsán v kapitole 3. 10. 3.

Nejprve bylo nutné zjistit a nastavit optimální hodnoty magnetizačního napětí a magnetizační frekvence pro měřený materiál a správné nastavení parametrů při měření. Optimální hodnoty byly zjištěny hodnocením přeběhů magnetizačního napětí, respektive frekvence za pomoci programu Viewscan. Z naměřených přeběhů byla stanovena optimální hodnota magnetizačního napětí 2 V, a hodnota magnetizační frekvence 75 Hz.



Obr. 4.6 Měřící přístroj Rollscan 300 při měření klikové hřídele

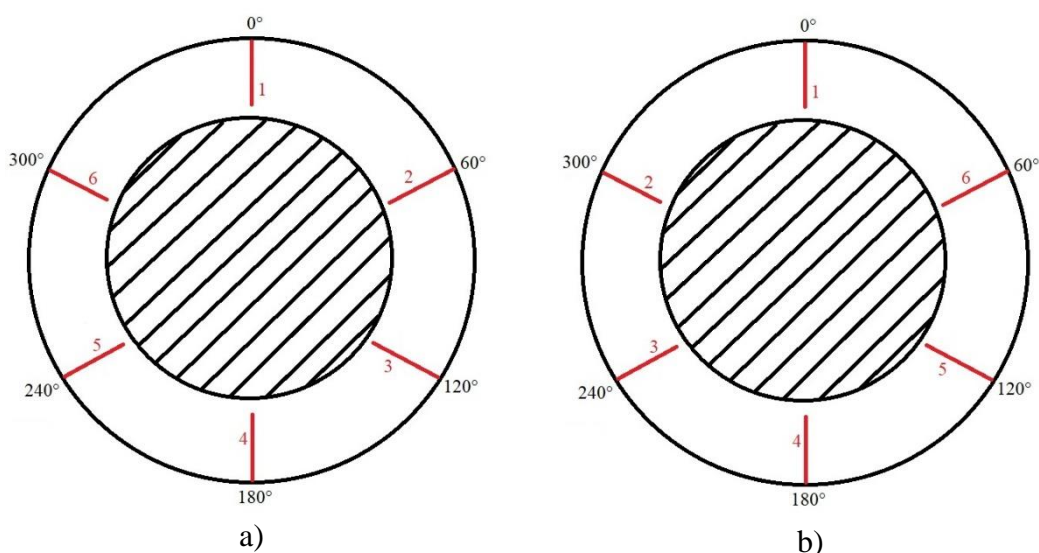
Vzhledem k zachování nedestruktivního charakteru zkoušky a tvarové složitosti měřených ploch bylo nutné vhodně zvolit snímač Barkhausenova šumu. Univerzální ani vačkový snímač nebylo možné vzhledem k omezenému prostoru okolo axiálních ploch použít, proto byl zvolen senzor na ozubená kola č. 5912, typ S1-164-16-11 (Obr. 4.7), jelikož jeho šípovitý tvar a možnost měřit bokem tohoto snímače přesně vyhovoval tvaru měřené plochy. Na druhou stranu bylo možné měřit pouze axiální plochy HL III, jelikož axiální plochy ojnicích čepů jsou natolik úzké, že by pro jejich měření bylo nutné zkonstruovat speciální snímač. K plnohodnotnému relevantnímu měření je navíc potřebná plocha alespoň 1 cm<sup>2</sup> a vzhledem k šířce axiální plochy ojnicích čepů pouhých 5,5 mm a šířce snímače je tato plocha nedostatečná.



Obr. 4.7 Snímač pro měření boků ozubených kol č. 5912 ve styku s měřenou plochou

Z důvodu velké citlivosti a možného ovlivnění přístroje, respektive jeho snímače, bylo nutné před samotným měřením odstranit z jejich blízkosti veškerá elektronická zařízení jako mobilní telefony či hodinky.

Axiální plochy HL III byly měřeny jak na straně ke konečku (ZS), tak na straně k přírubě (FS), přičemž na každé ploše bylo vybráno šest bodů po 60 ° (Obr. 4.8). Pro každý z těchto měřených bodů bylo zaznamenáno minimálně 5 hodnot pro řádné statistické vyhodnocení. Celkem tedy bylo naměřeno přes 1000 hodnot MP.



Obr. 4.8 Vybrané měřené body na axiální ploše HL III, a) strana FS, b) strana ZS

Celkem byly metodou analýzy Barkhausenova šumu měřeny materiály od dvou různých dodavatelů výchozí suroviny, přičemž jeden z těchto materiálů byl navíc broušen dvěma různými kotouči. Všechny naměřené hodnoty magnetoelastického parametru byly zpracovány do přehledných grafů a porovnány s hodnotami drsnosti povrchu, která byla naměřena na totožných místech. Výsledné hodnoty drsnosti povrchu a magnetoelastického parametru jsou numericky uvedeny v příloze A, respektive příloze B a graficky znázorněny na grafech v příloze C.

Z analýzy výsledků měření Barkhausenova šumu nelze prokázat závislost mezi drsností povrchu po broušení a změřeným magnetoelastickým parametrem, a tak i integritou povrchu. To však neznamená, že metoda měření Barkhausenova šumu není vhodná pro kontrolu výrobního procesu klikových hřídelí. Naopak poukazuje na to, že současný stav v podobě kontroly dílů v určitém časovém intervalu pomocí drsnosti povrchu nemá výraznou vypovídací schopnost o tepelném poškození. Sledování drsnosti povrchu však stále může spolehlivě sloužit jako kontrola správného nastavení dalších parametrů.

Při porovnání naměřených hodnot v příloze A lze konstatovat, že u materiálu SIDENOR byly naměřeny vyšší hodnoty MP (průměrná hodnota 304,3) než u materiálu ACSA (průměrná hodnota 272,9). Vyšší hodnoty MP u materiálu SIDENOR však nutně nemusí znamenat horší kvalitu výrobků z této suroviny. Naopak při hodnocení drsnosti povrchu a obrobitelnosti se tato

surovina jeví lépe než materiál ACSA. Hodnoty MP jsou u SIDENORU ustálené bez velkého rozptylu. Naopak materiál ACSA vykazuje velké rozdíly jednak mezi jednotlivými naměřenými díly, a také mezi jednotlivými měřeními body. Navíc nelze nalézt tendenci, kterou by MP s počtem broušených kusů po orovnění rostl či klesal.



## 5 Závěr

Nebyla zjištěna výrazná závislost mezi drsností povrchu a velikostí naměřeného magnetoelastického parametru. Z hlediska stability výroby a naměřených parametrů se jako nejvhodnější surovina jeví materiál SIDENOR. Ta vykazuje stabilní hodnoty drsnosti povrchu i po velkém počtu obrobených kusů bez orovnění, na rozdíl od materiálu ACSA a OEMK, u kterých drsnost rapidně klesá, a je nutné je tak obrábět s výrazně kratším orovnávacím cyklem.

Z hlediska rizika vzniku tepelného poškození by bylo vhodné změnit nastavení obráběcích operací, které předcházejí broušení tak, aby bylo dosaženo menšího úběru materiálu při hrubování. V současné době je přídavek na broušení na axiálních plochách klikové hřídele 0,5 mm. Klikový hřídel by mohl být osoustružen tak, aby se při broušení ubíralo pouze 0,2 mm. Snížil by se tak objemový výkon, který ve své podstatě přímo souvisí s velikostí tepla vznikajícího při broušení. Zmenšil by se tak i tepelný tok přestupující do obrobku a v konečném důsledku by bylo sníženo i riziko tepelného poškození dílu. Tato změna není navíc nijak finančně ani technologicky a časově náročná, proto se jeví jako nejjednodušší způsob snížení rizika vzniku poškození klikové hřídele při broušení.

Vzhledem k mobilitě, rychlé odezvě a vysoké citlivosti by bylo možné integrovat systém měření Barkhausenova šumu do výrobního procesu. Touto metodou je možné měřit velký objem výroby, navíc bez omezení jejího toku, jelikož je měření a vyhodnocení rychlé. K tomu je možné celý systém automatizovat a zakomponovat ho do výrobní linky tak, aby nevyžadoval žádné nároky na personál, potažmo jen sledování toho, zda daný parametr nepřesahuje vyznačené meze. Nevýhody metody měření Barkhausenova šumu by v tomto případě byly eliminovány, jelikož se jedná o feromagnetický materiál se stále stejnou geometrií. Nejspíše by ale bylo nutné vyrobit speciální senzor, který by svým tvarem a rozměry vyhovoval rozměrům a tvaru měřených ploch.

Při integraci měřícího zařízení Barkhausenova šumu do výrobního procesu za technologickou operaci broušení a stanovení intervalu měření poškození broušených ploch by bylo dosaženo přesnějšího hodnocení obrobků než při nynějším stavu hodnocení tepelného poškození pohledem. Tím by mohlo být dosaženo prodloužení orovnávacího cyklu, snížení prostojů brousícího stroje při orovnávání a prodloužení životnosti brousících kotoučů. V této souvislosti by mohly být vzhledem k vysoké ceně kotoučů sníženy i náklady na nářadí.

V rámci dalšího výzkumu i průmyslové praxe by bylo vhodné pomocí některé z dalších metod (rentgenová difrakční metoda, odvrtávací metoda) změřit reálné hodnoty zbytkových napětí. Tyto hodnoty by byly porovnány s naměřenými hodnotami magnetoelastického parametru Barkhausenova šumu. Tím by byla stanovena tzv. mezní hodnota MP, která by sloužila jako

ukazatel jakosti výrobků a mohl by se podle této hodnoty řídit výrobní proces, především nastavovat orovnávací cyklus. Znalost konkrétních hodnot výsledného napětí v materiálu by znamenala hlubší porozumění procesů probíhajících při broušení a mohla by vysvětlit rozdílné chování stejného materiálu od různých dodavatelů.

Vzhledem k rozdílnému chování stejné suroviny od různých dodavatelů, co se týče drsnosti povrchu, životnosti nářadí a odolnosti proti tepelnému poškození po broušení by bylo vhodné zaměřit pozornost na výrobní operace, které předcházejí obrábění klikových hřídelí. Doporučením je orientace na proces výroby samotné suroviny, jejího kování, a především řízeného chladnutí po kování. Vzhledem k tomu, že se jedná o surovinu dle stejné normy se stejným chemickým složením a mechanickými vlastnostmi vykazující velice odlišné vlastnosti při obrábění, je nutné hledat rozdíl právě v její výrobě. Mechanické vlastnosti, které by mohly souviset s rozdílnou obrobiteľností, velmi závisí na řízeném procesu chladnutí po kování. Tuhnutí feritu v důsledku precipitačního vytvrzování jak volného feritu, tak i feritu obsaženého v perlitu, má za následek zvýšení meze kluzu.

## 6 Seznam použité literatury

- [1] VASILKO, Karol a BOKUČAVA, Givi. *Brúsenie kovových materiálov*. Bratislava : Alfa, 1988.
- [2] ROWE, W. Brian. *Principles of Modern Grinding Technology*. Oxford : Elsevier, 2014. ISBN: 978-0-12-32324271-4.
- [3] HOLEŠOVSKÝ, František. *Abrazivní metody dokončování povrchů*. Praha : Centrum pro studium vysokého školství, v.v.i., 2015. 978-80-86302-68-3.
- [4] KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [5] DEVRIES, Warren R. *Analysis of Material Removal Processes*. New York : Springer-Verlag, 1992. ISBN 0-287-97728-7.
- [6] GRIGORIEV, Sergey, a další. *Creep-Feed Grinding: An Overview of Kinematics, Parameters and Effects on Process Efficiency*. místo neznámé : Strojníški vestnik - Journal of Mechanical Engineering, [S.l.], v. 60, n.4, p. 213-220, June 2018. , 2014. ISSN 0039-2480.
- [7] HUMÁR, Antonín. Vysoké učení technické v Brně. [Online] 2005. [Citace: 25. Listopad 2018.] [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci\\_a\\_nekonvencni\\_metody\\_obrabeni/TI\\_TO-3.cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf).
- [8] SANDEEP, Kumar a DHANABALAN, S. A Review of Cylindrical Grinding Process parameters by using various Optimization techniques and their effects on the surface Integrity, Wear Rate and MRR. *International Journal of Advance Engineering and Research Development*. Volume 5, 2018, Sv. Issue 01, ISSN 2348-6406.
- [9] BYRNE, Patrick. *Turning, milling and grinding processes*. London : Gray Publishing, 1996. ISBN 0 340 62503 1.
- [10] ČSN 22 4010. *Brusivo. Brousící materiály a pojiva. Klasifikace*. Praha : ÚNMZ, 10/1984.
- [11] TELLE, Rainer. Properties of Ceramics. [autor knihy] Hans K. Tonshoff, Ichiro Inasaki Ioan D. Marinescu. *Handbook of Ceramic Grinding & Polishing*. Norwich : William Andrew Publishing, 2000, stránky 1-64.
- [12] MARINESCU, I.D., et al. *Handbook of machining with grinding wheels*. Portland : CRC Press, 2007. ISBN: 9781574446715.

- [13] HLUCHÝ, Miroslav. Strojírenská technologie: učebnice pro 1. ročník SPŠ strojnických, studijní obor: strojírenská technologie. Praha : SNTL, 1986.
- [14] ŘASA, Jaroslav, GABRIEL, Vladimír. Strojírenská technologie 3, metody, stroje a nástroje pro obrábění 1. díl. Praha : Scientia, 2005. ISBN 80-7183-337-1.
- [15] DOI, Toshiro, MARINESCU, Ioan D., UHLMANN, Eckart. *Handbook of Ceramics Grinding and Polishing, 2nd Edition*. Beaverton : Elsevier, 2015. ISBN: 9781455778584.
- [16] WEBSTER, J., TRICARD, M. Innovations in Abrasive Products for Precision Grinding. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2004. Sv. 53, no. 2, s. 597-617. ISSN 0007-8506.
- [17] NECKÁŘ, F., KVASNIČKA, I. Vybrané statě z úběru materiálu. Praha : Vydavatelství ČVUT, 1991. ISBN 80-01-00696-4.
- [18] WERNER, P.G., YOUNIS, M.A., SCHLINGENSIEPEN, R. Creep-feed - an effective method to reduce workpiece surface temperatures in high efficiency grinding process. *Proceedings of the 8th North American Metalworking Research Conference*,. Rolla : Soc. of Manuf. Engineers;, 1980. s. 312-319.
- [19] ROWE, W. Brian. Thermal analysis of high efficiency deep grinding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2001. Sv. 41, no. 1, s. 1-19. ISSN 0890-6955.
- [20] MALKIN, S., C. GUO. Thermal analysis of grinding. *CIRP Annals - Manufacturing technology*. 2007. Sv. 56, no. 2, s. 760-782. ISSN 0007-8506.
- [21] CHOTĚBORSKÝ, R. Nauka o materiálu. Praha : Česká zemědělská univerzita, 2011. ISBN 978-80-213-2236-3.
- [22] HOSFORD, William F. Residual stresses. *In: Mechanical behavior of materials. Second edition*. Cambridge : Cambridge Univ. Press, 2010. s. 302-318. ISBN 978-0-511-65836-5.
- [23] BAKALOVA, T. Vliv materiálových a technologických parametrů obrábění v povrchové vrstvě a vlastnosti dynamicky namáhaných strojních součástí. *Disertační práce*. Liberec : Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2010.
- [24] KRAUS, I., GANEV, N. Difrakční analýza zbytkových napětí. Praha : Vydavatelství ČVUT, 1995. ISBN 80-01-01366-9.
- [25] DING, Wenfeng et. al. Review on grinding-induced residual stresses in metallic materials. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. vol. 88, no. 9, s. 2939-2968. ISSN 0268-3768.

- [26] SCHMIDOVÁ, Lucie. Hodnocení parametrů integrity povrchu a využití poznatků pro zefektivnění obrábění ozubených kol. *Disertační práce*. Liberec : Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2014.
- [27] BUMBÁLEK, B. Integrita povrchu a její význam pro posouzení vhodnosti dané plochy pro její funkci. [Online] [Citace: 4. Únor 2019.] [http://gps.fme.vutbr.cz/STAH\\_INFO/2512\\_Bumbalek.pdf](http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2512_Bumbalek.pdf).
- [28] Západočeská univerzita v Plzni. Odvrtávací metoda (metoda otvoru). [Online] [Citace: 6. Únor 2019.] <https://tp.zcu.cz/cz/laboratore/zbytkova-napeti/detaily-metody>.
- [29] PTÁČEK, L. *Nauka o materiálu. 2. opr a rozš. vyd.* Brno : CERM, 2002. 392 s. ISBN 80-7204-248-32.
- [30] KRAUS, I., GANEV, N. *Technické aplikace difrakční analýzy*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-07-03099-7.
- [31] DÖMÉNY, T. Analýza vlivu parametrů procesu broušení na integritu obrobené plochy se zaměřením na zbytková napětí. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 65 s, příloh. 2. Vedoucí diplomové práce: Ing. Ildikó Putzová, Ph.D..
- [32] ZEMČÍK, Oskar. Změna vlastností oběžných drah valivých ložisek po aplikaci válečkování. *Disertační práce*. Brno : Vysoké učení technické, 2002. ISBN 80-214-2131-2.
- [33] HONNER, Milan. Měření ve fyzikálních technologiích. *texty k laboratorním cvičením*. Plzeň : Západočeská univerzita, 2003. ISBN 80-7082-971-0.
- [34] KANDIL, FA, a další. A review of residual stress measurement methods - A guide to technique selection. Teddington : NPL Report MATC, 2001. ISSN 1473-2734.
- [35] RUUD, C.O. A Review of Selected Non-destructive Methods for Residual Stress Measurement. *NDT International*. 1982. vol. 15, no. 1, s. 15-23. ISSN 0308-9126.
- [36] JAWAHIR, I. S. et al. Surface integrity in material removal processes: Recent advances. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2011. vol. 60, no. 2, s. 603-626. ISSN 0007-8506.
- [37] LIU, Qiang, Xun CHEN a Nabil GINDY. Investigation of acoustic emission signals under a simulative environment of grinding burn. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2006. vol. 46, no. 3, s. 284-292. ISSN 0890-6955.
- [38] MORRISH, Allan H. *The Physical Principles of Magnetism*. New York : IEEE Press, 2001. ISBN 9780780360297;078036029X.

- [39] OCHODEK, Vladislav. Residual stress evaluation in spirally welded pipes for gas pipeline. *6th International Conference on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing, ICBM 6*. Valenciennes : University of Valenciennes, 2007. ISBN 951- 98400-7-9.
- [40] WOJTAS, A. Analysis of residual stresses after shotpeening. *Strojírenská technologie*. roč. 11, č. 3. ISSN 1211-4162.
- [41] Etching In Metallography. *Kemet - Precision lapping, polishing, cleaning and materialography*. [Online] [Citace: 23. leden 2019.] <https://www.kemet.co.uk/blog/metallography/etching-in-metallography>.
- [42] HAIRER, F., KARELOVÁ A., KREMPASZKY C., WERNER E. Etching techniques for the microstructural characterization of complex phase steels by light microscopy. München : Conference: International Doctoral Seminar, 2008.
- [43] TEICHER, U., a další. Performance of diamond and CBN single-layered grinding wheels in grinding titanium. *Materials and Manufacturing Processes*. 2008. vol. 23, no. 3, s. 224-227. ISSN 1042-6914..
- [44] ALAGUMURTHI, N., PALANIRADJA K., SOUNDARARAJAN V. Optimization of Grinding Process Through Design of Experiment (DOE)-A Comparative Study. *Materials and Manufacturing Processes*. 2006. vol. 21, no. 1, s. 19-21. ISSN 1042-6914.
- [45] XIAOHONG, Zhang, WEIKE, An a HUI, Cao. An Expert System of Cubic Boron Nitride (CBN) Grinding Wheel Dressing in Cam Grinding. *Materials and Manufacturing Processes*. 2012. vol. 27, no. 10, s. 1095-1100. ISSN 1042-6914.
- [46] NESLUŠAN, Miroslav. Analýza integrity povrchu prostřednictvím Barkhausenovho šumu a jeho využitie v praxi. *Sborník příspěvků odborného semináře Zbytková napětí*. Ostrava : VŠB – Technická Univerzita Ostrava Fakulta Strojní, 2013.
- [47] ŠVANTNER, Michal. Odvrtávací metoda pro měření zbytkových napětí ve výzkumu a v průmyslu. *Prezentace, Seminář projektu „INTEGRITA“ na FS VŠB-TU Ostrava*. Ostrava : Západočeská univerzita v Plzni, 2013.
- [48] DEVECI, Murat. Detection methods of grinding damages. *Stresstech bulletin 3*. [Online] Stresstech, Nova Instruments company. [Citace: 13. Únor 2019.] [https://www.stresstech.com/download\\_file/view\\_inline/389/](https://www.stresstech.com/download_file/view_inline/389/).

[49] GANEV, Nikolaj. Poznání nehmotného světa zbytkových napětí. *Sborník příspěvků odborného semináře Zbytková napětí*. Ostrava : VŠB – Technická Univerzita Ostrava Fakulta Strojní, 2013.

[50] OCHODEK, Vladislav. Residual Stress after Grinding - Gear Damage. *Sborník příspěvků odborného semináře Zbytková napětí*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2013. s. 107-128.

[51] Interní dokument Škoda Auto.

[52] TING, Lim Mei. Inspection of Aircraft Landing Gear Components by Barkhausen Noise Measurement. *Nondestructive testing*. [Online] Vol. 11, No. 6, June 2006. [Citace: 3. Únor 2019.] <https://www.ndt.net/article/v11n06/wong/wong.htm>.

## **Seznam příloh**

Příloha A – Naměřené hodnoty magnetoelastického parametru

Příloha B – Naměřené hodnoty drsnosti povrchu

Příloha C – Grafy s porovnáním magnetoelastického parametru a drsností povrchu

Příloha D - Porovnání chemického složení a mechanických vlastností materiálů od dodavatelů



## 7 Přílohy

### Příloha A – Naměřené hodnoty magnetoelastického parametru

| Průměrné hodnoty magnetoelastického parametru, strana ZS |             |                       |        |        |        |        |        |
|--|-------------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|  | Materiál    | <b>ACSA Tesch</b>     |        |        |        |        |        |
|  | po orovnění | 1. ks                 | 10. ks | 20. ks | 30. ks | 40. ks | 50. ks |
| Měřený bod   | 1           | 257,2                 | 270,7  | 308,9  | 291,6  | 308,7  | 301,6  |
|  | 2           | 279,1                 | 295,2  | 277,0  | 276,5  | 333,2  | 294,7  |
|  | 3           | 270,5                 | 249,8  | 229,6  | 305,3  | 292,5  | 323,2  |
|  | 4           | 245,3                 | 254,9  | 239,4  | 272,7  | 304,2  | 282,7  |
|  | 5           | 268,2                 | 266,1  | 256,5  | 319,1  | 307,7  | 265,6  |
|  | 6           | 248,1                 | 273,4  | 278,6  | 277,3  | 284,9  | 272,5  |
|  | Materiál    | <b>ACSA MachRotec</b> |        |        |        |        |        |
|  | po orovnění | 1. ks                 | 10. ks | 20. ks | 30. ks | 40. ks |        |
| Měřený bod   | 1           | 259,9                 | 265,1  | 293,1  | 299,9  | 280,1  |        |
|  | 2           | 220,0                 | 258,4  | 306,4  | 350,2  | 288,3  |        |
|  | 3           | 258,6                 | 185,3  | 233,4  | 275,8  | 218,1  |        |
|  | 4           | 223,5                 | 240,4  | 254,2  | 239,1  | 276,6  |        |
|  | 5           | 243,8                 | 244,4  | 283,2  | 336,7  | 292,5  |        |
|  | 6           | 264,4                 | 254,9  | 266,1  | 362,2  | 311,9  |        |
|  | Materiál    | <b>SIDENOR</b>        |        |        |        |        |        |
|  | po orovnění | 1. ks                 | 10. ks | 20. ks | 30. ks | 40. ks | 50. ks |
| Měřený bod   | 1           | 313,8                 | 298,5  | 304,4  | 326,0  | 325,0  | 296,4  |
|  | 2           | 340,0                 | 315,1  | 336,5  | 324,5  | 343,7  | 343,9  |
|  | 3           | 339,7                 | 302,8  | 314,8  | 296,9  | 333,4  | 327,6  |
|  | 4           | 338,1                 | 249,3  | 306,7  | 290,8  | 322,5  | 312,2  |
|  | 5           | 309,6                 | 292,5  | 260,4  | 268,5  | 264,9  | 303,8  |
|  | 6           | 317,0                 | 289,1  | 299,1  | 300,5  | 316,5  | 317,0  |

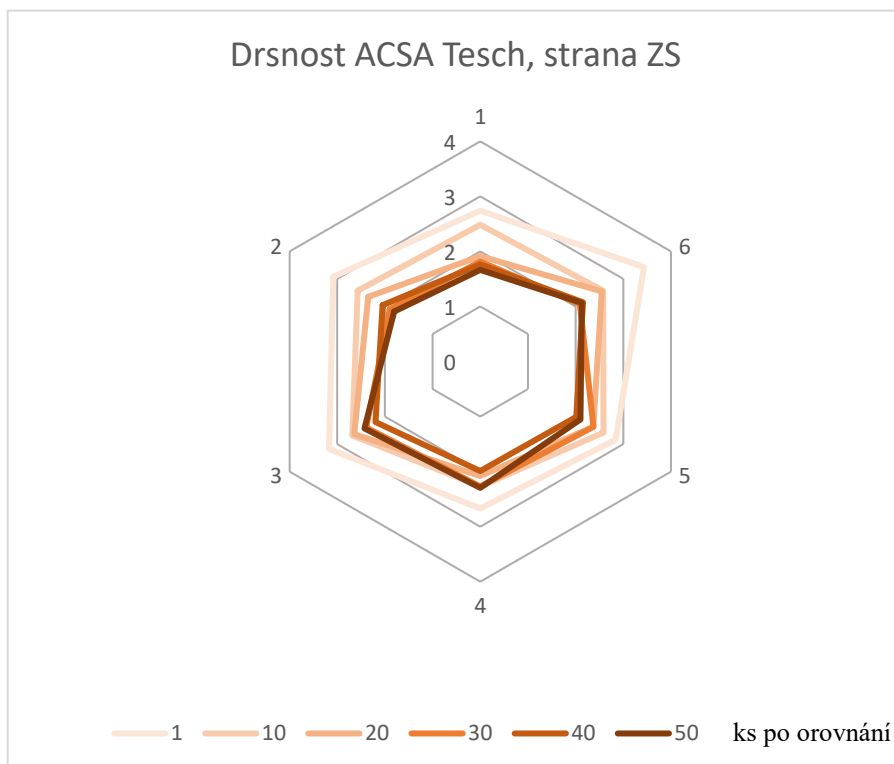
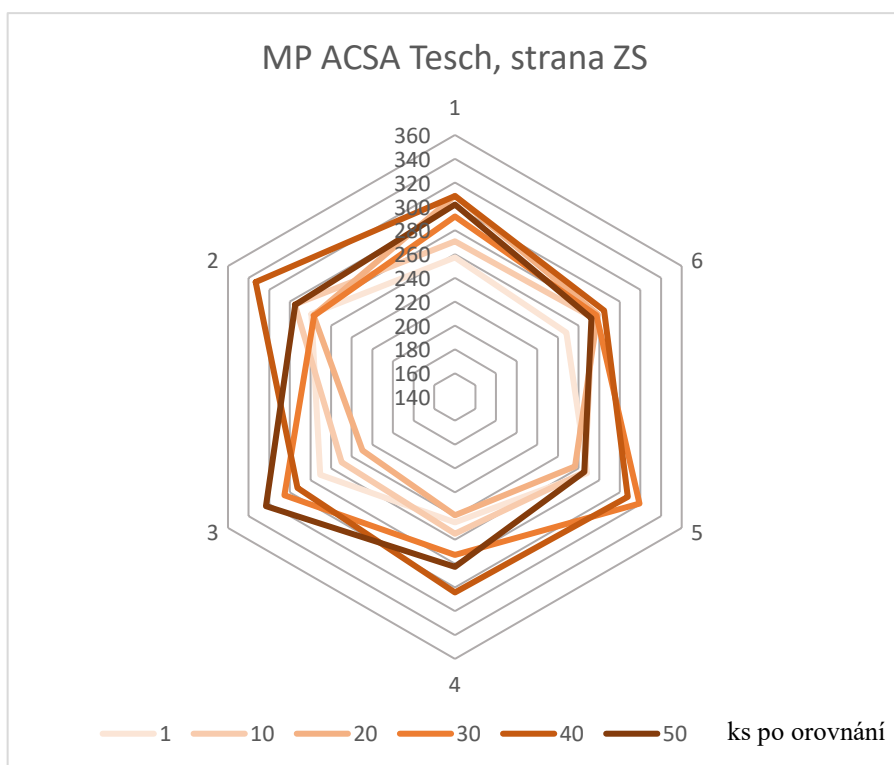
| Průměrné hodnoty magnetoelastického parametru, strana FS |             |                       |        |        |        |        |        |
|--|-------------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|  | Materiál    | <b>ACSA Tesch</b>     |        |        |        |        |        |
|  | po orovnání | 1. ks                 | 10. ks | 20. ks | 30. ks | 40. ks | 50. ks |
| Měřený bod   | 1           | 274,1                 | 302,8  | 288,7  | 280,4  | 299,5  | 300,1  |
|  | 2           | 239,5                 | 236,3  | 232,2  | 229,8  | 229,1  | 244,7  |
|  | 3           | 238,9                 | 209,0  | 228,2  | 202,7  | 203,5  | 232,2  |
|  | 4           | 273,0                 | 258,4  | 300,4  | 288,6  | 246,4  | 309,7  |
|  | 5           | 266,1                 | 260,2  | 332,9  | 269,9  | 261,9  | 287,4  |
|  | 6           | 273,9                 | 249,9  | 321,3  | 235,3  | 279,1  | 277,9  |
|  | Materiál    | <b>ACSA MachRotec</b> |        |        |        |        |        |
|  | po orovnání | 1. ks                 | 10. ks | 20. ks | 30. ks | 40. ks |        |
| Měřený bod   | 1           | 283,0                 | 296,1  | 274,5  | 352,0  | 276,5  |        |
|  | 2           | 259,8                 | 255,8  | 240,8  | 229,2  | 220,2  |        |
|  | 3           | 269,5                 | 233,3  | 205,4  | 247,7  | 236,0  |        |
|  | 4           | 326,2                 | 266,0  | 308,9  | 263,5  | 306,2  |        |
|  | 5           | 295,4                 | 315,4  | 309,4  | 342,8  | 317,8  |        |
|  | 6           | 289,9                 | 305,4  | 302,6  | 313,1  | 251,3  |        |
|  | Materiál    | <b>SIDENOR</b>        |        |        |        |        |        |
|  | po orovnání | 1. ks                 | 10. ks | 20. ks | 30. ks | 40. ks | 50. ks |
| Měřený bod   | 1           | 307,0                 | 302,0  | 290,8  | 305,1  | 303,9  | 324,1  |
|  | 2           | 310,3                 | 304,1  | 268,5  | 277,8  | 308,9  | 277,9  |
|  | 3           | 268,2                 | 274,0  | 251,2  | 253,6  | 289,9  | 292,5  |
|  | 4           | 296,9                 | 294,9  | 287,8  | 282,3  | 314,8  | 304,1  |
|  | 5           | 301,0                 | 309,6  | 287,0  | 277,5  | 320,7  | 313,3  |
|  | 6           | 334,8                 | 326,6  | 321,1  | 321,5  | 338,0  | 329,9  |

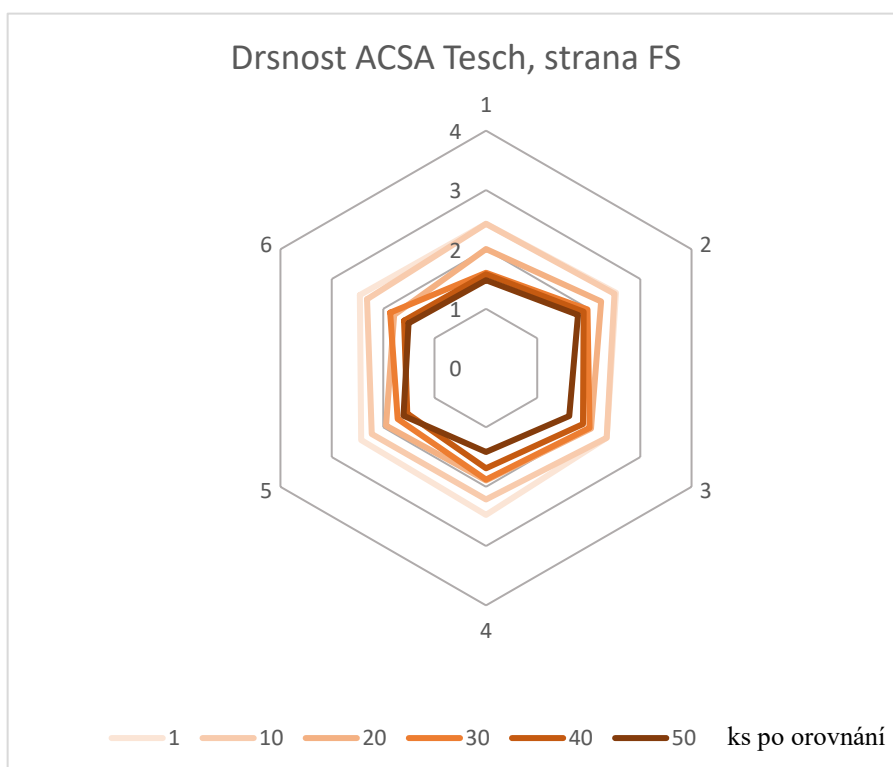
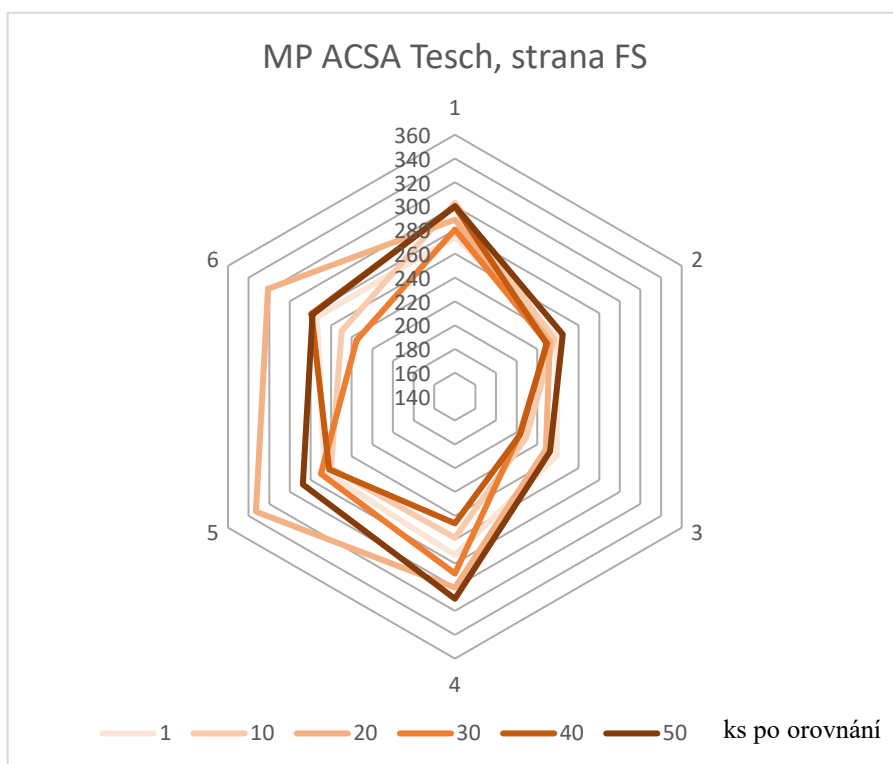
Příloha B - Naměřené hodnoty drsnosti povrchu

| Hodnoty drsnosti povrchu, strana ZS |             |                       |        |        |        |        |        |
|-------------------------------------|-------------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                                     | Materiál    | <b>ACSA Tesch</b>     |        |        |        |        |        |
|                                     | po orovnění | 1. ks                 | 10. ks | 20. ks | 30. ks | 40. ks | 50. ks |
| Měřený bod                          | 1           | 2,74                  | 2,49   | 1,92   | 1,82   | 1,77   | 1,67   |
|                                     | 2           | 3,09                  | 2,57   | 2,35   | 1,90   | 2,05   | 1,81   |
|                                     | 3           | 3,18                  | 2,69   | 2,65   | 2,40   | 2,20   | 2,43   |
|                                     | 4           | 2,67                  | 2,27   | 2,08   | 2,27   | 1,99   | 2,30   |
|                                     | 5           | 2,84                  | 2,59   | 2,37   | 2,38   | 2,02   | 2,10   |
|                                     | 6           | 3,44                  | 2,58   | 2,55   | 2,09   | 2,16   | 2,13   |
|                                     | Materiál    | <b>ACSA MachRotec</b> |        |        |        |        |        |
|                                     | po orovnění | 1. ks                 | 10. ks | 20. ks | 30. ks | 40. ks |        |
| Měřený bod                          | 1           | 3,63                  | 2,44   | 2,37   | 2,70   | 2,40   |        |
|                                     | 2           | 3,65                  | 2,61   | 2,34   | 2,51   | 2,47   |        |
|                                     | 3           | 3,41                  | 2,52   | 2,29   | 2,60   | 2,39   |        |
|                                     | 4           | 3,00                  | 2,58   | 2,48   | 2,60   | 2,44   |        |
|                                     | 5           | 3,24                  | 2,58   | 2,27   | 2,59   | 2,49   |        |
|                                     | 6           | 3,04                  | 2,33   | 2,33   | 2,53   | 2,53   |        |
|                                     | Materiál    | <b>SIDENOR</b>        |        |        |        |        |        |
|                                     | po orovnění | 1. ks                 | 10. ks | 20. ks | 30. ks | 40. ks | 50. ks |
| Měřený bod                          | 1           | 3,19                  | 3,14   | 3,88   | 4,02   | 3,76   | 4,86   |
|                                     | 2           | 3,42                  | 3,13   | 2,99   | 3,08   | 3,03   | 3,88   |
|                                     | 3           | 2,99                  | 3,47   | 3,59   | 3,07   | 3,35   | 4,94   |
|                                     | 4           | 3,09                  | 3,03   | 2,89   | 2,82   | 2,85   | 3,80   |
|                                     | 5           | 2,98                  | 3,52   | 3,40   | 3,21   | 3,29   | 4,66   |
|                                     | 6           | 3,55                  | 3,70   | 3,45   | 4,03   | 3,83   | 5,42   |

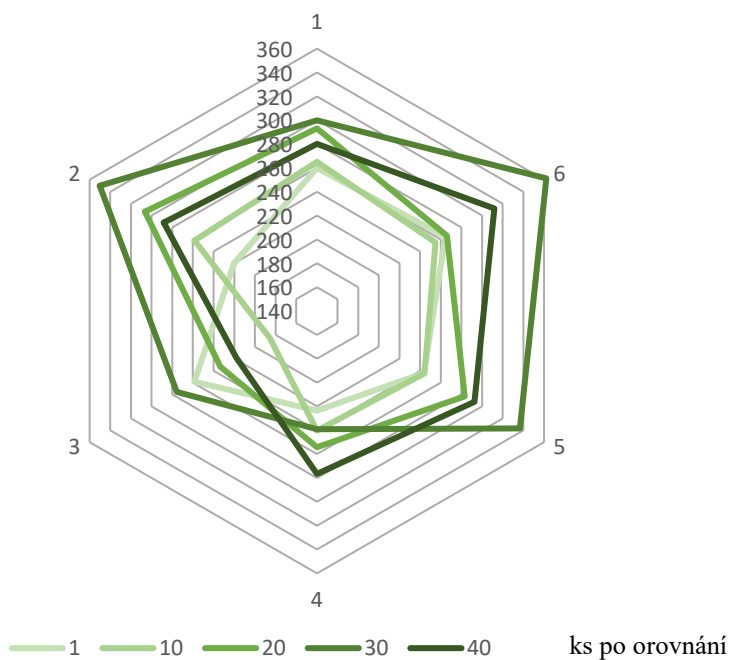
| Hodnoty drsnosti povrchu, strana FS |             |                       |        |        |        |        |        |
|-------------------------------------|-------------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                                     | Materiál    | <b>ACSA Tesch</b>     |        |        |        |        |        |
|                                     | po orovnění | 1. ks                 | 10. ks | 20. ks | 30. ks | 40. ks | 50. ks |
| Měřený bod                          | 1           | 2,43                  | 2,43   | 2,01   | 1,61   | 1,58   | 1,48   |
|                                     | 2           | 2,53                  | 2,50   | 2,24   | 1,98   | 1,90   | 1,79   |
|                                     | 3           | 2,35                  | 2,35   | 2,05   | 2,02   | 1,89   | 1,62   |
|                                     | 4           | 2,48                  | 2,22   | 1,90   | 1,88   | 1,69   | 1,42   |
|                                     | 5           | 2,43                  | 2,23   | 1,95   | 1,72   | 1,53   | 1,61   |
|                                     | 6           | 2,46                  | 2,32   | 1,79   | 1,87   | 1,60   | 1,51   |
|                                     | Materiál    | <b>ACSA MachRotec</b> |        |        |        |        |        |
|                                     | po orovnění | 1. ks                 | 10. ks | 20. ks | 30. ks | 40. ks |        |
| Měřený bod                          | 1           | 3,36                  | 2,21   | 2,32   | 2,40   | 2,51   |        |
|                                     | 2           | 2,32                  | 1,95   | 1,70   | 2,09   | 1,95   |        |
|                                     | 3           | 3,00                  | 1,91   | 1,81   | 2,46   | 1,84   |        |
|                                     | 4           | 3,06                  | 1,88   | 2,06   | 2,54   | 2,37   |        |
|                                     | 5           | 3,00                  | 2,30   | 2,15   | 2,64   | 2,27   |        |
|                                     | 6           | 2,76                  | 2,07   | 2,14   | 2,49   | 2,63   |        |
|                                     | Materiál    | <b>SIDENOR</b>        |        |        |        |        |        |
|                                     | po orovnění | 1. ks                 | 10. ks | 20. ks | 30. ks | 40. ks | 50. ks |
| Měřený bod                          | 1           | 2,29                  | 2,06   | 1,84   | 1,76   | 1,75   | 1,68   |
|                                     | 2           | 2,32                  | 1,96   | 1,66   | 1,55   | 1,70   | 1,55   |
|                                     | 3           | 2,36                  | 2,06   | 1,87   | 1,84   | 1,70   | 1,60   |
|                                     | 4           | 2,48                  | 1,86   | 1,76   | 1,53   | 1,68   | 1,61   |
|                                     | 5           | 2,37                  | 2,00   | 1,74   | 1,72   | 1,52   | 1,56   |
|                                     | 6           | 2,48                  | 2,03   | 1,76   | 1,77   | 1,69   | 1,62   |

Příloha C – Grafy s porovnáním magnetoelastického parametru a drsností povrchu

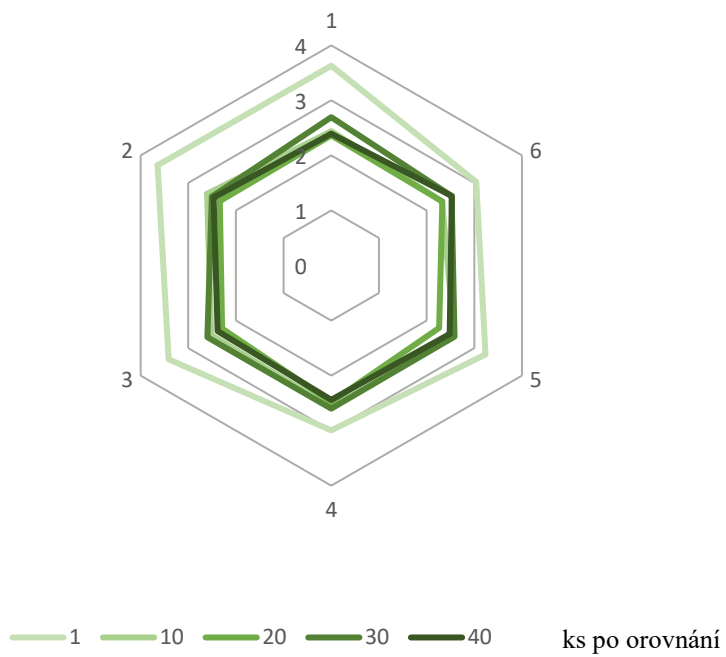




### MP ACSA MachRotec, strana ZS



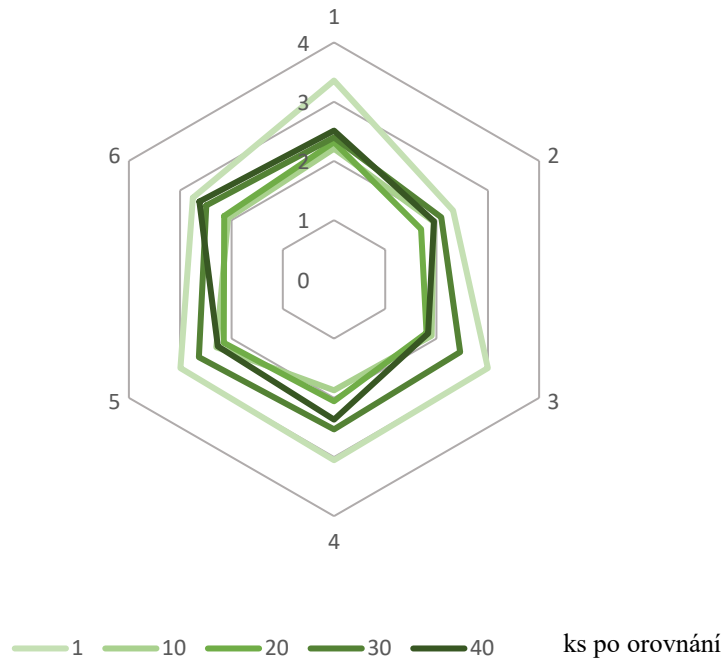
### Drsnost ACSA MachRotec, strana ZS



### MP ACSA MachRotec, strana FS

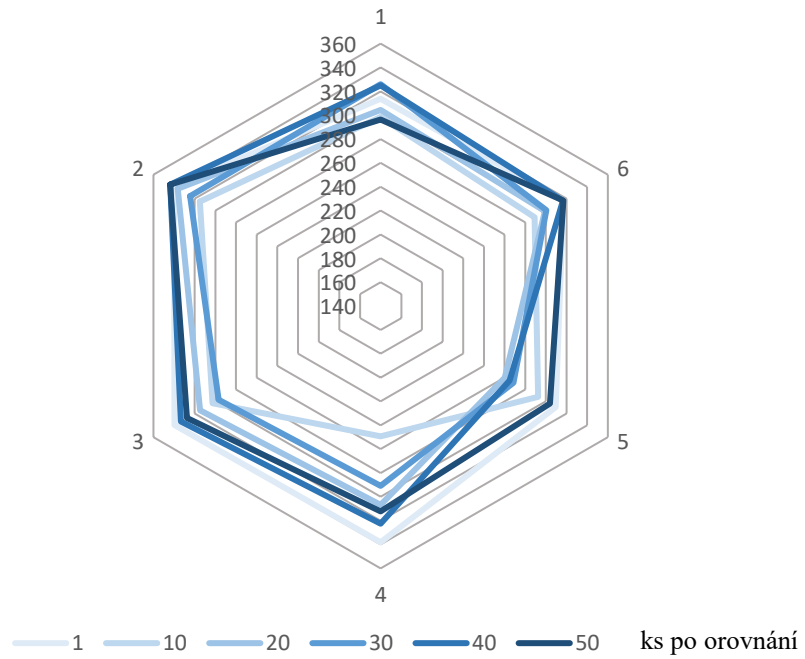


### Drsnost ACSA MachRotec, strana FS

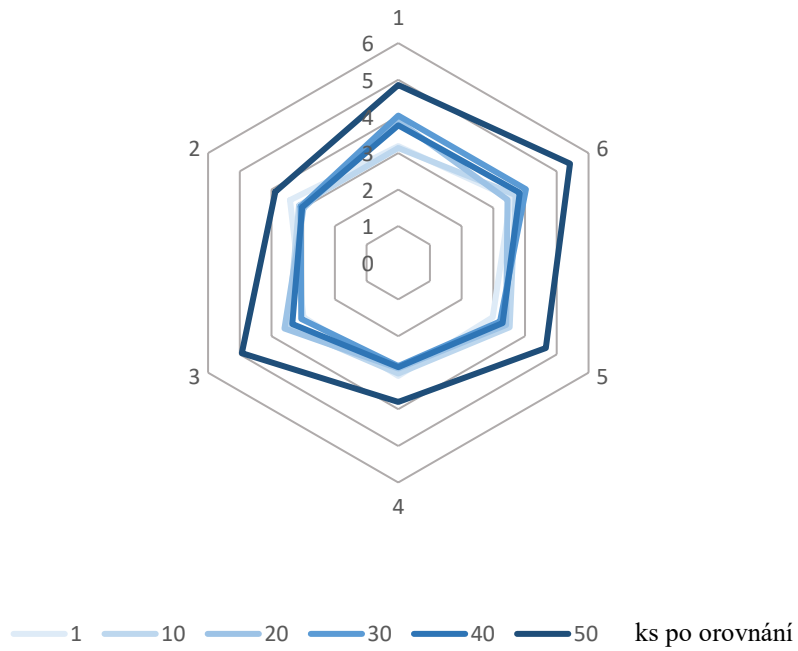




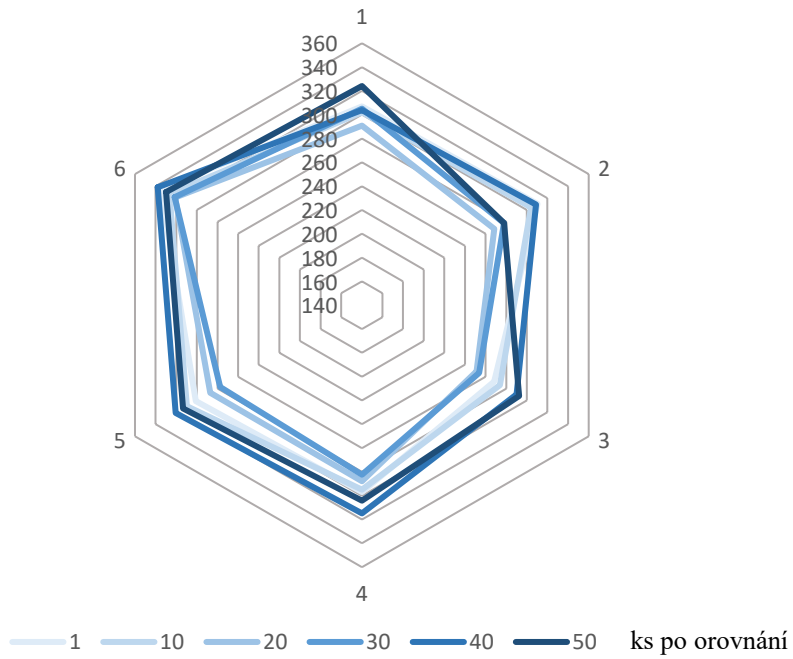
### MP SIDENOR Tesch, strana ZS



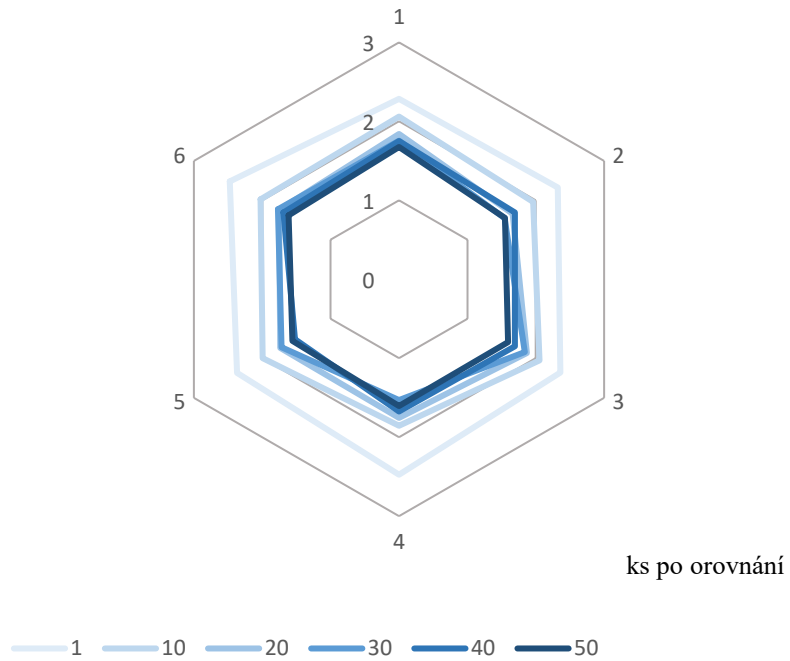
### Drsnost SIDENOR Tesch, strana ZS



### MP SIDENOR Tesch, strana FS



### Drsnost SIDENOR Tesch, strana FS



*Příloha D - Porovnání chemického složení a mechanických vlastností materiálů od dodavatelů*

| Název                     | Materiál | Norma           | Chemické složení |       |                |       |                |       | Mechanické vlastnosti  |   |  |                  |
|---------------------------|----------|-----------------|------------------|-------|----------------|-------|----------------|-------|------------------------|---|--|------------------|
|                           |          |                 | Dle normy        |       | Dle dodavatele |       | Dle laboratoře |       | Tvrdost<br>[HBW 5/750] | Mez pevnosti v<br>tahu R <sub>m</sub> [Mpa] | Smluvní mez kluzu<br>R <sub>p0,2</sub> [Mpa] | Tažnost<br>A [%] |
|                           |          |                 | Ti [%]           | S [%] | Ti [%]         | S [%] | Ti [%]         | S [%] |                        |   |  |                  |
| <b>ACSA (standard Ti)</b> | TL 1438  | ČSN EN<br>10267 | 0,015            | 0,045 | 0,019          | 0,057 | 0,020          | 0,058 | 279                    | 908   | 618  | 15               |
| <b>ACSA (snížený Ti)</b>  |          |                 | ÷                | ÷     | 0,004          | 0,057 | 0,005          | 0,058 | 275                    | 898   | 617  | 16               |
| <b>OEMK</b>               |          |                 | 0,035            | 0,065 | 0,020          | 0,064 | 0,019          | 0,062 | 261                    | 839   | 555  | 15               |
| <b>SIDENOR</b>            |          |                 | 0,008            | 0,059 | 0,008          | 0,059 | 0,008          | 0,059 | 288                    | 915   | 637  | 16               |