

**Technická univerzita v Liberci**

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

BAKALÁŘSKÝ studijní program: strojírenská technologie

Zaměření: obrábění a montáž

**OVĚŘOVÁNÍ METODY NEDESTRUKTIVNÍHO STANOVENÍ ZBYTKOVÉHO  
NAPĚTÍ V POVRCHOVÉ VRSTVĚ BROUŠENÝCH SOUČÁSTÍ**

**VERIFICATION METHOD FOR NON-DESTRUCTIVE DETERMINING RESIDUAL  
STRESS IN THE SURFACE LAYER OF GROUND PARTS**

**KOM – 1176**

*Pavel Sehnoutek*

Vedoucí práce: Doc. Ing. Jan JERSÁK, CSc.

Konzultant: Ing. Lucie VRKOSLAVOVÁ

Počet stran: 58

Počet příloh: 5

Počet tabulek: 14

Počet obrázků: 39

Počet modelů

nebo jiných příloh: 0

Datum: 25. května 2012

## **OVĚŘOVÁNÍ METODY NEDESTRUKTIVNÍHO STANOVENÍ ZBYTKOVÉHO NAPĚTÍ V POVRCHOVÉ VRSTVĚ BROUŠENÝCH SOUČÁSTÍ**

### *ANOTACE:*

Cílem bakalářské práce je využití elektromagnetické metody analýzy Barkhausenova šumu pro hodnocení vlivu řezných podmínek a typu materiálu na velikost zbytkového napětí v povrchové vrstvě broušených součástí. Výsledky experimentu ukázaly, že menší hloubka záběru nebo brousicí kotouč s jemnější strukturou mají pozitivní vliv na velikost tlakového zbytkového napětí v povrchové vrstvě. Při experimentech se potvrdilo, že metoda je rychlá, nedestruktivní a bylo zjištěno, že je velmi citlivá na to, v jakém stavu se materiál nachází.

*Klíčová slova:* nedestruktivní testování, broušení, zbytkové napětí, Barkhausenův šum

## **VERIFICATION METHOD FOR NON-DESTRUCTIVE DETERMINING RESIDUAL STRESS IN THE SURFACE LAYER OF GROUND PARTS**

### *ANNOTATION:*

The aim of this work is the use of electromagnetic Barkhausen noise analysis method to evaluate the effect of cutting conditions and the type of material on the size of residual stress in the surface layer of ground components. Experiment results showed that the smaller the depth coverage or angle grinding wheel with a finer structure have a positive influence on the size of the pressure of residual stress in the surface layer. The experiments confirmed, that the method is rapid, nondestructive and was found to be very sensitive to the condition of the material is located.

*Key words:* nondestructive testing, grinding, residual stress, Barkhausen noise

Zpracovatel: TU v Liberci, KOM

Dokončeno: 2012

Archivní označ. zprávy:

Počet stran: 58

Počet příloh: 5

Počet obrázků: 39

Počet tabulek: 14

Počet diagramů: 0

## ***MÍSTOPŘÍSEŽNÉ PROHLÁŠENÍ***

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

V Liberci dne 25. května 2012

.....

Pavel Sehnoutek

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat především vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Janu Jersákovi, CSc za ochotu, trpělivost, čas strávený konzultacemi a příkladné vedení práce. Také bych chtěl poděkovat Ing. Lucii Vrkoslavové za cenné rady a pomoc při měření. V neposlední řadě bych rád poděkoval Ing. Miloslavovi Ledvinovi za pomoc v dílnách a dalším respondentům, kteří poskytli odborné informace.

.....

Pavel Sehnoutek

<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....</b>	<b>8</b>
<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>9</b>
<b>2. ZBYTKOVÉ NAPĚTÍ .....</b>	<b>11</b>
2.1 ZPŮSOBY MĚŘENÍ ZBYTKOVÉHO NAPĚTÍ.....	12
2.2 DRUHY ZBYTKOVÉHO NAPĚTÍ .....	13
2.3 PŘÍČINY VZNIKU ZBYTKOVÉHO NAPĚTÍ.....	13
<b>3. NEDESTRUKTIVNÍ METODY ZJIŠŤOVÁNÍ ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ.....</b>	<b>15</b>
3.1 BARKHAUSENŮV ŠUM.....	15
3.1.1 Feromagnetické materiály .....	15
3.1.2 Princip Barkhausenova šumu.....	15
3.1 AKUSTICKÁ EMISE (AE) .....	17
3.2 RENTGENOVÁ DIFRAKCE .....	19
<b>4. MAGNETOELASTICKÝ ANALYZÁTOR MICROSCAN 600-1 .....</b>	<b>21</b>
<b>5. METODIKA MĚŘENÍ.....</b>	<b>23</b>
5.1 PŘÍPRAVA PROCESNÍ KAPALINY .....	23
5.2 VOLBA MATERIÁLU .....	24
5.3 POUŽITÉ BROUSICÍ KOTOUČE .....	24
5.4 STATICKÉ VYVÁŽENÍ.....	25
5.5 OROVNÁVÁNÍ.....	25
5.6 STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ.....	26
<b>6. REALIZACE EXPERIMENTŮ .....</b>	<b>29</b>
6.1 OCEL 19 733.4 .....	29
6.1.1 Určení hodnot magnetizačního napětí a magnetizační frekvence.....	29
6.1.2 Naměřené hodnoty magnetoelastického parametru .....	31
6.2 OCEL 14 100.4.....	34
6.2.1 Určení hodnot magnetizačního napětí a magnetizační frekvence.....	34
6.2.2 Naměřené hodnoty magnetoelastického parametru .....	35
6.3 OCEL 12 050.1 .....	39
6.3.1 Určení hodnot magnetizačního napětí a magnetizační frekvence.....	39
6.3.2 Naměřené hodnoty magnetoelastického parametru .....	40

<b>7. SHRnutí A ZHODNOCENí VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>44</b>
7.1 POROVNÁNí HODNOT MP U JEDNOTLIVÝCH TŘíd OCELí .....	44
7.2 POROVNÁNí HODNOT MP PRO DVA TYPY BROUSICíCH KOTOUČŮ .....	47
<b>8. ZÁVĚR .....</b>	<b>50</b>
<b>9. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>54</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>58</b>

## Seznam použitých zkratek a symbolů

---

<i>Zkratka/symbol</i>	<i>jednotka</i>	<i>význam</i>
A <sub>1</sub> , A <sub>2</sub>	-	amplituda
AE	-	akustická emise
HV	-	tvrdost dle Vickerse
“SG“	-	br. kotouč s mikrokrystalickou strukturou
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	br. kotouč s klasickou strukturou
*****	*****	*****
a <sub>p</sub>	mm	hloubka záběru
d	mm	mezirovinná vzdálenost
d <sub>1</sub> , d <sub>2</sub>	μm	úhlopříčka vtisku
F	N	nominální hodnota zkušebního zatížení
mp	mV	magnetoelastický parametr
n	-	celistvý násobek difrakce
RTG	Å	rentgenové záření
t <sub>0,975</sub>	-	konfidenční součinitel
v <sub>c</sub>	m/s	řezná rychlost
v <sub>f</sub>	m/min	posuv
*****	*****	*****
Θ	°	úhel dopadu rentgenového záření
λ	m	vlnová délka
σ	MPa	zbytkové napětí

# 1. Úvod

---

Detekce poruch v pevných látkách je jednou z hlavních částí kontroly jakosti výrobku nejen v předvýrobní nebo výrobní etapě, ale také při samotném provozu [1]. Metody detekce mohou mít charakter destruktivní, semidestruktivní nebo nedestruktivní. U destruktivních metod se výrobek znehodnotí natolik, že už není schopen plnit svůj účel. Tato metoda je založena na mechanickém odstraňování malé vrstvy materiálu na povrchu strojních součástí. Semidestruktivní testování se liší od destruktivního tím, že zkoušený vzorek nebo výrobek lze použít i po měření. A nedestruktivní zkoušení, jak už z názvu vyplývá, nijak zkoušený výrobek neznehodnocuje a ani není potřeba výrobek před měřením zvlášť upravovat. Nevýhodou může být větší finanční náročnost na měřicí vybavení [5],[34].

Nedestruktivní testování (NDT) je oblast úzce související s celým průmyslovým odvětvím, začínaje vesmírnými projekty, elektrotechnikou, vědou zabývající se naukou o materiálech až po fyziku. Obor NDT má za cíl zjistit a zhodnotit vlastnosti materiálu, výsledného produktu nebo celého systému. Vzhledem k tomu, že v současné době je čím dál více kladen důraz na metody neznehodnocující zkoušený výrobek, materiál, popřípadě celý systém je nedestruktivní testování čím dál více využíváno. Zjišťování vnitřních vad materiálu nedestruktivním testováním může pomoci ke snížení výrobních nákladů, ale také může mít za následek záchranu lidských životů tím, že dokáže předcházet vnitřním vadám výrobků, což zaručuje vyšší bezpečnost [13]. Například dutiny a trhliny mohou mít zásadní vliv na vlastnosti struktury strojních součástí jako např. ložisek, klikových hřídelí, ozubených kol, vaček a dalších součástí, jejichž kvalita, spolehlivost a životnost často rozhoduje o funkčnosti celého zařízení [1]. Všechny tyto faktory napomáhají ke zlepšení kvality výroby a tedy i k vyšší spokojenosti zákazníka [13]. Nicméně, NDT metody mají mnohem hlubší a širší využití než zjišťování vnitřních vad součástí. Touto informací může být jeden nebo více následujících parametrů [7], [16], [20]:

- informace o umístění a stanovení diskontinuity a separací v materiálu (trhliny, dutiny, vměstky),
- strukturální hodnocení komponentu (krystalická struktura, velikost zrna, segregace, pórovitost aj.),
- metrologie a rozměrové parametry (průměr, mezera, spáry, tloušťka různých druhů nátěrů, aj.),



- fyzikální, magnetické a mechanické vlastnosti (modul pružnosti, odrazivost světla, tepelná a el. vodivost),
- složení a chemická analýza (ke zjištění množství nečistot nebo příměsí, identifikace slitin),
- napětí a odezva při pohyblivém zatížení (vibrace, zbytkové napětí, narůstání trhlin, opotřebení),
- abnormální zdroje tepla.

Každá metoda nedestruktivního testování slouží k získání jiné informace o materiálu. Proto je nutné, pokud si to situace žádá, abychom použili pro zjištění celkového stavu materiálu více zkušebních metod [20].

Cílem této bakalářské práce je ověřit metodu nedestruktivního stanovení zbytkového napětí v povrchové vrstvě broušených součástí metodou analýzy Barkhausenova šumu. Pro ověření metody byly vybrány tři druhy materiálu (ocel třídy 12, 14 a 19), dva typy brousicích kotoučů ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  a “SG“) a zvoleny dvě hloubky záběru (0,01 mm a 0,03 mm). Úkolem této bakalářské práce je ověřit zda

- druh brousicích kotoučů má vliv na velikost zbytkového napětí,
- hloubka záběru má vliv na velikost zbytkového napětí,
- druh materiálu má vliv na velikost zbytkového napětí.

Dalším cílem je také potvrdit, jestli je metoda časově nenáročná, jestli je metoda jednoduchá na realizaci, popřípadě zjistit, jestli metoda nemá další přínosy pro praktické použití.

## 2. Zbytkové napětí

---

Co je zbytkové napětí? Přesná definice je taková, že zbytkové napětí je takové napětí, které je v materiálu přítomno i po odstranění vnějších působících sil. Toto napětí je nehomogenní, tzn., že není v celém objemu tělesa, ale jen v jeho povrchové vrstvě [14].

Všechny mechanické procesy mohou způsobit plastickou deformaci, která vede ke vzniku zbytkového napětí [14]. Konkrétně v technické praxi jsou způsobena vlastním procesem obrábění. Zbytková napětí v obráběném povrchu poskytují důležitou informaci o jeho stavu a budoucím chování při zatížení. Je obecně známo, že každý materiál reaguje na vnější podněty. Tato podstata je založena na třetím Newtonově zákonu, který říká, že proti každé akci působí stejně velká reakce [11].

Tyto reakce jsou způsobeny [30]

- nerovnoměrnou plastickou deformací (rozdíly ve změnách na povrchu a v jádře vzorku) vyvolanou mechanickými silami, doprovázející proces výroby,
- nerovnoměrným ohřevem či ochlazením součásti (mající za následek teplené napětí),
- absorpcí nových látek (plynů) do povrchové vrstvy materiálu,
- nerovnoměrnou změnou struktury, která je zapříčiněna kombinací působení teploty a deformace v důsledku technologické operace (fázová transformace, velikost zrna, vylučování nových strukturních složek).

Ve většině případů technické praxe to bývá zpravidla kombinace více faktorů působících na povrch součásti. Například tepelným gradientem může být způsobena změna krystalové mřížky, se kterou souvisí změna objemu vyvolávající zbytková napětí [30]. Dalším konkrétním příkladem může být vznik zbytkové napjatosti v povrchové vrstvě u procesu broušení. Tuto dokončovací metodu doprovází velké mechanické zatížení, které má za následek vznik velkého zbytkového napětí v povrchové vrstvě broušeného materiálu. Příčinou mechanického zatížení je působení brousícího kotouče, který je složen mimo jiné ze zrn brusiva. Při záběru zrn dochází k elastické a následně potom k plastické deformaci. Broušený vzorek je namáhán nejen mechanicky, ale také tepelně. Tření brousících zrn o materiál a následné tření elementární třísky o zrna kotouče způsobují tepelné rozdíly mezi povrchem a jádrem vzorku. Tyto průvodní jevy (mechanické a tepelné) mají za následek vznik zbytkové napjatosti [23]. Na velikost zbytkové napjatosti mají vliv mnohé podmínky. Například podmínky řezné (hloubka záběru, posuv, řezná rychlost), tzn. velikost silových účinků působících na materiál. Dalšími možnými vlivy jsou použité nástroje, tuhost soustavy, použitá

procesní kapalina (vliv na rychlost ochlazování) a v neposlední řadě druh zpracovávaného materiálu [34].

Zbytková napjatost může být pro materiál příznivá, ale může mít i nežádoucí účinky na vlastnosti výrobku. Negativní účinky má především tahové zbytkové napětí. To může způsobit zborcení, vznik trhlin, napětíovou korozi nebo snížení meze únavy. Co se týče kladných vlastností napjatosti, tlakového zbytkového napětí, tak k těm patří napětí vyvolána některými typy povrchového opracování (např. kuličkování). Tlakové zbytkové napětí také přispívá k prodloužení životnosti součástí nebo zvýšení korozní odolnosti. Vzhledem k důležitosti informace o průběhu zbytkového napětí po obrábění, a zvláště po dokončovacích operacích, je nutné se zjišťováním těchto informací zabývat a vytvářet nové informace tak, aby byly aplikovatelné ve výrobě [29].

## 2.1 Způsoby měření zbytkového napětí

K měření zbytkového napětí se mohou použít jak nedestruktivní, tak destruktivní metody. K nejpoužívanějším patří odvrtávací metoda, která tvoří přibližně 30% metod používaných k analýze zbytkového napětí, RTG a neutronová difrakce tvořící asi 26% a zbytek tvoří méně využívané metody [25].

Nejčastěji používané metody mohou být rozděleny do několika skupin [21], [36].

- Mechanické
  - Odleptávání - založené zejména na měření deformací při odstraňování povrchové vrstvy materiálu, kterou doprovází uvolňování napětí.
  - Odvrtávání - do povrchu tělesa se vyvrtá otvor, na který těleso zareaguje uvolněním části napětí, které se následně tenzometricky změří.
- Magnetické (pomocí analýzy Barkhausenova šumu)
- Akustické (uvolňování energie defektu uvnitř materiálu pomocí vnějšího zatížení)
- Difrakce
  - Rentgenová - rozptyl rentgenových paprsků na rovinách materiálu, kterým měříme mezivzdálenost deformované mřížky a porovnáváme ji s mezivzdáleností nedeformované krystalové mřížky.
  - Neutronová - svazek neutronu dopadá na krystalovou mřížku materiálu a dochází k difrakci, která je na povrchu materiálu detekována.

## 2.2 Druhy zbytkového napětí

Abychom mohli rozlišovat různé druhy zbytkových napětí, a tím i jejich vliv na vlastnosti součástí, potřebujeme vědět, do jak velkého objemu tato napětí zasahují, a v kterých se již nemění co do velikosti a směru působení. Dle Macheraucha a Tietze se rozdělují na [29]:

**Zbytková napětí I. druhu** - jsou napětí, která dosahují rovnováhy v makroobjemu součásti. Tzn., že velikost napětí se zásadně nemění v makroskopických oblastech [30], proto jsou zvaná též makroskopická [4]. Velikost těchto oblastí dosahuje řádově několik mm<sup>3</sup>. Tato makroskopická oblast může mít tvar plošně rozsáhlé vrstvy, ale o nepatrné tloušťce. Přesto napětí ve směru kolmém k této ploše mohou dosáhnout vysokých gradientů [27].

**Zbytková napětí II. druhu** - zvaná též mikroskopická [4], jsou vyrovnána v oblasti několika zrn, neboli jejich velikost se mění od jednoho krystalového zrna k druhému. Tato napětí jsou homogenní jen v malých oblastech (v oblastech srovnatelných s velikostí jednotlivých zrn). Výslednice vnitřních sil se uvažuje již u objemů, zahrnujících několik zrn. Porušením, například rozříznutím struktury materiálu, nemusí dojít ke změně makroskopických rozměrů tělesa jako to je u napětí I. druhu [27].

**Zbytková napětí III. druhu** - (submikroskopická) [29] jsou nehomogenní dokonce i v nejmenších oblastech materiálu srovnatelných s meziatomovými vzdálenostmi [6]. Při porušení integrity povrchu nikdy nedochází k makroskopické změně tvaru tělesa. Napětí III. druhu dosahují rovnováhy v dostatečně velkých částech jednoho zrna [30].

## 2.3 Příčiny vzniku zbytkového napětí

Jak již bylo zmíněno v předešlých odstavcích, zbytková napětí jsou způsobena technologií výroby a teplenými nebo chemickými úpravami materiálu. Každé ze tří druhů zbytkového napětí vzniká v jiné velikosti objemu a je důsledkem různých procesů, doprovázejících zpracování polotovaru až do jeho finální podoby [34].

**Zbytková napětí I. druhu mohou být způsobena** [27], [29]

- a) výrobními technologiemi:
  - spojováním (svařování, lepení, pájení),
  - obráběním (soustružením, broušením, frézováním, vrtáním, atd.),
  - tvářením (kování, lisování, válcování, atd.),
  - povrchovými úpravami povrchu (galvanizování, zinkování, plátování),
- b) zatížením při montáži, dopravě, zkoušení a dalším vnějším zatížením podobného charakteru.

### **Zbytková napětí II. druhu mohou vzniknout [27], [29]**

- při tepelných procesech v materiálu s fázemi majícími rozdílné hodnoty teplotních součinitelů délkové roztažnosti,
- při deformaci materiálu skládajícího se buď z jedné fáze (jejíž zrna jsou však různě orientována k silovému toku a jejichž mez kluzu je anizotropní) anebo z více fází s různými mechanickými vlastnostmi.

### **Zbytková napětí III. druhu**

Jsou způsobena poruchami krystalové mřížky [22], [27].

- Bodové: vakance, intersticiály, substituční atomy.
- Čárové: především dislokace (hranová a šroubovitá), které se mohou pohybovat krystalovou mřížkou, tzv. konzervativním pohybem. A to buď skluzem, nebo šplháním.
- Plošné: vrstevné chyby, hranice zrn (velký počet různě prostorově orientovaných krystalů) a volné poruchy.
- Prostorové: tvořeny oblastmi mřížky, v nichž jsou nahromaděny atomy příměsí tak, aby nedošlo k porušení soudržnosti mřížky. Tzn., že souvislost se sousední mřížkou zůstává zachována.

## 3. Nedestruktivní metody zjišťování zbytkových napětí

---

### 3.1 Barkhausenův šum

#### 3.1.1 Feromagnetické materiály

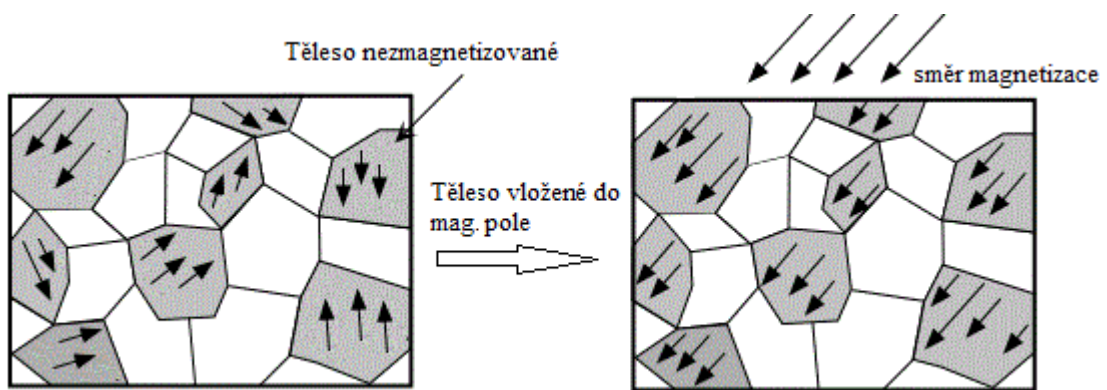
Analýza Barkhausenova šumu, též známa jako magnetoelastická analýza, je metoda nedestruktivního testování, založená na změnách magnetických vlastností feromagnetických materiálů (látky, které vykazují magnetismus i v nepřítomnosti magnetického pole) v magnetickém poli. Touto metodou lze vyšetřit strukturní a napěťové změny v materiálech. Mnoho měřicích technik může být použito pro měření feromagnetických materiálů. Nicméně magnetické metody využívají magnetické vlastnosti těchto látek pro šetření širokého spektra materiálových vlastností od trhlin, dutin až po zbytkové napětí. Přestože analýza Barkhausenova šumu je jednoduchá, rychlá a nedestruktivní, tak tato metoda ještě nebyla, v porovnání s ultrazvukovou emisí nebo difrakční analýzou, plně prozkoumána [15], [19].

Pevné látky mají uspořádanou krystalovou mřížku. Krystalová mřížka je složena z menších periodicky se opakujících mřížek, které nazýváme elementární krystalové buňky. Je to tedy nejmenší seskupení atomů, jehož periodickým opakováním lze vytvořit celou krystalovou mřížku. I za běžného stavu se v krystalové buňce vyskytují magnetické domény (Weissovy domény), což jsou “myšlené“ oblasti v krystalu, kde jsou atomární dipóly seřazeny do stejného směru. Ale v samotné krystalové buňce se domény orientují zcela náhodně. To má za následek, že se magnetické pole domén, které ho vytvářejí, z velké části ruší. To je důvod malého výsledného magnetického momentu, když je těleso nezmagnetizované. Samotné domény jsou odděleny hranicemi (Blochovy stěny), což jsou místa, kde se mění orientace jednotlivých dipólů [9].

#### 3.1.2 Princip Barkhausenova šumu

Při vložení zkoumaného vzorku do vnějšího magnetického pole dochází k pohybu doménových stěn. Aby k tomuto pohybu mohlo vůbec dojít, musí se doména na jedné straně zvětšit a doména na druhé straně zmenšit [24]. Tento pohyb má za následek změnu v celkové magnetizaci vzorku, jak můžeme vidět na obr. 1. Je-li v průběhu pohybu domén v blízkosti umístěna cívka, pak pohyb domén, způsobující změnu magnetizace, vyvolává v cívice

elektrický puls, který je zachycen snímačem a následně převáděn na elektrický signál.



Obr. 1 Vliv Magnetizace [3]

Zde platí, že signál je závislý na vzdálenosti. Se zvětšující se vzdáleností, kterou musí puls urazit přes materiál, velikost klesá. Zpomalení tohoto pulsu mají na svědomí vířivé proudy indukované pohybem signálu [2], [34].

Barkhausenův šum je charakterizován tzv. magnetoelastickým parametrem (mp), který odpovídá amplitudě získaného signálu. Amplituda je ovlivněna vším, co brání pohybu doménových stěn, včetně precipitace, dislokací, hranice zrn nebo zbytkového napětí [2], [34]. Hodnota magnetoelastického parametru nevyjadřuje přesně velikost zbytkového napětí. Neřekne nám kolik tahového nebo tlakového napětí je v povrchové vrstvě přítomno. Magnetoelastický parametr jenom říká, že při větší naměřené hodnotě mp u měkké oceli bude pravděpodobně zbytkové napětí větší, než u tvrdší oceli, kde naměřená hodnota mp bude menší.

Schopnost získat signál je závislá na hloubce, ze které lze měřící signál ještě získat. Tuto hloubku charakterizuje tzv. útlum, závisující na dvou hlavních faktorech [27]:

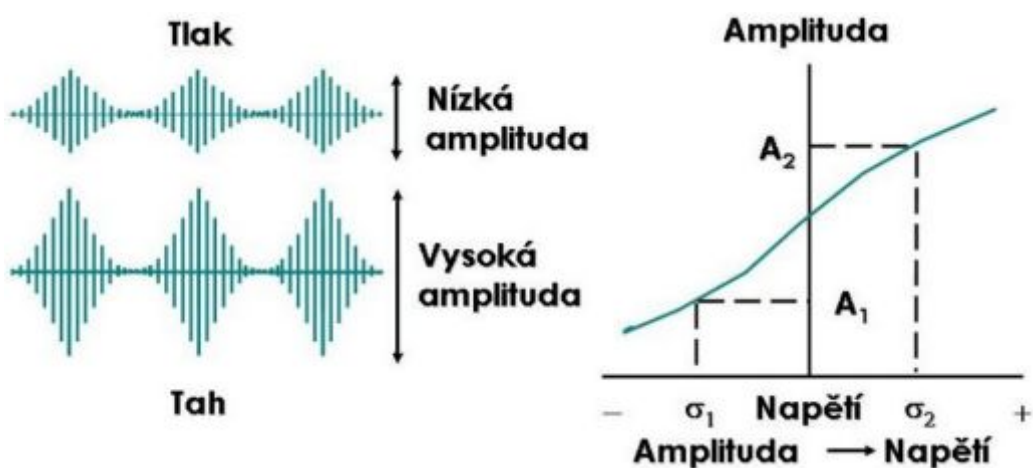
- 1) frekvenčním rozsahu generovaného signálu
- 2) vodivosti a permeabilitě zkoušeného materiálu

Na velikost amplitudy získaného signálu mají vliv tyto materiálové parametry [27], [34]:

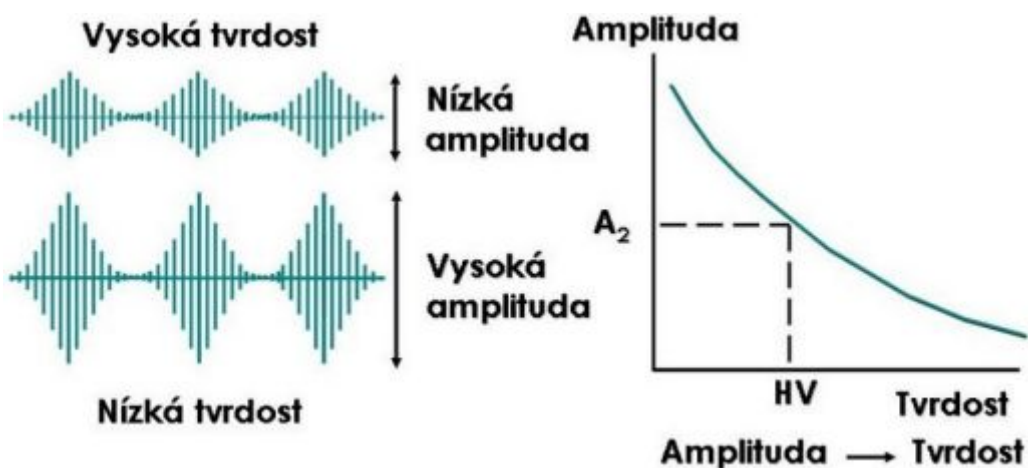
1. Prvním významným parametrem ovlivňující amplitudu Barkhausenova šumu je přítomnost a rozložení zbytkových napětí (obr. 2), která ovlivňují cestu, po níž se domény ubírají směrem ke snadné orientaci ve směru magnetizace. Tento jev, kdy elastické vlastnosti ovlivňují doménovou strukturu a magnetické vlastnosti, se nazývá magnetoelastická interakce. V důsledku tohoto jevu tlakové zbytkové napětí, přítomné v povrchu materiálu, snižuje velikost amplitudy získaného signálu, zatímco tahové

zbytkové napětí amplitudu zvyšuje. Tyto skutečnosti proto můžeme využít ke změření zbytkového napětí.

2. Dalším parametrem ovlivňující Barkhausenův šum je metalurgická struktura. Jelikož pohyb doménových stěn je blokován na mřížkové úrovni stejnými překážkami a defekty jako pohyb dislokací při plastické deformaci, klesá intenzita signálu s rostoucí tvrdostí materiálu, jak lze vidět na obr. 3. Můžeme tedy získat informaci o mikrostrukturním stavu vzorku. Je možné tedy detekovat nejen běžné povrchové vady (jako spáleniny po broušení, povrchově neupravené hrany či plochy, oduhličené oblasti apod.), ale i změny v mikrostruktuře v důsledku únavy materiálu.



Obr. 2 Závislost amplitudy Barkhausenova šumu na zbytkovém napětí [31]



Obr. 3 Závislost amplitudy Barkhausenova šumu na tvrdosti [31]

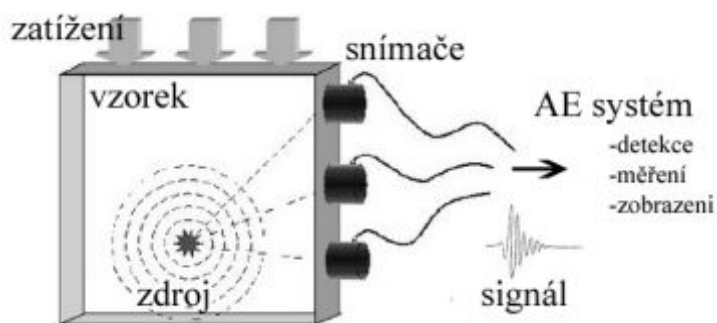
### 3.2 Akustická emise (AE)

S akustickou emisí se setkáváme v každodenním životě. Například popraskání suché větve před jejím zlomením. Toto popraskání je zdrojem AE, které se šíří vzduchem v podobě



tlakových vln od větve k uchu. Pro detailnější analýzu je vhodnější zkoumat šíření vln přímo v daném materiálu, v tomto případě ve větvi, kde se také od zdroje šíří tělesem elastické napěťové vlny. Tento princip lze využít mimo jiné i u kovových materiálů. K jejich detekci a následnému vyhodnocení je nutné mít speciální zařízení (obr. 3), které zachytí umístění zdroje AE, počet událostí vyvolávající AE a intenzitu událostí AE [20], [33].

Vlivem obráběcího procesu, například odebíráním třísky z povrchu materiálu brousicím kotoučem, vznikají v materiálu defekty způsobené napěťovými a tepelnými poli. Působením vnějšího zatížení (změnou tlaku, teploty) na povrch součásti dojde k lokálnímu uvolnění energie, která je hlavní příčinou vzniku AE [28]. Iniciátorem akustické emise může být i plastická



Obr. 4 Schéma měřicího zařízení pro AE [8]

deformace, která způsobuje pohyb dislokací, emitující AE, fázové přeměny materiálu nebo rozvoj porušení materiálu doprovázený iniciací mikrotrhlin či mikroposkoky čela trhlin [20]. Všechny tyto jevy způsobí lokální uvolnění energie v podobě napěťových vln, které se šíří materiálem k sensorům umístěným na povrchu materiálu. Čidla vlny detekují a přemění je na elektrický signál [8], [13].

Celý proces můžeme tedy rozdělit do několika fází [20]:

- a) Vnější zatížení zkoušeného materiálu pro uvolnění energie v místě defektu
- b) Šíření napěťových vln materiálem – akustická emise pohybující se od zdroje až k místu umístění čidla
- c) Detekce napěťových vln snímači a následná transformace na elektrický signál AE
- d) Zhodnocení elektrického signálu měřicím zařízením AE

Výhody [17]:

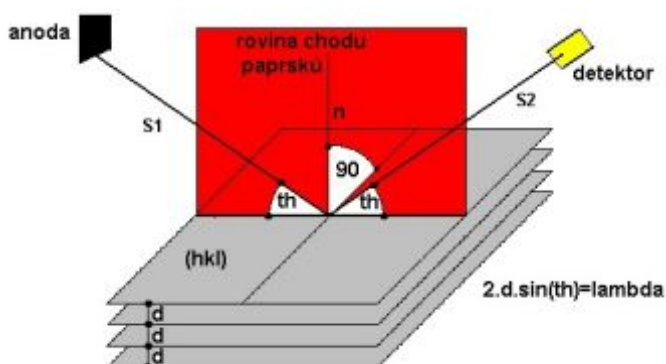
- Pomocí zachycení akustického vlnění několika snímači v různý čas je možno určit místo defektu v materiálu
- Relativní jednoduchost defektoskopické metody
- Dynamiku materiálu lze pozorovat v reálném čase
- Zaznamenávání pouze aktivních trhlin ve zkoušeném materiálu

Nevýhody [18], [12]:

- Na výsledný signál, který prochází materiálem a je dále zpracováván snímači na povrchu součásti, má vliv tvar součásti, způsob přichycení snímače nebo homogenita materiálu. To znamená, že čím je větší součást, tím se snižuje přesnost měření.
- Vliv mikroklimatických podmínek, např. teploty a vlhkosti.

### 3.3 Rentgenová difrakce

Jak Barkhausenův šum, tak i rentgenová difrakce je používána pro kontrolu a optimalizaci technologických parametrů během finálních povrchových úprav [19]. Tato metoda byla zpočátku metodou pro strukturní analýzu materiálu. Postupem času se rentgenová difrakce



Obr. 5 Difrakce RTG záření na krystalografických rovinách [38]

začala využívat v mnohem širším měřítku. V dnešní době je jednoznačně nejvyužívanější nedestruktivní metodou pro zjišťování vlastností materiálu. Její uplatnění se našlo například při zjišťování chemického složení, vnitřní struktury materiálu nebo při měření zbytkového napětí v povrchové vrstvě [39]. Rentgenová difrakce je založena

na principu rentgenového záření (RTG, X-Ray). Rentgenové záření je elektromagnetické záření, jehož vlnová délka je vyjadřována angströmy:  $1\text{\AA}=10^{-10}\text{ m}$  [10]. Dopadající svazek rentgenového záření na krystal způsobí rozkmitání elektronů obsažených v atomech krystalové mřížky, které se stávají zdrojem sekundárního koherentního záření [35]. Vzájemnou interakcí původního zdroje rentgenového záření a elektronů dochází k rozptylu, tj. mění jeho směr. K rozptylu dochází na soustavě rovnoběžných krystalových rovin proložených atomy krystalu. V některých směrech interferují (skládání libovolného počtu vln s přihlédnutím k jejich fázi) rozptýlené vlny destruktivně a tím vznikají minima intenzity [10]. Pokud rozptýlené vlny interferují konstruktivně, což dává maxima intenzity, tak odpovídají Braggovu zákonu

$$2 \cdot d \cdot \sin \Theta = n \cdot \lambda,$$

kde  $d$  je mezirovinná vzdálenost,  $\Theta$  je úhel dopadu rentgenového záření,  $\lambda$  vlnová délka záření a  $n$  celistvý násobek difrakce. Pravá strana Braggova zákona “vyrovnává” dráhový rozdíl, který je roven celistvému násobku vlnové délky rentgenového záření. Levá strana rovnice vyjadřuje dráhový rozdíl paprsků difraktovaných atomy ze sousední roviny [35].

Pokud je splněna Braggova podmínka, pak se paprsky difraktované různými rovinami skládají ve fázi a po výstupu z krystalu jsou zaznamenávány zařízením s fotografickou nebo počítačovou registrací, který je hlavním nástrojem pro zhodnocení vlastností zkoušeného materiálu [30].

Výhody [6], [20]:

- Možnost rozlišení I. a II. druhu zbytkového napětí ve vícefázových polykrystalických materiálech (zbytková napětí II. druhu se projeví rozšířením difrakčních linií)
- Díky velmi malým vlnovým délkám rentgenového záření je možnost získat difrakční informace z velmi tenké povrchové vrstvy
- Možnost stanovení zbytkových napětí na jednotlivých složkách vícefázových soustav
- Nenáročnost na úpravu vzorků.

Nevýhody [27]:

- Metodu lze využít pouze pro krystalické (polykrystalické) materiály
- S rostoucími rozměry zrn klesá přesnost a spolehlivost měření
- Vysoké ekonomické nároky na zařízení
- Nutnost vysoce kvalifikovaného pracovníka

## 4. Magnetoelastický analyzátor MicroScan 600-1

---

MicroScan 600 je systém, který obsahuje digitální analyzátor Rollscan 300 a software MicroScan 600. Rollscan 300 je základní systém obsahující snímač a hlavní analytickou jednotku (obr. 5). Typ snímače se liší podle měřeného povrchu. Software MicroScan 600 slouží pro získávání dat, kontrolu měření, ukládání a načítání dat, výpočty/zobrazování/tisk výsledků testů. MicroScan analyzuje analogový signál získaný ze snímače, poté získaný signál převede na digitální a následně ho uloží do paměti [26].

Aby byly výsledky co nejpřesnější, tak je nutné nastavit magnetizaci. Účelem magnetizace je určení intenzity magnetického pole, které je generováno snímačem. Nastavení správné velikosti magnetizační frekvence a napětí je důležité, protože příliš vysoká intenzita magnetického pole může způsobit saturaci vzorku nebo snímače. Saturace je nechtěný jev, protože způsobuje maximální “nasycení” snímače magnetizací, tzn., že poměrná permeabilita dosáhla své maximální hodnoty pro daný materiál. To způsobí orientací všech domén do směru magnetického pole, což je pro měření Barkhausenova šumu nepříznivé a může to znatelně snížit citlivost měřicí metody. Z těchto důvodů je nutné nastavit následující parametry tak, aby výsledky byly co nejpřesnější [9], [26].



*Obr. 6 Digitální analyzátor Barkhausenova šumu – Rollscan 300 [24]*

Prvním parametrem je přeběh magnetizačního napětí. Je to speciální měření pro určení optimálního magnetizačního napětí. Během tohoto měření zařízení Rollscan pomalu zvyšuje magnetizační napětí od nuly po maximální povolené magnetizační napětí a zaznamenává magnetoelastický parametr (mp) jako funkci napětí. Během přeběhu je magnetizační

frekvence konstantní. Optimální napětí je nastaveno z výsledného grafu, ze kterého odečteme hodnotu, při které měřící křivka začne reagovat (zvyšovat).

Druhý parametr, který je nutno nastavit je přeběh magnetizační frekvence, což je rovněž speciální měření, jehož účelem je určit optimální magnetizační frekvenci. Zařízení Rollscan zvolna zvyšuje magnetizační frekvenci od minima (10 Hz) po nejvyšší dovolenou hodnotu (1000 Hz) a zaznamenává  $m_p$  jako funkci frekvence. Magnetizační napětí je během přeběhu konstantní. Stejně jako u magnetizačního napětí se ideální hodnota zvolí z výsledného grafu. Na křivce je to hodnota, kdy křivka dosáhne svého maxima. Nejběžnější frekvence používaná ve strojírenských závodech je 125 Hz [24], [37].

## 5. Metodika měření

---

Vzorky pro ověření nedestruktivního stanovení zbytkového napětí metodou analýzy Barkhausenova šumu a metodou rentgenové difrakce budou broušeny na rovinné brusce BPH 20 (obr. 7). Z důvodu upnutí vzorků na magnetické desce brusky BPH 20 bude potřeba broušené vzorky před měřením odmagnetizovat použitím demagnetizátoru NAREX dostupný na katedře obrábění a montáže. Další specifikace brusky jsou popsány v tab. 1.

Z tabulky č. 2 je zřejmé, za jakých podmínek budou vzorky broušeny. Budou použity dvě hloubky záběru. Hloubka záběru používaná spíše pro dokončovací operace 0,01 mm a hloubka záběru 0,03 mm vhodná zejména pro obrábění na hrubo. V případě tohoto experimentu budou ještě použity tři druhy oceli a dva typy brousících kotoučů. Posuv, řezná rychlost, otáčky stoje a procesní kapalina zůstanou konstantní.



*Obr. 7 Bruska BPH 20*

### 5.1 Příprava procesní kapaliny

K chlazení bude použita procesní kapalina Paramo SK 220. Tato kapalina bude použita v koncentraci 4%. K zjištění koncentrace se použije ruční refraktometr K71901 model RLC ATC 0-18% Brix. Z namíchané směsi se nanese kapátkem jedna až dvě kapky vzorku

kapaliny na modrou plochu, přiklopí se skleněným krytem a kukátkem se na stupnici pohodlně odečte koncentrace kapaliny.

Tab. 1 Hlavní rozměry a technická data brusky BPH 20

Upínací plocha stolu	mm	200x630
Maximální rozměry brousicího kotouče:		
vnější	mm	250
vnitřní		76
šířka		20
Nejmenší průměr brousicího kotouče	mm	130
Podélný pohyb stolu	mm	690
Příčný pohyb stolu	mm	225
Svislý pohyb brusného vřetene	mm	350
Rychlost podélného posuvu stolu	m/min	1-18
Příčný posuv stolu v rozsahu	mm	0,5-6
Svislý přísuv do řezu: ruční na 1 d. stup. hydraulický	mm	0,01 0,01-0,05
Vřeteno	ot./min	2350/3.35 0
Motor pro pohon brusného vřetena:		
otáčky	ot./min	2800
výkon	kW	1,9
Motor pro svislý pohyb vřetena:		
otáčky	ot./min	2770
výkon	kW	0,7

## 5.2 Volba materiálu

Dalším kritériem je volba tří druhů materiálu. Z důvodu užití analýzy Barkhausenova šumu budou zvoleny oceli. Konstrukční uhlíková ocel 12 050 vhodná k zušlechťování a povrchovému kalení. Legovaná ocel 14 100 z důvodu hojného používání na katedrové experimenty a austenitická nástrojová ocel 19 733, která by měla být teoreticky z těchto tří nejtvrděší.

## 5.3 Použité brousicí kotouče

Z široké škály nástrojů se vyberou dva brousicí kotouče. Jeden klasický korundový  $Al_2O_3$  a druhý tzv. "SG", což je speciální korundový kotouč s mikrokrystalickou strukturou.

Kotouč 250x20x76 99BA 80L 8V je běžně užívaný brousicí kotouč, který má zrna brusiva z umělého bílého korundu s jemnou až střední zrnitostí a střední tvrdostí.

Druhým brousicím kotoučem bude zvolen tzv. "SG" kotouč s označením 250x20x76 99SA 360J 9V. Tento kotouč má mikrokrystalickou strukturu, která vykazuje vyšší tvrdost a lepší houževnatost. Vlivem struktury brousicích zrn má schopnost samoostření, což dovoluje

během broušení odkrývání nových ostrých hran. Nevýhodou může být větší vliv špatného orovnění na povrch kotouče a s tím související horší jakost povrchu broušeného vzorku [32].

#### 5.4 Statické vyvážení

Brousicí kotouče mohou být vyrobeny tak, že bude chyba v jejich otáčení, způsobená tím, že otvor v brousicím kotouči neleží v geometrickém středu kotouče. Také může výroba způsobit nerovnoběžné postraní plochy kotouče v řádech setin mm a tím nerovnoměrné rozložení hmoty kotouče. Tyto faktory mohou být důsledkem nevyváženosti kotouče a s tím související házení z důvodu nerovnováhy odstředivých sil.

Nevyvážený kotouč se vyrovná na dílenském vyvažovacím stojánku. Kotouč bude s přírubou nasazen na dva vodorovné břity a bude se otáčet tak dlouho, dokud se jeho těžiště nebude shodovat s jeho geometrickým středem (osou otáčení). Tato nehomogenita se vyrovná změnou poloh vyvažovacích tělísek vložených v drážce příruby, čímž se kotouč podaří staticky vyvážit.

#### 5.5 Orovňávání

Důležitým faktorem, který by mohl ovlivnit velikost a jakost broušeného povrchu je ostrost zrn brusiva. Brusná zrna v kotouči dobře ubírají materiál, pokud jsou ostrá a mají-li nezbytnou mezeru pro třísky. Tyto mezery se zmenšují důsledkem otupování brusných zrn a působením řezných podmínek. To způsobuje horší řezivost kotouče a místo toho, aby kotouč řezal, tak může ovlivnit povrch tak, že vypadá jako spálený. Proto přichází na řadu orovňávání. Orovňáváním se odstraní broušený materiál z povrchové vrstvy kotouče, obnoví se řezivost kotouče a upravuje jeho geometrický tvar. V případě tohoto experimentu bude k orovňávání zvolen jednoramenný diamantový orovnávač (obr. 8) za pomoci ručního posuvu.



Obr. 8 Jednokamenný diamantový orovnávač

Aby bylo docíleno co nejlepších výsledků, bude potřeba brusný kotouč správně a přesně orovnat. Při orovňávání s ručním posuvem, a to i přes nepatrnou hloubku záběru, se na povrchu kotouče může vytvořit nedokonalá obrobená vrstva, ovlivněná ručním posuvem orovnávače a současně otáčením brousicího kotouče. Proto je důležité, aby rychlost ručního posuvu byla co možno nejrovnoměrnější. Následkem různé



rychlosti příčného posuvu orovnávače by na povrchu kotouče nebyla vytvořena dostatečně kvalitní vrstva, která by mohla způsobit horší jakost broušeného povrchu. Dalším důvodem bude orovnění krajních ploch kotouče s cílem dosáhnout válcovitosti kotouče. Vzhledem k tomu, že se bude brousit zapichovacím způsobem a šířka kotouče bude větší než šířka broušených vzorků, bude vznikat na kotouči drážka, která je snadno viditelná v podobě černé stopy na kotouči. Tato stopa může sloužit i jako kontrola, že se povrchová vrstva dostatečně odebrala.

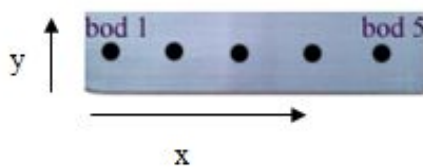
Orovnání se bude provádět nejdříve na hrubo. V tomto případě bude hloubka záběru zvolena tři setiny mm a několikrát se orovnávacím nástrojem obrobí šířka kotouče tam a zpět. Ve finální fázi se kotouč orovná na čisto. V tomto případě se hloubka záběru zvolí na hodnotu jedné setiny mm. Opět se šířka kotouče několikrát obrobí tam a zpět co nejrovnoměrnějším posuvem, aby orovnaný povrch byl co nejlepší.

## 5.6 Statistické vyhodnocení

Vzorky budou broušeny dvanácti různými podmínkami zahrnující tři druhy oceli, dvě hloubky záběru a dva typy broušících kotoučů. Každá kombinace těchto podmínek se bude opakovat pětkrát, což je dohromady 60 vzorků. Počet pěti opakování vychází z normy ČSN ISO 2602. Tato norma se zaměřuje na statistickou interpretaci výsledků zkoušek. Pro statistické vyhodnocení bude zvolena konfidenční úroveň 95%. Tato úroveň říká, že s pravděpodobností 95% se hodnoty měření každého dalšího opakování budou pohybovat v daném intervalu. Tento počet opakování je vhodný z toho důvodu, že číselná hodnota konfidenčního součinitele  $t_{0,975}$  je při pěti opakování, co se týče pracnosti a přesnosti výsledků, nejideálnější. Při vyšším počtu opakování je změna konfidenčního součinitele zanedbatelná s porovnáním vynaložené energie a s ohledem na to, že tato práce je bakalářská.

Jak lze vidět na obr. 9, tak při samotném měření se každý vzorek bude měřit na pěti místech, aby se získal celkový pohled na hodnotu  $m_p$  po celé broušené ploše. Každý vzorek je označen čísly 1 až 12. Každé číslo vyjadřuje podmínku, za jakých bude vzorek broušen. Například vzorek 1a, b, c, d, e bude z materiálu 19 733.4, broušen kotoučem  $Al_2O_3$  při hloubce záběru 0,01 mm. Další podmínky broušení pro vzorky 1 až 12 lze vyčíst z tab. 2. Z důvodu, že na získané hodnoty má také vliv lidský faktor, konkrétně například třes rukou nebo špatné dosednutí snímače na broušenou plochu, se měření na každém vzorku bude třikrát opakovat. Dále byla výzkumy zjištěna závislost  $m_p$  na orientaci snímače vůči dráze řezného nástroje, proto se hodnota měřila ve směru x a y (obr. 9). To nám dohromady dá patnáct hodnot  $m_p$  v každém směru od každého vzorku, pro každou podmínku, ze kterých

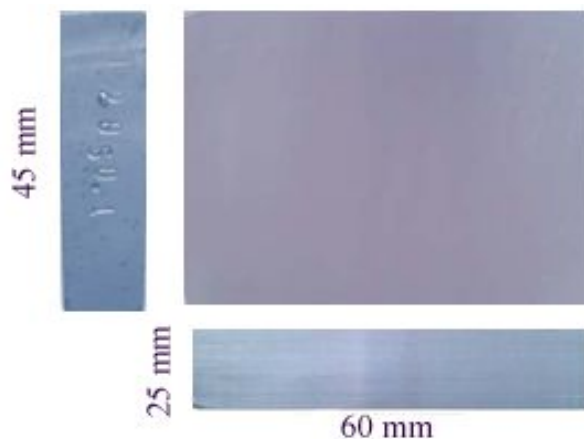
získáme průměrnou hodnotu  $m_p$  pro daný vzorek. Pomocí těchto průměrných hodnot získáme celkovou průměrnou hodnotu  $m_p$  s konfidenčními intervaly pro danou podmínku pro oba směry (tab. 3-14). S těmito celkovými průměrnými hodnotami se bude dále graficky pracovat (obr. 32–39).



*Obr. 9 Rozmístění měřených bodů*

Tab. 2 Podmínky broušení

Stroj	rovinná bruska BPH 20					
Způsob broušení	zapichovací					
Tvar vzorku	□					
Šířka kotouče [mm]	20					
Průměr kotouče [mm]	250					
Procesní kapalina	Paramo SK 220					
Posuv $v_f$ [m/min]	10					
Řezná rychlost $v_c$ [m/s]	30,7					
Otáčky stroje [ot./min.]	2350					
Počet opakování	5					
<b>č. vzorku</b>	<b>1a,b,c,d,e</b>	<b>2a,b,c,d,e</b>	<b>3a,b,c,d,e</b>	<b>4a,b,c,d,e</b>	<b>5a,b,c,d,e</b>	<b>6a,b,c,d,e</b>
Materiál	19 733.4	14 100.4	12 050.1	19 733.4	14 100.4	12 050.1
Typ nástroje	99BA 80L 8V (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )					
Hloubka záběru $a_p$ [mm]	0,01			0,03		
<b>č. vzorku</b>	<b>7a,b,c,d,e</b>	<b>8a,b,c,d,e</b>	<b>9a,b,c,d,e</b>	<b>10a,b,c,d,e</b>	<b>11a,b,c,d,e</b>	<b>12a,b,c,d,e</b>
Materiál	19 733.4	14 100.4	12 050.1	19 733.4	14 100.4	12 050.1
Typ nástroje	“SG“ 99SA 360J 9V					
Hloubka záběru $a_p$ [mm]	0,01			0,03		



Obr. 10 Tvar broušených vzorků

## 6. Realizace experimentů

Broušení bylo realizováno zapichovacím způsobem. Tento způsob byl prováděn tak, že se kotoučem přiblížilo na dotek k povrchu součásti, poodjelo se mimo dosah kotouče, nastavila se hloubka záběru, což v tomto případě byla hloubka 0,01 mm a 0,03 mm, a následně za stálého přítoku procesní kapaliny probíhal plynulý posuv pouze v podélném směru, až do doby než došlo k vyjiskření.

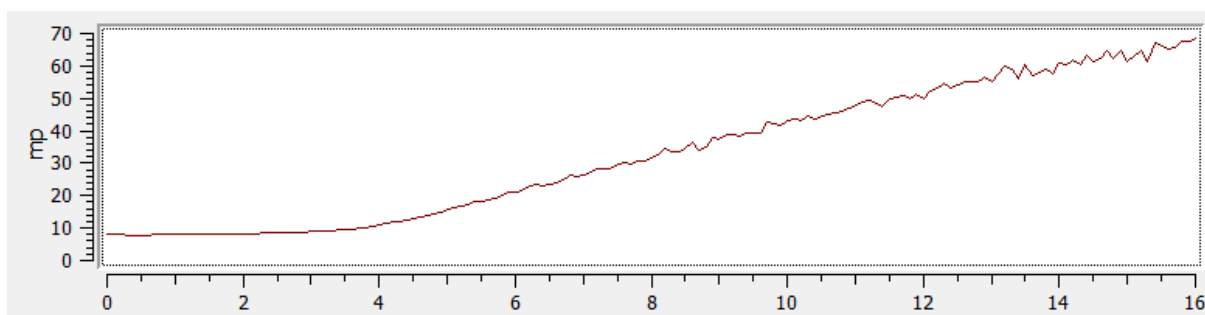
Broušené vzorky byly upnuty na magnetickou desku brusky BPH 20. Jak už bylo vysvětleno, tak feromagnetické látky se v magnetickém poli zmagnetizují a dochází k ovlivnění výsledků Barkhausenova šumu. Z tohoto důvodu bylo zapotřebí vzorky těsně před měřením odmagnetizovat.

Bylo uvedeno, že pro každý materiál je nutno před začátkem měření určit magnetizační napětí a magnetizační frekvenci. Přeběhy magnetizace byly naměřeny pro každý typ materiálu zvlášť, protože každý materiál má jinou metalurgickou strukturu a různě rozložené napětí, což jsou faktory ovlivňující hodnotu těchto parametrů.

### 6.1 Ocel 19 733.4

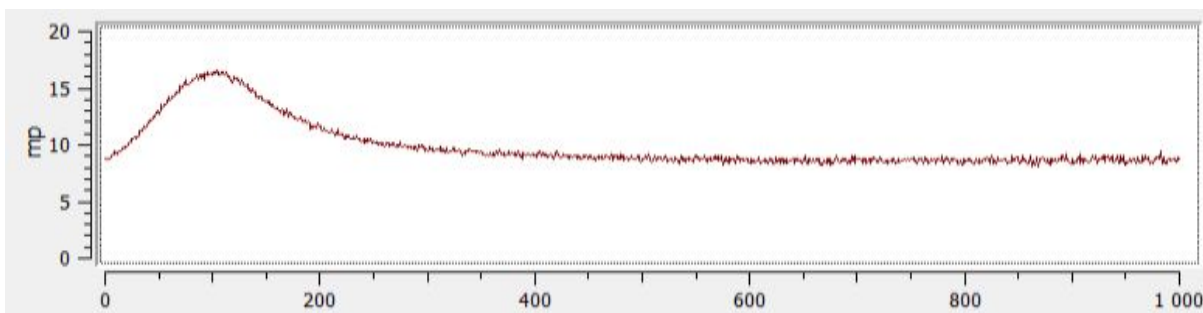
#### 6.1.1 Určení hodnot magnetizačního napětí a magnetizační frekvence

Nejvhodnější magnetizační napětí pro ocel 19 733.4 lze určit z obr. 11. Vodorovná osa vyjadřuje hodnoty napětí. Na svislé ose jsou hodnoty pro magnetoelastický parametr (mp) závislé na zvyšujícím se napětí. Je nutné podotknout, že hodnoty z grafu nebyly přesně určující. Na tomto grafu lze vidět, že vzorek začínal reagovat při hodnotě přibližně 5 V, ale při testování tohoto napětí byly měřené hodnoty nevyhovující z důvodu malé difference mezi minimálním a maximálním mp. Proto se metodou odhadem zvyšovalo magnetizační napětí do doby, než byl tento rozdíl pro určení hodnot dostatečný (obr. 13). V tomto případě se nejvhodnější magnetizační napětí jevílo při hodnotě 6 V.



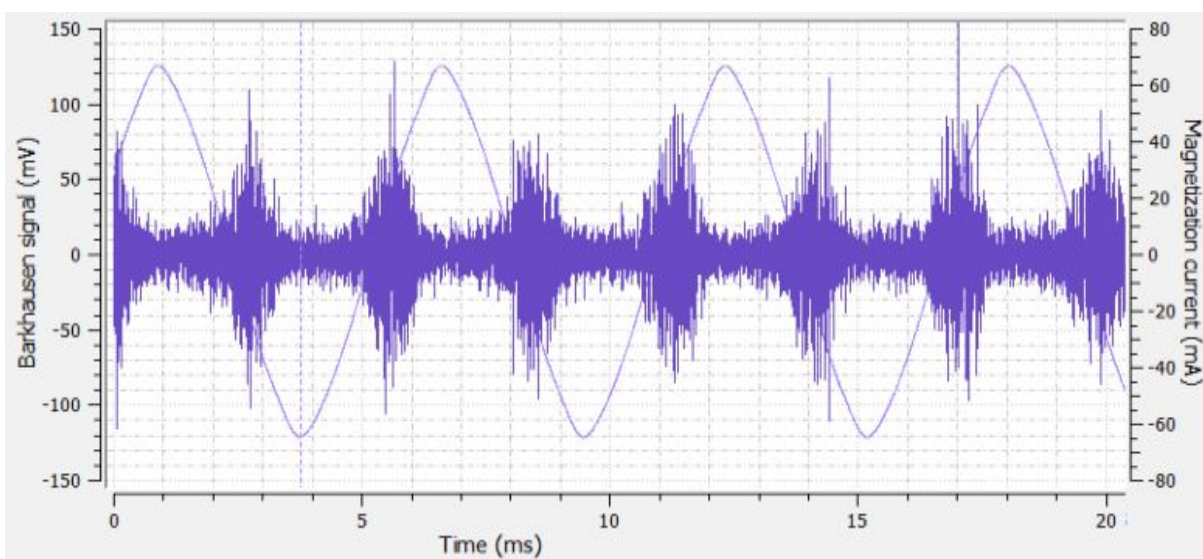
Obr. 11 Graf přeběhu magnetizačního napětí pro ocel 19 733.4

Druhým důležitým úkolem bylo určit magnetizační frekvenci pro ocel 19 733.4. Na vodorovné ose je magnetizační frekvence od 0 Hz do 1000 Hz. Svislá osa znázorňuje závislost mp na velikosti magnetizační frekvence. V tomto případě byla určující ta část křivky, která vykazovala největší reakci vzorku (obr. 12). Ve většině případů technické praxe se setkáme s hodnotou 125 Hz, ale pro náš materiál byla zvolena hodnota 175 Hz.



*Obr. 12 Graf přeběhu magnetizační frekvence pro ocel 19 733.4*

Na obr. 13 můžeme vidět graf, který vysvětluje, proč se zvolené hodnoty magnetizačního napětí a magnetizační frekvence lišily od hodnot získaných z grafu. Tento graf pomáhá ke správnému určení nejvhodnějšího magnetizačního napětí a magnetizační frekvence, které se nastavovaly podle přeběhů měřených ve ViewScanu. Při použití magnetizačního napětí 5 V a magnetizační frekvence 125 Hz, jak nám napovídaly předešlé grafy, by vrcholky získaného signálu byly příliš nízké, což by způsobilo nepřesně naměřené hodnoty. Z toho důvodu došlo ke zvýšení mag. napětí na 6 V a mag. frekvence na 175 Hz. Při těchto podmínkách byly vrcholky signálu v dostatečné vzdálenosti od jejich minimální hodnoty.



*Obr. 13 Graf pro měření jednoho bodu v programu MicroScan pro ocel 19 733.4*

### 6.1.2 Naměřené hodnoty magnetoelastického parametru

Tabulky (3 – 14) ukazují jak průměrné hodnoty magnetoelastického parametru daných vzorků na broušených vrstvách ve směrech x a y, tak celkové průměrné hodnoty magnetoelastického parametru pro danou podmínku (např. ocel 19 733.4, hloubka záběru 0,01 mm, kotouč "Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>"). Broušící podmínky pro každou skupinu vzorků (1-12) jsou v tab. 2. Celková průměrná podmínka se vypočítávala pomocí konfidenčního intervalu, vysvětleno v kapitole 5.6. Jednotlivé hodnoty mp naměřené na daných vzorcích (1–12), ze kterých se vypočítávaly průměrné hodnoty v daných směrech a které jsou zobrazeny v grafech, jsou přiloženy v přílohách 1-3. Zvýrazněné vodorovné čáry představují celkové průměrné hodnoty broušících podmínek pro hloubky záběru 0,01 mm (modrá čára) a 0,03 mm (červená čára).

Tab. 3 Podmínky broušení: ocel 19 733.4, hloubka záběru 0,01 mm, kotouč "Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>"

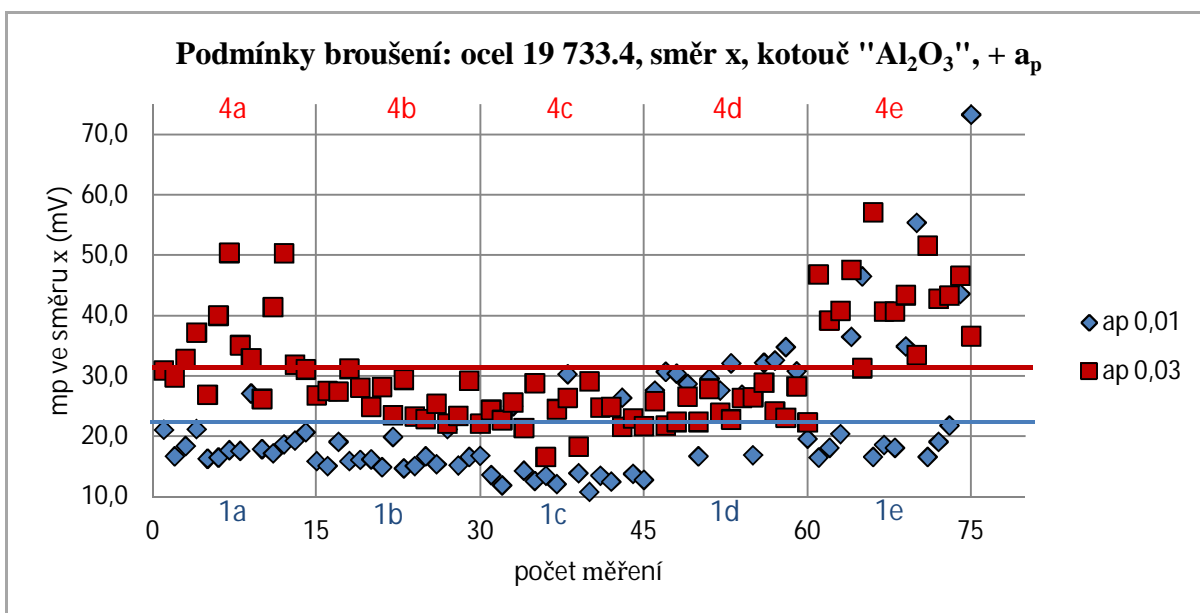
Vzorek	1a	1b	1c	1d	1e	Celková průměrná hodnota mp pro danou podmínku (mV)
Průměrná hodnota mp ve směru x (mV)	18,8	16,6	15,8	27,8	30,4	21,9 ± 9,4
Průměrná hodnota mp ve směru y (mV)	17,8	16,3	14,0	14,3	44,5	21,4 ± 18

Tab. 4 Podmínky broušení: ocel 19 733.4, hloubka záběru 0,03 mm, kotouč "Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>"

Vzorek	4a	4b	4c	4d	4e	Celková průměrná hodnota mp pro danou podmínku (mV)
Průměrná hodnota mp ve směru x (mV)	34,9	25,9	23,6	24,9	42,8	30,4 ± 11,4
Průměrná hodnota mp ve směru y (mV)	24,9	14,5	11,9	13,2	20,2	16,9 ± 7,6

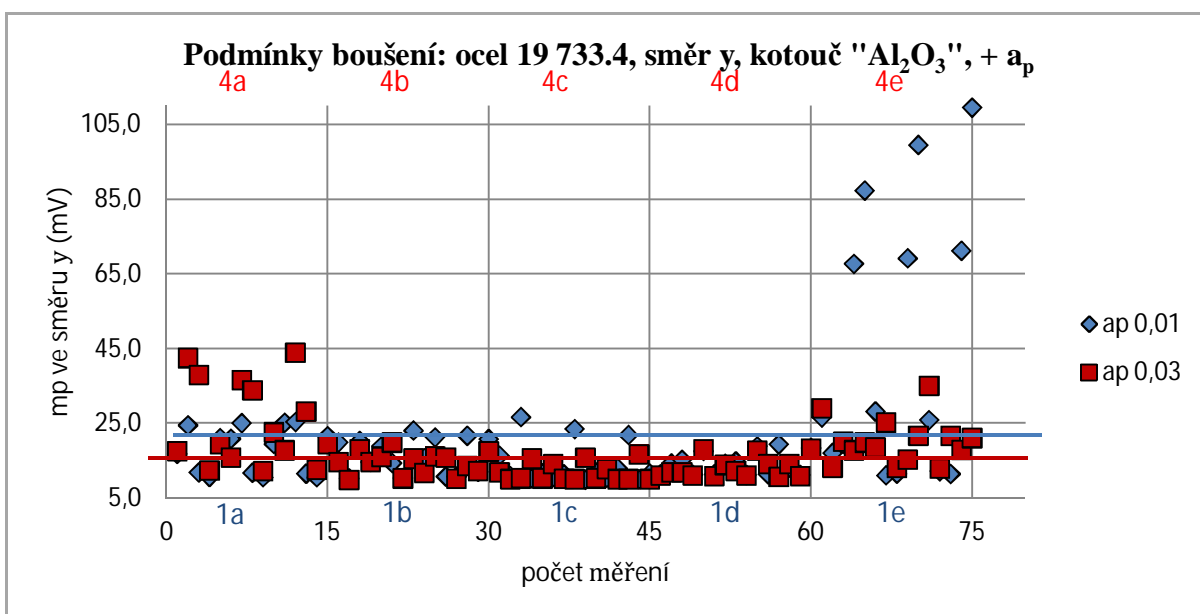
Na obr. 14 je na první pohled zřetelné, že vzorky 4a a 4e byly odlišné od ostatních tří, protože hodnoty mp těchto vzorků byly o řád vyšší, než je celková průměrná hodnota dané podmínky (ocel 19 733.4, a<sub>p</sub> 0,03 mm, kotouč Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), která je vyznačena červenou vodorovnou čarou. Průměrná hodnota vzorků 4a a 4e byla 38,9 mV a byla větší o více jak 56%, než střední hodnota prostředních tří vzorků, která činila 24,8 mV (tab. 4). Změřením tvrdosti vzorku 4e (příloha 5) se prokázalo, že tento vzorek měl menší tvrdost než vzorek 4d. Na základě těchto výsledků, lze pravděpodobně usuzovat, že menší tvrdost vzorku 4e měla vliv na velkou odlišnost hodnot mp. U skupiny vzorků broušených při hloubce záběru 0,01 mm (vyznačeny

modře) byly hodnoty  $m_p$  v poměrně úzkém rozmezí. Výjimku tvoří vzorek 1e, kde byla část naměřených hodnot mimo téměř o 70%. Také u tohoto vzorku se provedla zkouška tvrdosti dle Vickerse, která byla menší než u ostatních vzorků této oceli (příloha 5).



Obr. 14 Magnetoelastický parametr při broušení kotoučem Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve směru x

Stejně jako u obr. 14 ve směru x, tak i ve směru y (obr. 15) byly některé hodnoty  $m_p$  pro vzorky 4a a 4e výrazně mimo celkovou průměrnou hodnotu pro danou podmínku, pravděpodobně opět vlivem menší tvrdosti, která byla změřena. Vzorky broušené při  $a_p$  0,01 mm vykazovaly hodnoty  $m_p$  ve větším rozmezí, než tomu je ve směru x (obr. 14). Velké anomálie vykazoval opět vzorek 1e, kde se zkouškou tvrdosti prokázala výrazně menší tvrdost. Vysoké hodnoty tohoto vzorku způsobily vyšší celkovou průměrnou hodnotu  $m_p$ .



Obr. 15 Magnetoelastický parametr při broušení kotoučem Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve směru y

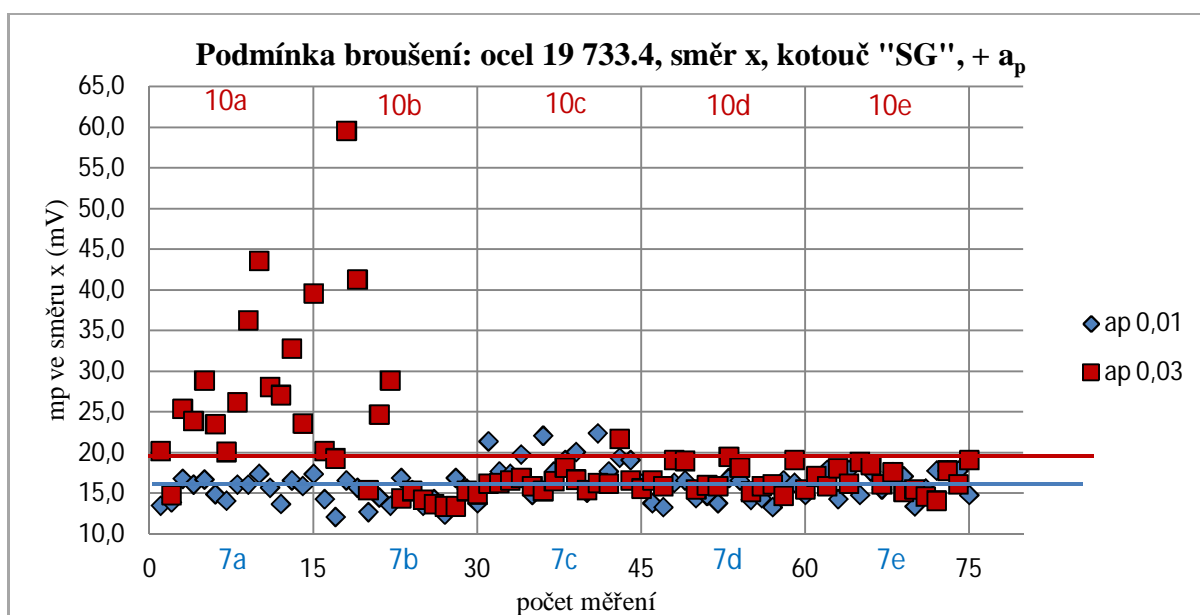
Tab. 5 Podmínky broušení: ocel 19 733.4, hloubka záběru 0,01 mm, kotouč "SG"

Vzorek	7a	7b	7c	7d	7e	Celková průměrná hodnota mp pro danou podmínku (mV)
Průměrná hodnota mp ve směru x (mV)	15,7	14,5	18,7	15,1	16,5	$16,1 \pm 2,3$
Průměrná hodnota mp ve směru y (mV)	15,0	12,7	14,5	14,6	15,4	$14,4 \pm 1,4$

Tab. 6 Podmínky broušení: ocel 19 733.4, hloubka záběru 0,03 mm, kotouč "SG"

Vzorek	10a	10b	10c	10d	10e	Celková průměrná hodnota mp pro danou podmínku (mV)
Průměrná hodnota mp ve směru x (mV)	27,6	21,6	16,7	16,8	16,7	$19,9 \pm 6,7$
Průměrná hodnota mp ve směru y (mV)	21,3	11,1	14,4	16,0	15,4	$15,6 \pm 5,1$

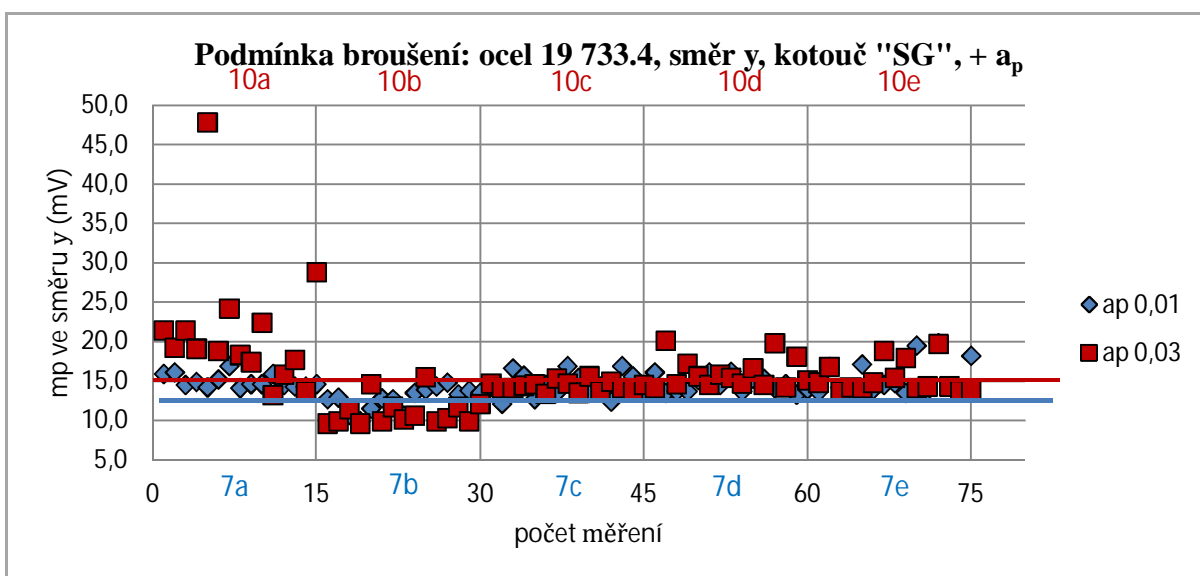
Na obr. 16 je patrné, že vzorek 10a a část vzorku 10b vybočovaly mimo celkovou průměrnou hodnotu dané podmínky, která je vyznačena červenou vodorovnou čarou. Tyto vzorky byly broušeny při  $a_p$  0,03 mm. U vzorku 10a a 10b byla provedena zkouška tvrdosti. Vzorek 10a vykazoval menší tvrdost než vzorek 10b (příloha 5). Je pravděpodobné, že menší tvrdost vzorku 10a byla jednou z příčin vyšších hodnot mp. Vzorek 10b naopak vykazoval větší tvrdost, přesto některé hodnoty byly vysoko nad normálem.



Obr. 16 Magnetoelastický parametr při broušení kotoučem "SG" ve směru x



Velikost  $m_p$  ve směru  $y$  byla u hloubky záběru 0,03 mm větší než u 0,01 mm. Přesto zde byly hodnoty  $m_p$  výrazně se lišící od celkové průměrné hodnoty, opět především u vzorku 10a, kde hodnota 47,8 mV byla zřejmě následkem strukturní anomálie nebo chybou při broušení. U vzorku 10b bylo zajímavé, že vyšší hodnoty  $m_p$  ve směru  $x$  se neprojeví na hodnotách  $m_p$  ve směru  $y$ . Kromě vzorku 10a se hodnoty  $m_p$  všech vzorků opět pohybovaly v úzkém rozmezí. To ukazuje na poměrně dobré měření. Oproti hodnotám  $m_p$  ve směru  $x$  (obr. 16) byl rozdíl v celkové průměrné hodnotě dané podmínky velmi malý, stejně jako tomu bylo na obr. 15.

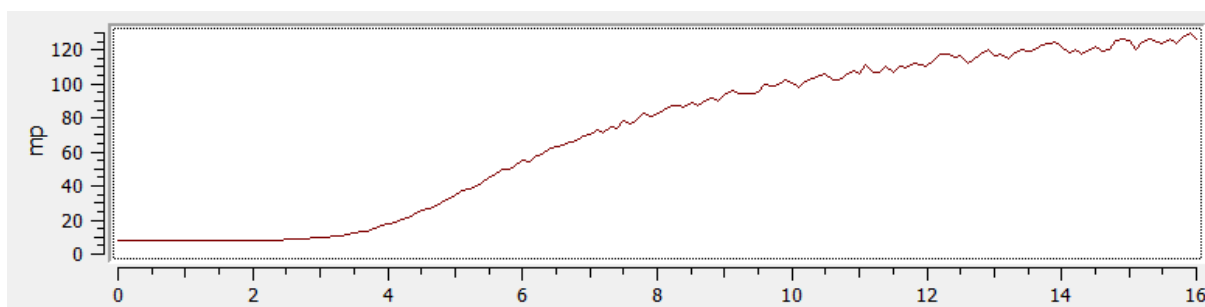


Obr. 17 Magnetoelastický parametr při broušení kotoučem "SG" ve směru  $y$

## 6.2 Ocel 14 100.4

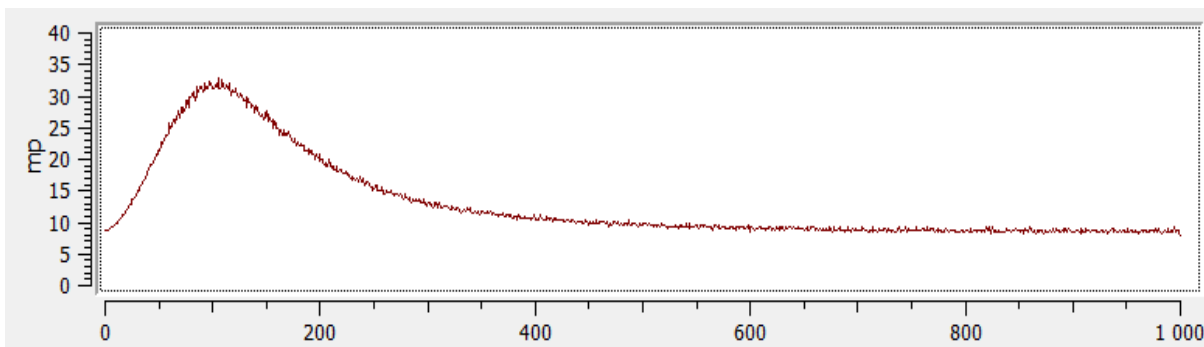
### 6.2.1 Určení hodnot magnetizačního napětí a magnetizační frekvence

Oproti nástrojové oceli 19 733.4 legovaná ocel 14 100.4 reagovala při hodnotě okolo 4 V (obr. 18). Pro naše následné měření bylo magnetizační napětí nastaveno na hodnotu 5 V. Hodnota napětí byla upravena ze stejných důvodů jako u materiálu 19 733.4, aby difference mezi minimem a maximem získaného signálu byla co největší a současně sinusoida co nejméně ostrá (obr. 20).



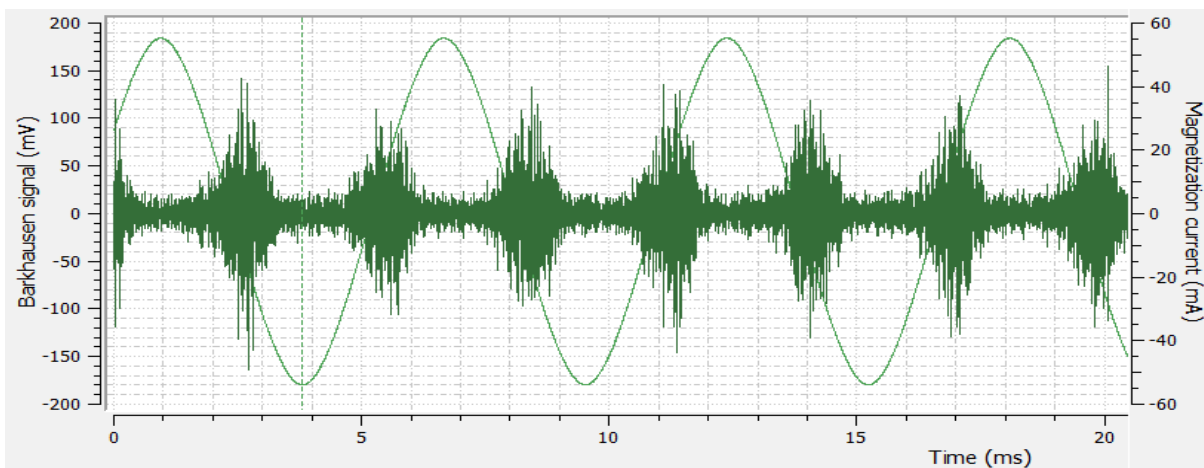
Obr. 18 Graf přeběhu magnetizačního napětí pro ocel 14 100.4

Magnetizační frekvence zůstala oproti magnetizačnímu napětí nezměněna (obr. 19). Stejně jako u nástrojové oceli byla pro ocel třídy 14 zvolena velikost frekvence 175 Hz.



Obr. 19 Graf přeběhu magnetizační frekvence pro ocel 14 100.4

Na tomto grafu (obr. 20) je opět zřejmé, že nastavené hodnoty (5 V a 175 Hz) byly dobrou volbou pro měření Barkhausenova šumu, z důvodu dostatečné difference mezi vrcholem a minimem získaného signálu.



Obr. 20 Graf pro měření jednoho bodu v programu MicroScan pro ocel 14 100.4

## 6.2.2 Naměřené hodnoty magnetoelastického parametru

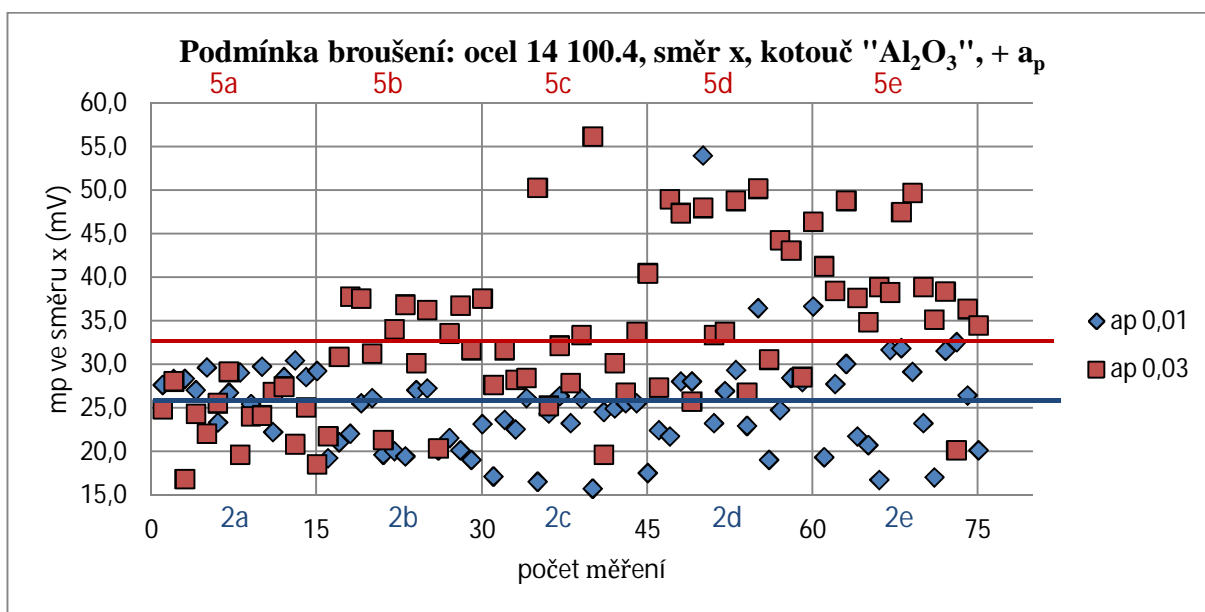
Tab. 7 Podmínky broušení: ocel 14 100.4, hloubka záběru 0,01 mm, kotouč "Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>"

Vzorek	2a	2b	2c	2d	2e	Celková průměrná hodnota mp pro danou podmínku (mV)
Průměrná hodnota mp ve směru x (mV)	27,7	22,2	22,7	28,7	25,4	25,3 ± 4
Průměrná hodnota mp ve směru y (mV)	18,5	18,3	12,8	13,7	18,9	16,4 ± 4

Tab. 8 Podmínky broušení: ocel 14 100.4, hloubka záběru 0,03 mm, kotouč "Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>"

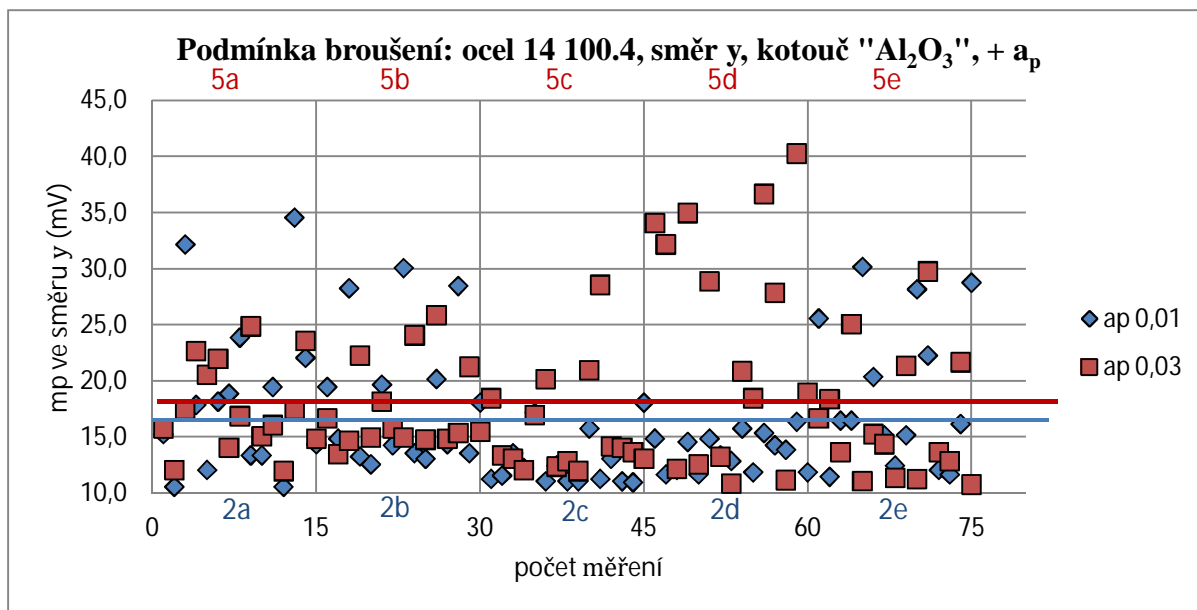
Vzorek	5a	5b	5c	5d	5e	Celková průměrná hodnota mp pro danou podmínku (mV)
Průměrná hodnota mp ve směru x (mV)	23,9	31,9	32,8	38,9	38,6	33,2 ± 8,5
Průměrná hodnota mp ve směru y (mV)	17,7	17,5	15,8	23,6	16,5	18,2 ± 4,3

Hodnoty mp u vzorků broušených  $a_p$  0,01 mm byly poměrně stálé, až na hodnotu 54 mV u vzorku 2d, která se výrazně vymykala celkové průměrné hodnotě dané podmínky (obr. 21). U skupiny vzorků broušených  $a_p$  0,03 mm byly rozdíly větší. V této skupině nešlo přesně určit, jaké vzorky byly či nebyly nějakým způsobem ovlivněné, ať už to bylo při samotném broušení nebo třeba vlivem nehomogenity daného materiálu. Na žádném ze zkoumaných vzorků nebyla provedena zkouška tvrdosti dle Vickerse.



Obr. 21 Magnetoelastický parametr při broušení kotoučem Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve směru x

Ve směru y (obr. 22) byl jednoznačně nejvíce vybočující z průměru vzorek 5d. Od celkové průměrné hodnoty pro danou podmínku se lišila jeho průměrná hodnota mp (tab. 8) téměř o 30%. Ostatní vzorky maximálně o 15%. S ohlednutím i na výsledky ve směru x lze odhadnout, že u vzorků 5d a 5e mohly být změny v tvrdosti, nehomogenitě materiálu nebo chyby v procesu broušení, což by musela potvrdit další zkoumání.



Obr. 22 Magnetoelastický parametr při broušení kotoučem Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve směru y

Tab. 9 Podmínky broušení: ocel 14 100.4, hloubka záběru 0,01 mm, kotouč "SG"

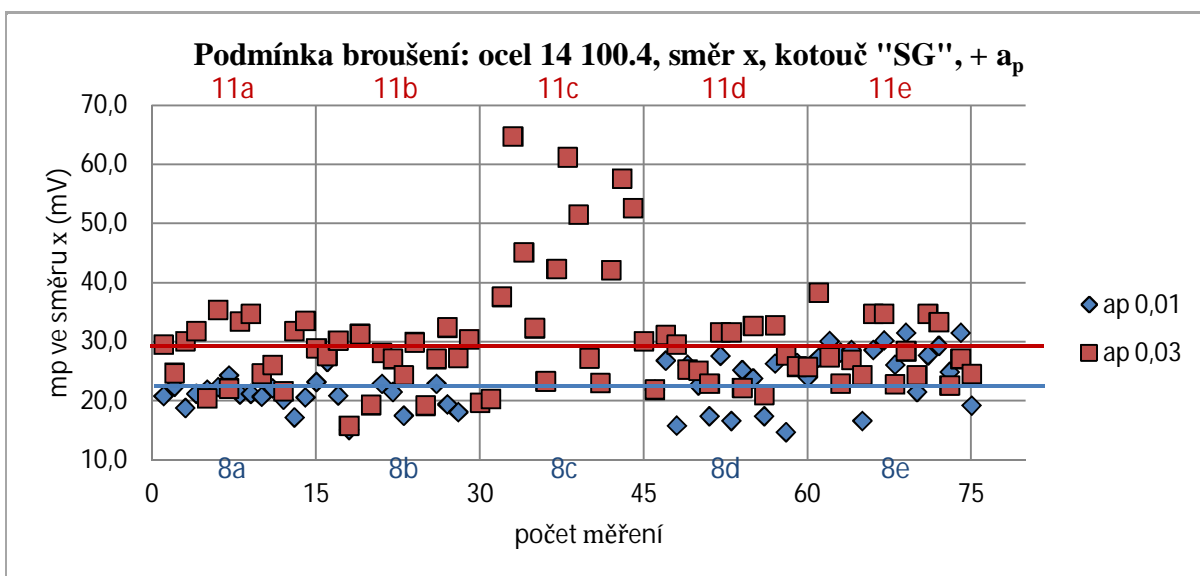
Vzorek	8a	8b	8c	8d	8e	Celková průměrná hodnota mp pro danou podmínku (mV)
Průměrná hodnota mp ve směru x (mV)	21,2	20,5	-	22,2	26,8	22,7 ± 5,2
Průměrná hodnota mp ve směru y (mV)	18,5	15,2	-	14,3	14,1	15,5 ± 3,7

Tab. 10 Podmínky broušení: ocel 14 100.4, hloubka záběru 0,03 mm, kotouč "SG"

Vzorek	11a	11b	11c	11d	11e	Celková průměrná hodnota mp pro danou podmínku (mV)
Průměrná hodnota mp ve směru x (mV)	28,6	26,0	40,7	27,1	28,5	30,2 ± 8,3
Průměrná hodnota mp ve směru y (mV)	15,1	12,3	18,4	16,0	18,0	16,0 ± 3,4

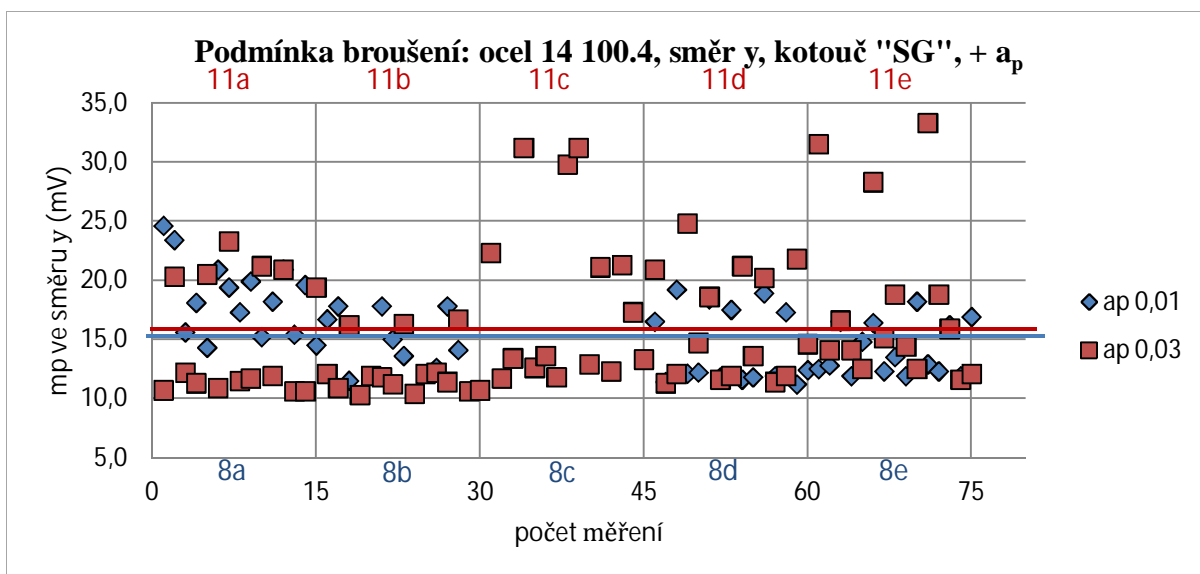
V případě měření této skupiny vzorků (obr. 23) se hodnoty mp ve směru x pohybovaly přibližně u a<sub>p</sub> 0,01 mm v rozmezí 15 mV až 25 mV a u a<sub>p</sub> 0,03 mm mezi 20 mV a 35 mV. Vzorek 8c vykazoval několikanásobně vyšší hodnoty mp v řádech stovek mV, což lze přisoudit nějaké extrémní strukturální chybě daného vzorku, což bylo důvod pro jeho vyřazení a nezahrnutí do celkové průměrné hodnoty. U vzorku 8b došlo k podobnému výkyvu několika

hodnot. U vzorku 8b bylo zkouškou tvrdosti zjištěno (příloha 5), že krajní oblast vzorku vykazovala téměř dvakrát menší hodnoty tvrdosti než druhá krajní oblast vzorku a z tohoto důvodu nebyly hodnoty  $m_p$  zahrnuty do celkové průměrné hodnoty (tab. 9). Z toho lze usuzovat, že jedním z důsledků mnohem větších hodnot  $m_p$  je pravděpodobně menší tvrdost. Průměrná hodnota  $m_p$  vzorku 11c se lišila od celkové průměrné hodnoty dané podmínky o necelých 35% (tab. 10). Byl to jediný vzorek takto vybočující. Měřením tvrdosti se ukázalo, že hodnota tvrdosti nebyla o moc nižší než u ostatních vzorků. Například vzorek 11d vykazoval vyšší hodnoty tvrdosti (příloha 5), se kterou mohly souviset i menší hodnoty  $m_p$ .



Obr. 23 Magnetoelastický parametr při broušení kotoučem "SG" ve směru x

V případě směru y se hodnoty  $m_p$  oproti směru x lišily více. Kolísání některých hodnot na broušené vrstvě bylo značné, především u vzorků 11c a 11e, ale i u ostatních hodnot, především při  $a_p$  0,03 mm.

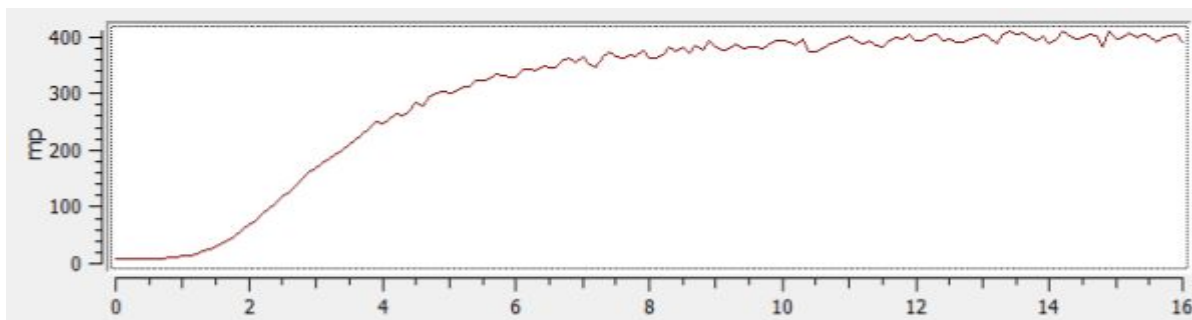


Obr. 24 Magnetoelastický parametr při broušení kotoučem "SG" ve směru y

## 6.3 Ocel 12 050.1

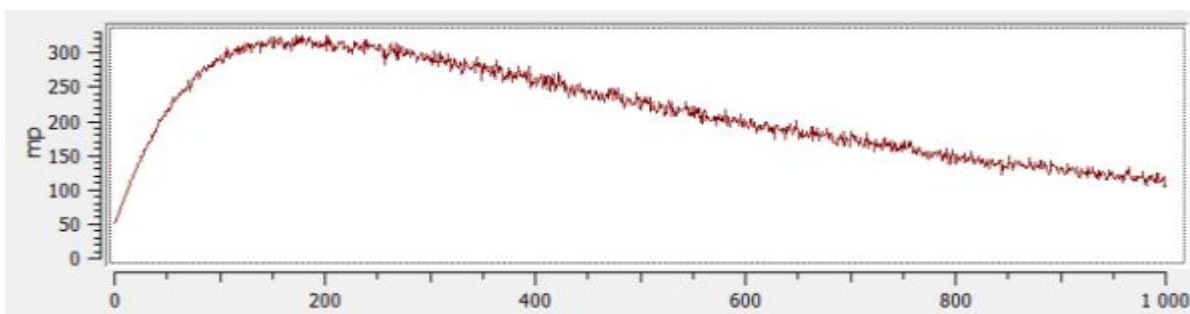
### 6.3.1 Určení hodnot magnetizačního napětí a magnetizační frekvence

Ocel 12 050.1 by měla mít ze všech tří druhů ocelí nejmenší tvrdost. Tento parametr se projevil také na velikosti magnetizačního napětí. Z obr. 25 lze pozorovat, že materiál reagoval už při hodnotě 2 V. Oproti předešlým materiálům se tato hodnota ukázala jako nejvhodnější a nebylo ji třeba měnit.



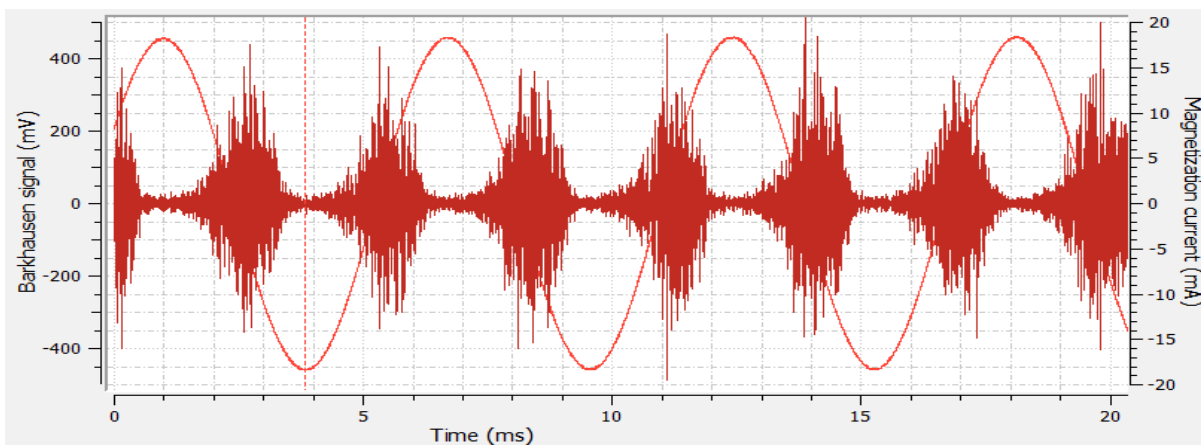
Obr. 25 Graf přeběhu magnetizačního napětí pro ocel 12 050.1

U velikosti magnetizační frekvence se opět nic nezměnilo a hodnota byla nastavena na 175 Hz (obr. 26).



Obr. 26 Graf přeběhu magnetizační frekvence pro ocel 12 050.1

Výsledný signál z oceli 12 050.1 byl ze všech tří materiálů nejbližší ideálu. Sinusoida nebyla přesprávně ostrá a rozdíl mezi maximem a minimem získaného signálu byl také výborný (obr. 27).



Obr. 27 Graf pro měření jednoho bodu v programu MicroScan pro ocel 12 050.1

### 6.3.2 Naměřené hodnoty magnetoelastického parametru

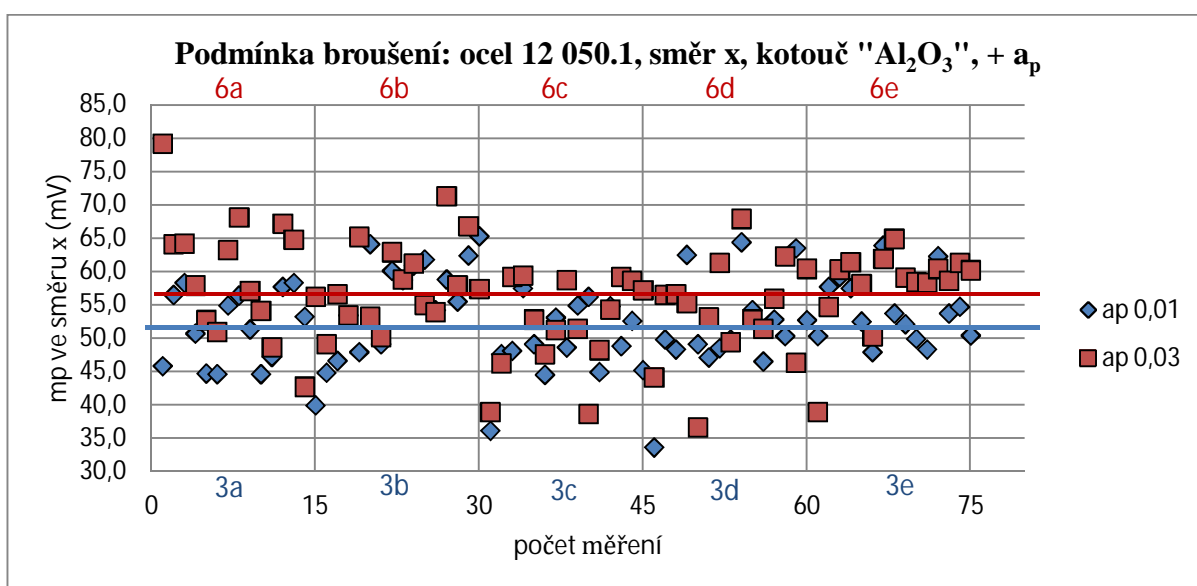
Tab. 11 Podmínka broušení: ocel 12 050.1, hloubka záběru 0,01 mm, kotouč "Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>"

Vzorek	3a	3b	3c	3d	3e	Celková průměrná hodnota mp pro danou podmínku (mV)
Průměrná hodnota mp ve směru x (mV)	50,9	56,2	49,5	51,5	54,3	52,5 ± 3,8
Průměrná hodnota mp ve směru y (mV)	46,9	46,4	47,6	49,4	45,5	47,2 ± 2

Tab. 12 Podmínka broušení: ocel 12 050.1, hloubka záběru 0,03 mm, kotouč "Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>"

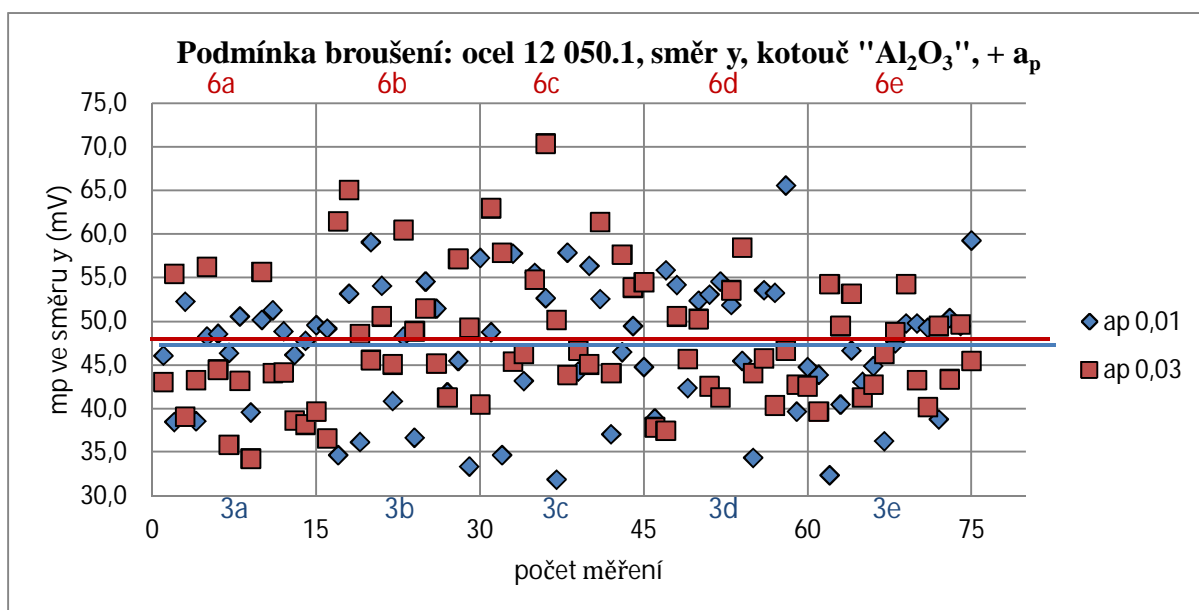
Vzorek	6a	6b	6c	6d	6e	Celková průměrná hodnota mp pro danou podmínku (mV)
Průměrná hodnota mp ve směru x (mV)	59,4	58,2	52,1	54,0	57,8	56,3 ± 4,3
Průměrná hodnota mp ve směru y (mV)	43,7	49,8	53,0	45,4	46,8	47,7 ± 5,1

V případě oceli 12 050.1 žádný z měřených vzorků výrazně nevybočoval hodnotami od celkové průměrné hodnoty dané podmínky (obr. 28). Střední hodnota u hloubky záběru 0,01 mm byla o něco málo menší než u  $a_p$  0,03 mm. Rozdíly nebyly příliš výrazné a je možno, že rozdíl 0,02 mm na tuto ocel neměl zásadní dopad na celkovou hodnotu mp.



Obr. 28 Magnetoelastický parametr při broušení kotoučem Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve směru x

To samé, co platilo u obr. 24, lze říci i o následujícím grafu (obr. 29). Vyšší hodnota mp byla u hloubky záběru 0,03 mm. Ani hodnoty mp ve směru y se nijak výrazně v hloubce záběru nelišily. Opět byl viditelný velký rozsah hodnot mp.



Obr. 29 Magnetoelastický parametr při broušení kotoučem Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve směru y

Tab. 13 Podmínka broušení: ocel 12 050.1, hloubka záběru 0,01 mm, kotouč "SG"

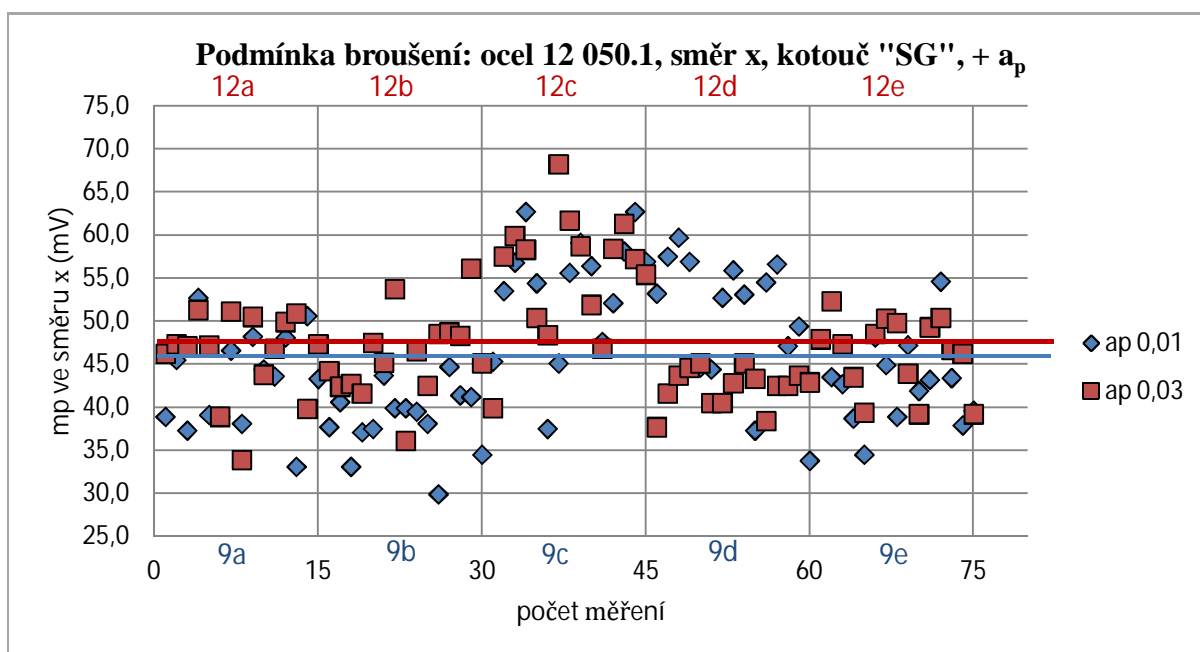
Vzorek	9a	9b	9c	9d	9e	Celková průměrná hodnota mp pro danou podmínku (mV)
Průměrná hodnota mp ve směru x (mV)	43,2	38,6	53,6	50,4	43,1	45,8 ± 8,4
Průměrná hodnota mp ve směru y (mV)	34,0	31,6	25,5	35,9	35,7	32,5 ± 6

Tab. 14 Podmínka broušení: ocel 12 050.1, hloubka záběru 0,03 mm, kotouč "SG"

Vzorek	12a	12b	12c	12d	12e	Celková průměrná hodnota mp pro danou podmínku (mV)
Průměrná hodnota mp ve směru x (mV)	46,1	45,9	55,6	42,3	46,3	47,3 ± 6,9
Průměrná hodnota mp ve směru y (mV)	45,8	47,9	47,0	53,0	54,6	49,7 ± 5,4



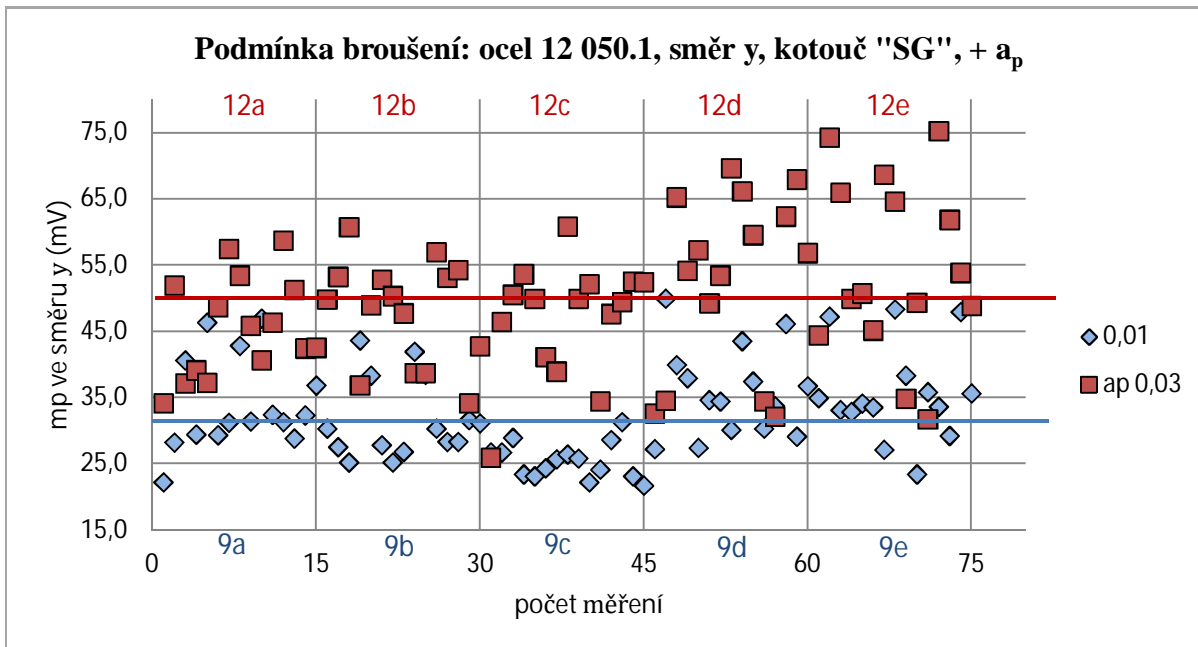
Na obr. 30 lze vidět, že vzorek 9c a částečně vzorek 9d se vymykaly ostatním třem vzorkům. Při vypočítání průměrné hodnoty vzorků 9c a 9d se došlo k hodnotě 52 mV a při přepočítání ostatních tří vzorků, tedy 9a, 9b a 9e, jsme dostali průměrnou hodnotu 41,6 mV. Byl to tedy nárůst přesně o 20%. Rozdíl průměrné hodnoty vzorků 9c a 9d, oproti celkové průměrné hodnotě (vyznačena modře), která činila 45,8 mV (tab. 13), byl 12%. Vidíme tedy, že vzorky 9c a 9d částečně ovlivnily celkovou průměrnou hodnotu dané podmínky. Například tvrdost vzorku 9c dosahovala hodnot pod 180 HV 2. Tato hodnota byla nižší, než tvrdost vzorků 9a i 9b (příloha 5), což mohla být příčina vyšších hodnot vzorku 9c. Podobně tomu bylo u vzorku 12c, který jediný vykazoval hodnoty vyšší než 55 mV, což bylo o 15% vyšší než celková průměrná hodnota dané podmínky (vyznačena červeně). Změřením a porovnáním hodnot tvrdosti vzorků 12b, 12c a 12d, lze usoudit částečnou závislost hodnot mp na tvrdosti. Vzorek 12c vykazoval nejvyšší hodnoty mp a současně nejmenší tvrdost.



Obr. 30 Magnetoelastický parametr při broušení kotoučem "SG" ve směru x

U vzorků broušených hloubkou záběru 0,01 mm bylo patrné relativně rovnoměrné rozložení hodnot mezi 25 mV a 35 mV oproti vzorkům, které byly broušeny hloubkou záběru 0,03 mm (obr. 31). Dosud byly hodnoty mp ve směru x vždy vyšší než ve směru y, ale u skupiny vzorků (skupina 12) vyšla celková průměrná hodnota mp ve směru y vyšší, než hodnota mp ve směru x, což můžeme přikládat faktu, že vzorky 12d a 12e vykazovaly o něco vyšší hodnoty mp a to mohlo ovlivnit celkovou průměrnou hodnotu této skupiny. U tohoto grafu lze vidět, že broušení kotoučem "SG", hloubkou záběru 0,03 mm, mělo na celkovou průměrnou hodnotu magnetoelastického parametru, při daných podmínkách ve směru y,

značný vliv. Oproti broušení hloubkou záběru 0,01 mm byla hodnota mp u hloubky záběru 0,03 mm větší o 35% (tab. 13, 14). Je zajímavé, že menší tvrdost vzorků 12c nebo 9c (příloha 5), neměla výrazný vliv na hodnoty mp ve směru y, tedy ve směru kolmém k posuvu. Tato skutečnost se ukázala také u vzorku 10a a 10b (obr. 17).



Obr. 31 Magnetoelastický parametr při broušení kotoučem "SG" ve směru y

## 7. Shrnutí a zhodnocení výsledků

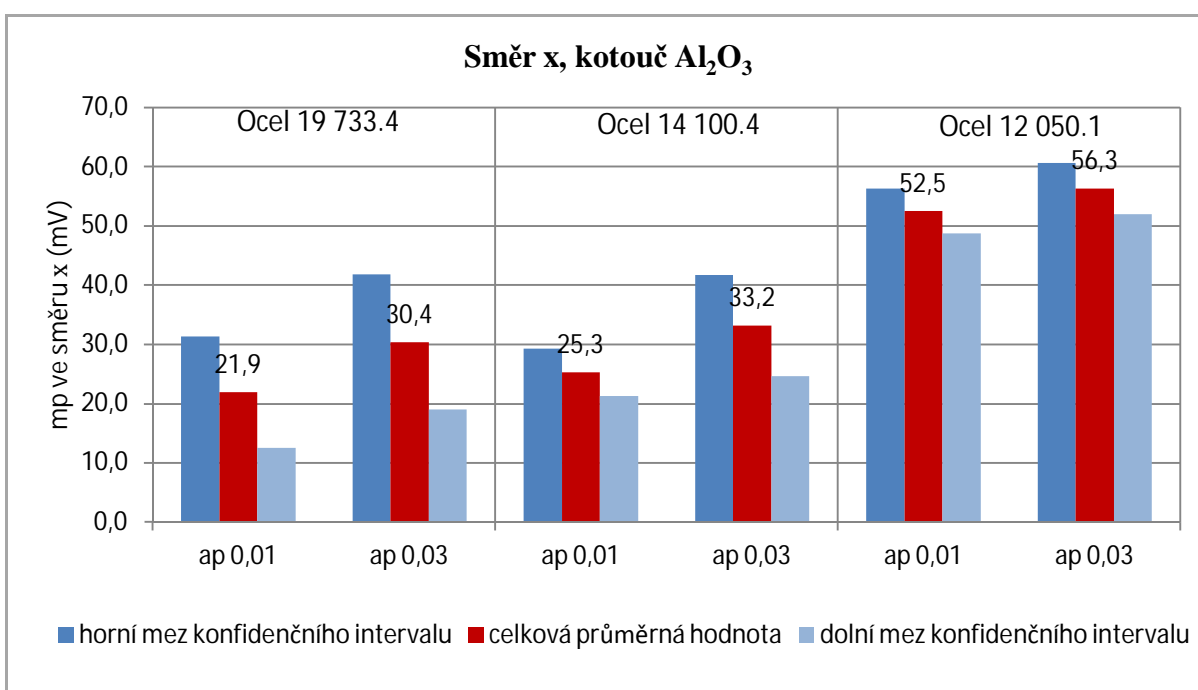
### 7.1 Porovnání hodnot mp u jednotlivých tříd ocelí

Tato kapitola se věnuje shrnutí a celkovému porovnání hodnot magnetoelastického parametru u různých druhů ocelí za stejných podmínek broušení. Celkové střední hodnoty jsou zvýrazněny červeně, horní a dolní meze konfidenčního intervalu tmavě modře, respektive světle modře. Název grafu označuje, na základě jakých podmínek byly materiály porovnávány.

Hned u prvního grafu (obr. 32) je patrné, že se hodnoty materiálu 19 733.4 a 14 100.4 lišily v řádech jednotek mV oproti materiálu 12 050, kde se hodnoty vyšplhaly až na hodnotu přesahující dvojnásobek hodnoty mp u oceli třídy 19 a 14.

Největší rozsahy konfidenčních intervalů získaných z pěti průměrných hodnot jednotlivých vzorků, vykazovala ocel 19 733.4 (příloha 1). Ocel třídy 14 měla nižší rozsah konfidenčního intervalu. Ocel třídy 12 měla nejmenší rozsah konfidenčního intervalu, což nasvědčuje, že průměrné hodnoty skupiny vzorků 3 a 6 (příloha 3) nevykazovaly výrazné odchylky od celkové průměrné hodnoty dané podmínky (ocel 12 050.1, kotouč  $Al_2O_3$ , +  $a_p$ ).

Hodnoty mp při hloubce záběru 0,03 mm byly u všech ocelí větší než při  $a_p$  0,01 mm. Největší rozdíl hodnot byl u oceli třídy 19 a 14. U oceli třídy 12 měla změna hloubky záběru nejmenší vliv, něco málo přes 7%.

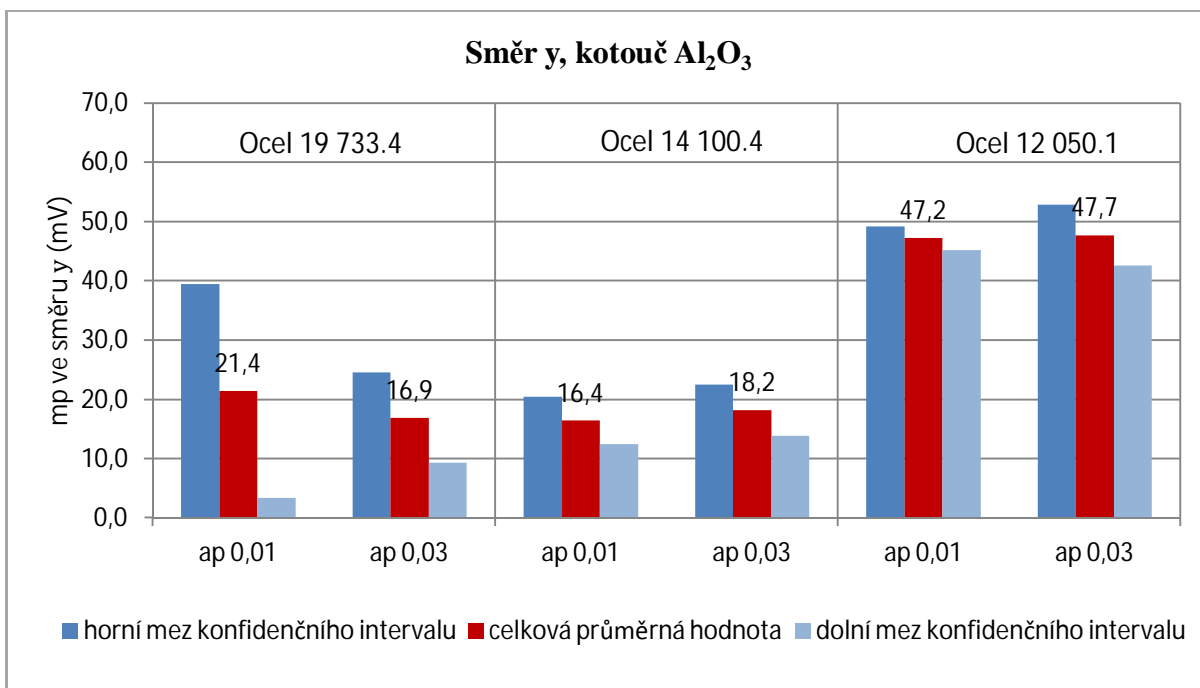


Obr. 32 Hodnoty mp pro tři druhy oceli a pro dvě hloubky záběru

Na obr. 33 lze vidět, jaký vliv měly dvě různé hloubky záběru na hodnoty mp ve směru y. Při  $a_p$  0,01 mm byla celková průměrná hodnota oceli třídy 19 (vyznačena červeně) vyšší než u oceli třídy 14. U oceli třídy 19 byl také zřetelný velký rozdíl mezi horním a dolním konfidenčním intervalem. Tyto extrémní hodnoty byly dány především průměrnou hodnotou vzorku 1e (tab. 3), který vykazoval mnohem menší tvrdost (příloha 5), tedy vyšší hodnoty mp, které zapříčinily tyto anomálie. U oceli třídy 12 byl rozsah konfidenčního intervalu velmi malý, což svědčí o tom, že průměrné hodnoty na všech vzorcích této podmínky (příloha 3, skupina vzorků 3) byly v úzkém pásmu hodnot.

Hodnoty mp ve směru y (obr. 33) byly menší než hodnoty mp ve směru x (obr. 32). Největší rozdíl byl u oceli třídy 14. Při  $a_p$  0,01 mm byly hodnoty mp ve směru y menší, než hodnoty mp ve směru x. U oceli třídy 19 byl rozdíl v hodnotách mp ve směrech x a y nejméně patrný. Třídy ocelí 14 a 12 vykazovaly vyšší rozdíly.

Při  $a_p$  0,03 mm byly hodnoty mp ve směru y také menší než ve směru x. U ocelí třídy 19 a 14 menší o necelých 50%. U oceli 12 050.1 byla hodnota nižší o necelých 20%. Celkově lze říci, že směr y měl menší rozdíly v hodnotách mp při různých hloubkách záběrů než hodnoty mp ve směru x, kde rozdíl byl v použité hloubce záběru až 10 mV.

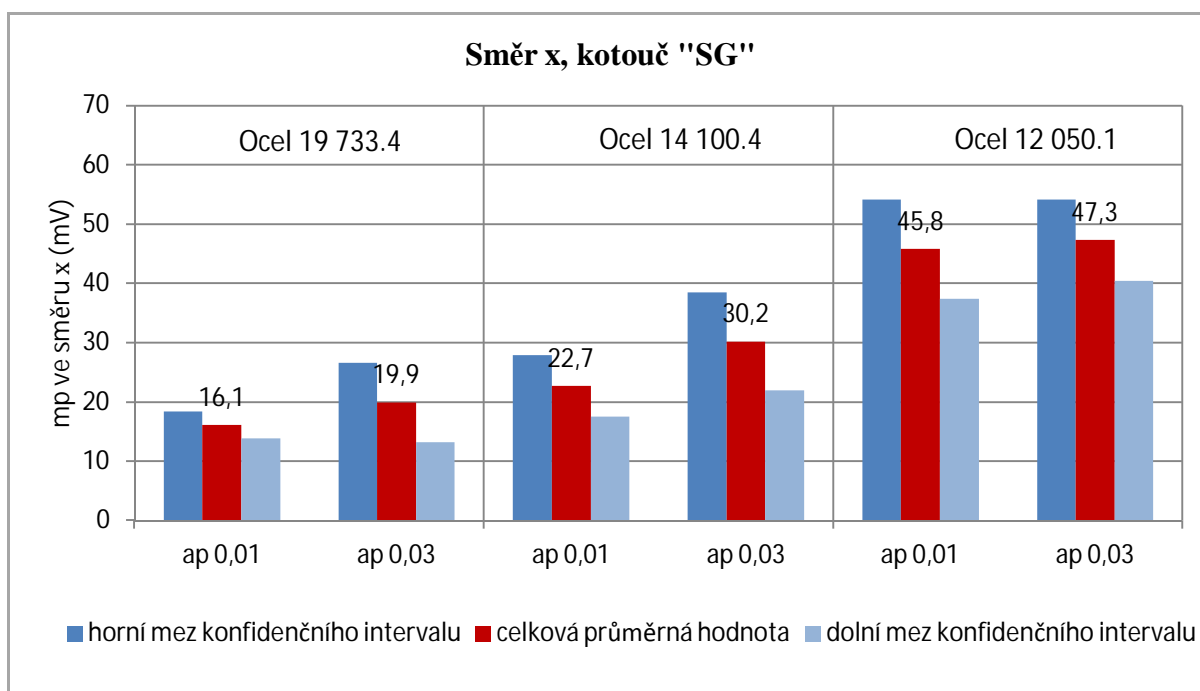


Obr. 33 Hodnoty mp pro tři druhy oceli a pro dvě hloubky záběru

Na grafu zobrazeném na obr. 34 se vyhodnocovala velikost mp při broušení mikrokrystalickým kotoučem “SG“. Žádný z rozsahu konfidenčních intervalů extrémně nevybočoval z normálu. Nejmenší rozsah vykazovala ocel třídy 19 při  $a_p$  0,01 mm.

Hloubka záběru 0,03 mm vykazovala vyšší hodnoty mp u všech tříd ocelí. Největší změna v hloubce záběru je zřejmá u oceli třídy 14. Při použití  $a_p$  0,01 mm hodnota mp poklesla o necelých 33%. U ocelí třídy 14 a 12 byl pokles hodnot mp menší. U oceli 12 050.1 byl pokles pouze o 1,5 mV.

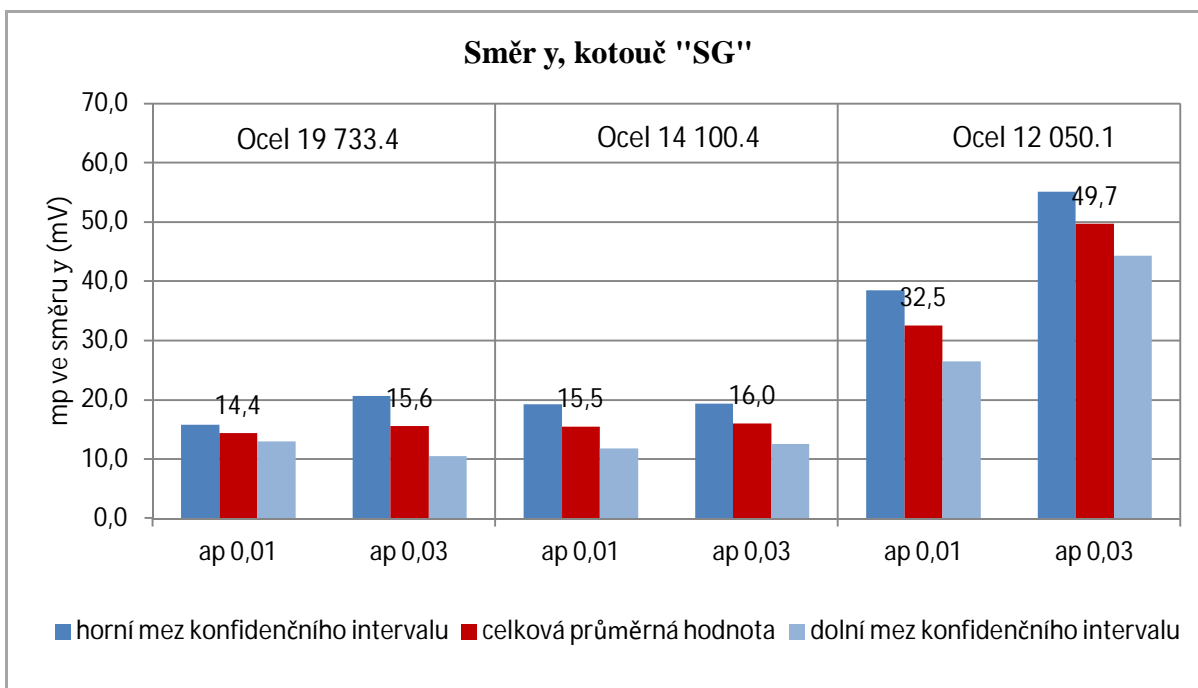
Rozsah konfidenčního intervalu byl nejmenší u oceli 19 733.4. Třídy 14 a 12 vykazovaly větší výkyvy, jak při  $a_p$  0,01 mm, tak při  $a_p$  0,03 mm.



Obr. 34 Hodnoty mp pro tři druhy oceli a pro dvě hloubky záběru

Směr y vykazoval mnohem menší výkyvy od celkové průměrné hodnoty mp v použité hloubce záběru při broušení "SG" kotoučem. Hloubka záběru 0,03 mm vykazovala opět vyšší hodnoty mp než  $a_p$  0,01 mm. U nástrojové oceli 19 733.4 byl rozdíl necelý 1 mV. U legované oceli 14 100.4 činil rozdíl 0,5 mV. U těchto dvou druhů ocelí byl tedy rozdíl minimální. Jinak tomu bylo u konstrukční oceli 12 050.1. Celková průměrná hodnota mp vzrostla z 32,5 mV, při  $a_p$  0,01 mm, na hodnotu 49,7 mV, při  $a_p$  0,03 mm. Celková průměrná hodnota mp při použití větší hloubky záběru vzrostla téměř o 53% (obr. 35).

Rozsahy konfidenčních intervalů byly poměrně dobré. Ani jedna třída oceli nevykazovala extrémní hodnoty. Nejmenší odchylky středních hodnot jednotlivých vzorků (příloha 1, 2, 3) od celkové průměrné hodnoty dané podmínky (vyznačena červeně) vykazovala ocel třídy 19. U oceli třídy 14 a 12 byly odchylky středních hodnot (příloha 2, 3) od celkové průměrné hodnoty dané podmínky větší.



*Obr. 35 Hodnoty mp pro tři druhy oceli a pro dvě hloubky záběru*

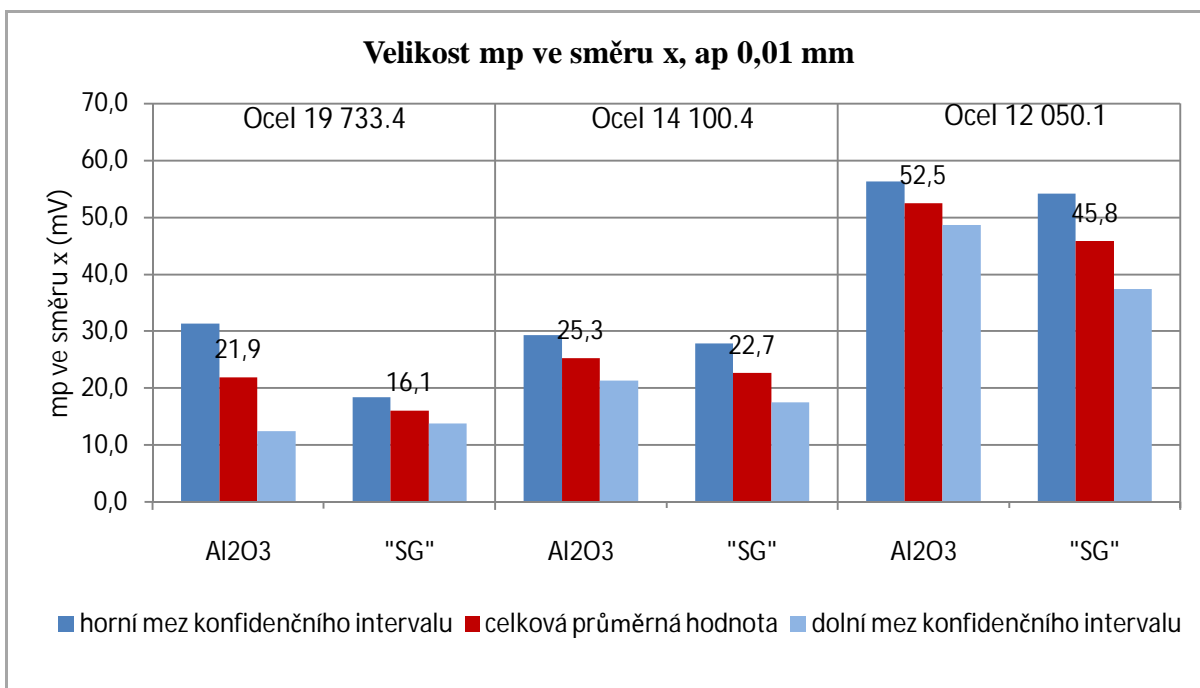
## 7.2 Porovnání hodnot mp pro dva typy brousících kotoučů

V následujících grafech je souhrnně zobrazeno, jaký vliv mají brousící kotouče “SG“ a  $Al_2O_3$  na velikost zbytkového napětí v povrchové vrstvě u všech tří druhů ocelí.

Na obr. 40 jsou zobrazeny oceli 19 733.4, 14 100.4 a 12 050.1. Teoreticky by oceli měly být seřazeny od nejtvrďší po nejměkčí. Proto má graf stoupající tendenci. Meze konfidenčních intervalů jsou opět zvýrazněny modře. Horní mez konfidenčního intervalu má barvu tmavě modrou a dolní mez konfidenčního intervalu má barvu světle modrou. Červená barva zobrazuje celkové průměrné hodnoty, vypočítané z průměrných hodnot jednotlivých vzorků (příloha 1, 2, 3).

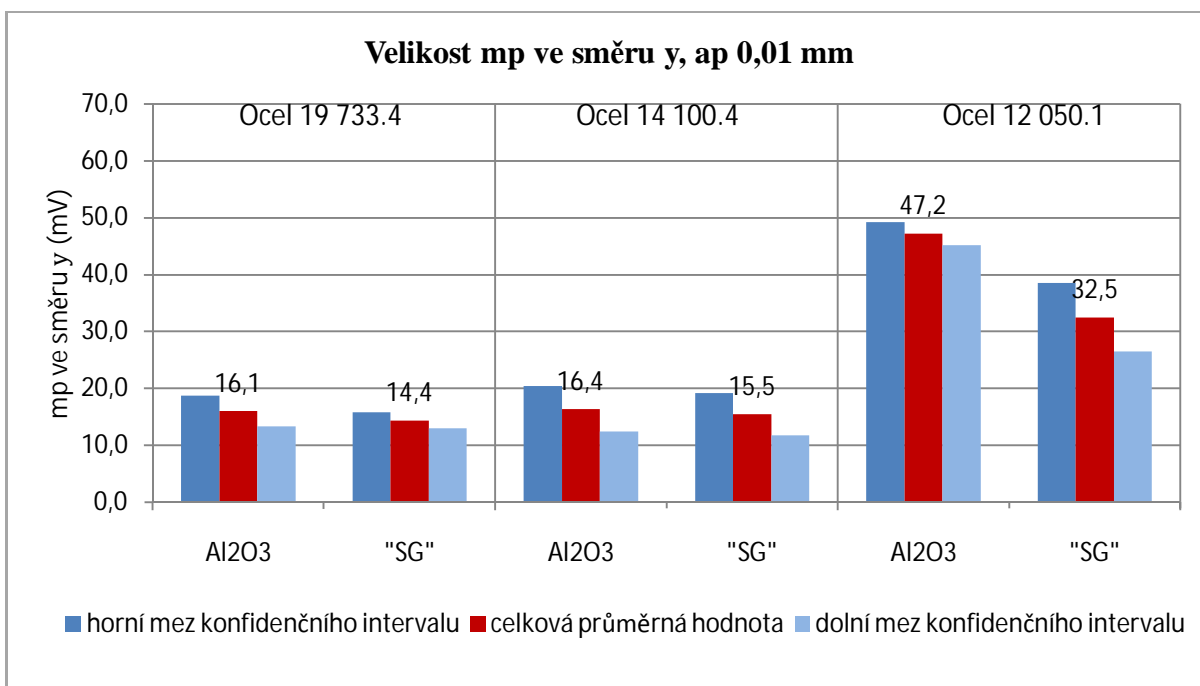
Na obr. 36, lze vidět, jak velké byly rozsahy konfidenčních intervalů pro dva druhy brousících kotoučů. Nástrojová ocel 19 733.4, při broušení “SG“ kotoučem, vykazovala nejmenší odchylky, což ukazuje na poměrně slušné měření. Při broušení kotoučem  $Al_2O_3$  byly rozsahy podstatně vyšší. U třídy ocelí 14 a 12 byly konfidenční intervaly větší při broušení kotoučem  $Al_2O_3$ .

Výsledky ukazují, že použití brousícího kotouče “SG“ mělo příznivý vliv na velikost hodnot mp a mohlo tedy mít vliv i na velikost zbytkového napětí. U kotouče “SG“ vyšly hodnoty zpravidla menší než u klasického kotouče. Největší rozdíly byly u konstrukční oceli 12 050.1. Rozdíl u oceli třídy 14 byl nejmenší.



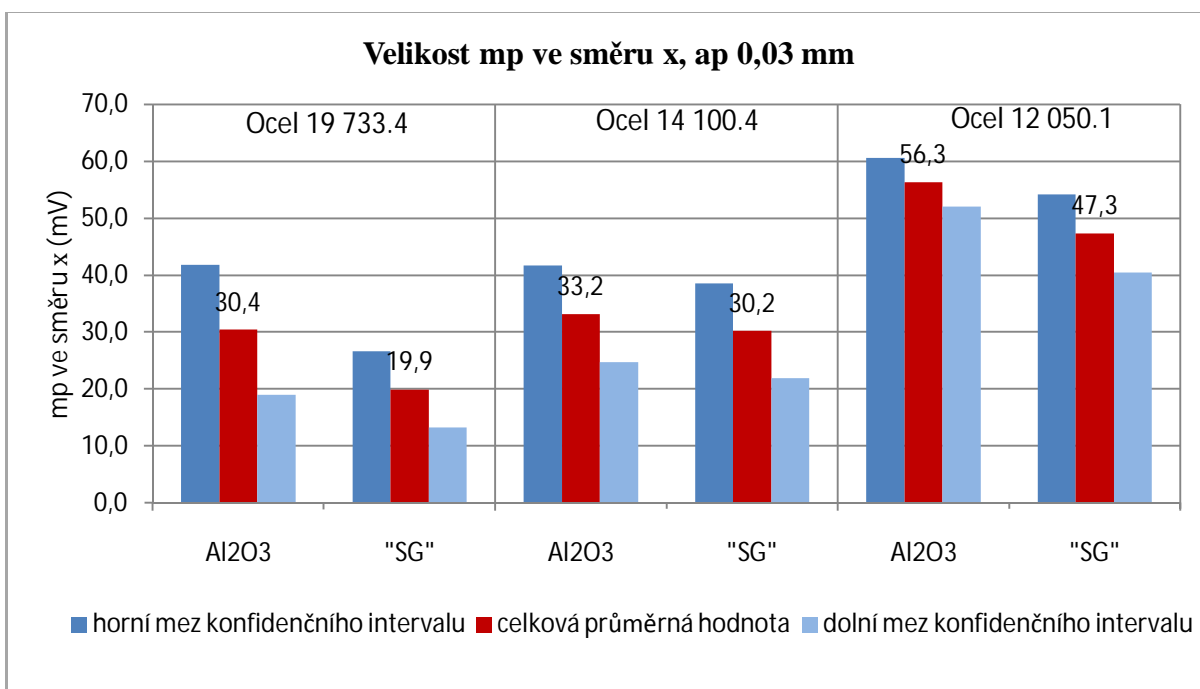
*Obr. 36 Hodnoty mp pro dva typy brousicích kotoučů*

O grafu na obr. 37 lze říci totéž, co u předešlého grafu. Také ve směru y se hodnoty mp, při použití kotouče "SG", ukázaly menší. Na velikost hodnot mp, u nástrojové a legované oceli, neměl druh použitého brousicího kotouče velký vliv. Hodnoty mp se lišily minimálně. U oceli 12 050.1 byly rozdíly mnohem větší. Při použití kotouče "SG" vyšla celková průměrná hodnota 32,5 mV, což bylo o necelých 32% méně než při použití kotouče Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.



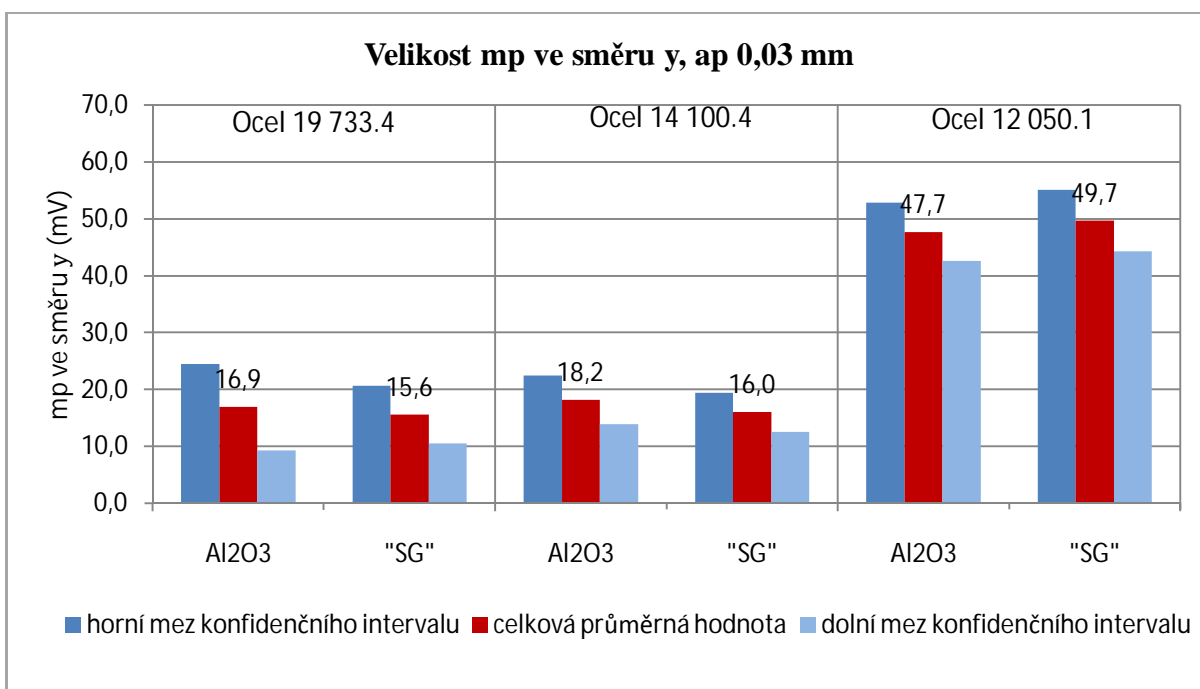
*Obr. 37 Hodnoty mp pro dva typy brousicích kotoučů*

Na následujících dvou grafech (obr. 38,39) se opět potvrzuje, že broušící kotouč "SG" má příznivější vliv na velikost mp v broušené vrstvě. Například u nástrojové oceli došlo ke snížení mp o 35% při použití "SG" kotouče.



Obr. 38 Hodnoty mp pro dva typy broušících kotoučů

Na obr. 39 porovnáním kotouče Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a "SG" zjistíme, že při broušení oceli 12 050.1 hloubkou záběru 0,03 mm, vykazoval kotouč "SG" vyšší hodnoty mp než Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Toto je výjimka, protože doposud byly hodnoty vždy menší při broušení kotoučem "SG".



Obr. 39 Hodnoty mp pro dva typy broušících kotoučů



## 8. Závěr

---

Cílem bakalářské práce bylo ověřit nedestruktivní stanovení zbytkového napětí v povrchové vrstvě broušených součástí metodou analýzy Barkhausenova šumu, která vyhodnocuje hodnotu magnetoelastický parametr v jednotkách mV (kapitola 3.1). Pro ověření byla navržena série experimentů, lišící se různými řeznými podmínkami, na základě kterých se tato metoda ověřovala. Pro experimenty byly zvoleny dva typy broušících kotoučů. Jeden klasický, běžně používaný se střední zrnitostí  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Druhým vybraným broušícím kotouč byl moderní konstrukce tzv. “SG“ kotouč, který měl jemnozrnnou strukturu. Dalším hlediskem pro vyhodnocení velikosti mp byly dvě hloubky záběru. Hloubka záběru 0,01 mm, která prezentovala hlavně dokončovací způsob broušení a hloubka záběru 0,03 mm, což je hloubka reprezentující zejména hrubovací obrábění. Posledním kritériem byl typ materiálu. Nástrojová ocel 19 733.4, jak ze značení vyplývá tepelně zpracovaná. Konstrukční ocel 12 050.1 normalizačně žíhaná a legovaná ocel 14 100.4, také tepelně zpracovaná.

Pro řešení týkající se dané problematiky byly využity poznatky z různých zdrojů, dostupných na internetu nebo v knihovně Technické univerzity v Liberci, popřípadě Krajské vědecké knihovny v Liberci. Byly použity jak české publikace, tak zahraniční. Na základě těchto informací byly zhodnoceny vlivy daných podmínek na dosažené výsledky.

Ze samotných výsledků vyplývá (příloha 1, 2, 3 a obr. 14-39), že typ broušícího kotouče, hloubka záběru a typ materiálu mají větší či menší vliv na velikost mp v broušené vrstvě.

Druh broušících zrn broušícího kotouče má vliv na velikost magnetoelastického parametru. Výsledky ukázaly, že za stejných podmínek broušení byly hodnoty mp u kotouče “SG“ menší, a to jak při hloubce záběru 0,01 mm, tak při  $a_p$  0,03 mm. Příznivější mikrostavba broušících zrn u kotouče “SG“ má pravděpodobně za následek, že broušící zrna jsou ostřejší a při samotném procesu broušení šetrnější k úběru třísky, která souvisí se vznikem tepla, které proudí do obrobku. Oproti tomu zrna kotouče  $\text{Al}_2\text{O}_3$  mají jiné složení a jsou pravděpodobně více náchylná k otupení, které souvisí se zhoršením řezivosti broušícího kotouče.

Je vhodné připomenout, že hodnoty mp se zjišťovaly ve dvou směrech, protože byla výzkumem zjištěna závislost mp na orientaci snímače vůči dráze řezného nástroje. Ve všech případech broušených skupin vzorků (1-12) bylo zjištěno, že hodnoty mp ve směru x, tedy ve směru posuvu, jsou větší než hodnoty mp ve směru y, tzn. ve směru kolmém k posuvu. Tento fakt se potvrdil. U oceli třídy 19 a 14 se hodnoty v různých směrech zpravidla lišily někdy až o 40% (příloha 1, 2, 3), naproti tomu u oceli 12 050.1 se hodnoty lišily okolo 20%. Je možné,

že menší tvrdost má určitý vliv na směr a velikost  $m_p$  v broušené vrstvě, což by ale musely prokázat další testy. Jedinou výjimku tvoří skupina vzorků 12, která vykazovala hodnoty  $m_p$  ve směru  $y$  vyšší než ve směru  $x$ .

Značný vliv měla hloubka záběru. Použitím brousicího kotouče "SG", u materiálu třídy 19, 14 a 12, se změna hloubky záběru z 0,03 mm na 0,01 mm projevila zmenšením hodnot  $m_p$  ve směru  $x$ . U oceli 19 733.4 došlo při použití  $a_p$  0,01 mm ke snížení magnetoelastického parametru o 19% (tab. 5, 6), u oceli 14 100.4 o 25% (tab. 9, 10). V tomto případě lze usuzovat, že menší hloubka záběru bude mít příznivý dopad na velikost zbytkového napětí v broušené vrstvě. U brousicího kotouče  $Al_2O_3$ , byl rozdíl  $m_p$  v hloubkách záběru u obou ocelí podobný. U oceli třídy 19 a 14 měla menší hloubka záběru také příznivý vliv na velikost  $m_p$ . Oproti  $a_p$  0,03 mm, vykazovala  $a_p$  0,01 mm zmenšení hodnot  $m_p$  o 28% (tab. 3, 4) u oceli třídy 19 a u oceli třídy 14 o 24% (tab. 7, 8). Ocel 12 050.1 měla mnohem menší výkyvy hodnot  $m_p$  v použité hloubce záběru. Použitím kotouče "SG" se docílilo 7% poklesu hodnoty  $m_p$  při hloubce záběru 0,01 mm (tab. 13, 14) v porovnání s  $a_p$  0,03 mm. Kotouč  $Al_2O_3$  vykazoval, při změně hloubky záběru, pokles  $m_p$  jenom 3,2% (tab. 11, 12), oproti 28% u oceli třídy 19 a 24% u oceli třídy 14. Je zajímavé, že u oceli třídy 12 je vliv menší hloubky záběru na velikost magnetoelastického parametru menší, než tomu je u ocelí třídy 19 a 14. Pokud jde o hodnoty  $m_p$  ve směru  $y$ , tak ty se v použité hloubce záběru lišily minimálně. Největší rozdíl byl u oceli třídy 12. Při broušení kotoučem "SG" s  $a_p$  0,01 mm došlo k poklesu hodnot  $m_p$  o 36% (tab. 13, 14).

U hloubky záběru 0,03 mm vycházely naměřené hodnoty  $m_p$  většinou s menší šířkou konfidenčního intervalu, než u oceli s hloubkou záběru 0,01 mm. Při větší  $a_p$  vznikají větší dynamické síly a větší teploty, což by mohlo vysvětlit tento jev.

Značné rozdíly jsou zřetelné u použitých ocelí. Oceli třídy 19 a 14 vykazovaly oproti oceli třídy 12 řádově o několik desítek mV menší hodnoty. Tento fakt může být způsoben tím, že ocel třídy 12 měla menší tvrdost než oceli třídy 19 a 14. A jak bylo zjištěno z literatury, tak tvrdost má značný vliv na odezvu signálu, získaného při měření hodnot  $m_p$  u daného materiálu. Ocel s menší tvrdostí má větší odezvu signálu a tedy větší naměřené hodnoty  $m_p$ . Rozdíl hodnot  $m_p$  mezi třídou ocelí 19 a 14 byl ve většině případů minimální. Pro potvrzení, že tvrdost je jedním z důležitých vlastností materiálu, která má vliv na hodnotu  $m_p$  u zkoumaných materiálů, byla provedena na několika vzorcích zkouška tvrdosti dle Vickerse. Z příloh 1, 2, 3 a 5 je zřejmé, že tomu tak opravdu je. Při menší naměřené tvrdosti vykazovaly vzorky větší hodnoty  $m_p$ , než vzorky s větší naměřenou tvrdostí. Čímž lze částečně vysvětlit některé anomálie zjištěné při měření.

Jak bylo výše uvedeno, tak během experimentů bylo zjištěno, že některé hodnoty  $m_p$  naměřené na magnetoelastickém analyzátoru strukturních a napěťových změn MicroScan 600-1 se výrazně odlišují. Anomálie jsou zřetelné například na obr. 14 nebo obr. 16. Z toho lze usuzovat, že tato metoda umožňuje zjistit anomálie, které se mohou vztahovat například k vadám struktury, k nehomogenitě materiálu nebo k chybě způsobené technologií vlastního procesu obrábění v podobě nečistoty na broušeném povrchu, například přítomnost smítka nebo mastné skvrny. A jedním z významných výsledků mého měření bylo zjištění, že tato metoda je velmi citlivá na to, v jakém stavu se materiál nachází.

Samostatnou kapitolu tvoří vzorky 8b a 8c u oceli třídy 14 (příloha 2). Při měření se hodnoty  $m_p$  vyšplhaly až ke čtyřem stovkám mV, což jsou hodnoty přesahující střední hodnotu až patnáctinásobně. Z tohoto důvodu nebyly naměřené hodnoty těchto vzorků vyhodnocovány. V případě vzorku 8b byla provedena zkouška tvrdosti, která potvrdila, že v určitých částech vykazoval vzorek standardní tvrdost, kde byly naměřeny správné hodnoty a v některých okrajových částech vzorku byla zjištěna výrazně odlišná tvrdost (příloha 5) a tam také byly zjištěny hodnoty  $m_p$  výrazně jiné.

Pro doplnění výsledků z analýzy Barkhausenova šumu bylo u vybraných vzorků provedeno další nedestruktivní měření zaměřené na zjišťování zbytkového napětí. Vzhledem k tomu, že analýzou Barkhausenova šumu nelze zjistit, jestli v broušené vrstvě převládá tahové či tlakové napětí, byla provedena difrakční analýza. Metoda naměřila přítomnost tlakového zbytkového napětí, což dokazují záporné hodnoty (příloha 4). Nejvyšší záporné hodnoty z difrakční analýzy vykazovala ocel třídy 12, pravděpodobně z důvodu menší tvrdosti. Také se potvrdilo, že ve směru posuvu broušícího kotouče byla naměřena vyšší zbytková tlaková napětí než ve směru kolmém k posuvu.

Při analýze všech naměřených hodnot, kde některé vzorky vykazovaly větší či menší anomálie, je nutné zdůraznit, že dokončovací metoda broušení je sama o sobě velmi specifická technologická činnost. Způsob úběru třísek malých průřezů náhodně rozloženými zrny s nedefinovanou geometrií břítu jsou příčinou vzniku velkého množství energie, která se téměř všechna mění v teplo proudící do obrobku, které ovlivňuje velikost zbytkového napětí v broušené vrstvě. Měřící metoda se během experimentů ukázala jako velmi citlivá na jakékoliv změny v povrchové vrstvě a proto je opravdu důležité, aby broušící kotouč byl správně vyvážen a kvalitně orovnan, aby bylo zajištěno bezpečné a přesné ustavení obrobku na magnetický stůl, aby byla co možná nejvíce zaručena tuhost celé soustavy, aby procesní kapalina měla stálý a rovnoměrný přítok do místa záběru apod. Neméně důležité je také eliminovat materiálové vlivy, například nehomogenitu materiálu apod.

Co je tedy výsledkem provedených experimentů? Při zkoumání se potvrdilo, že metoda je nedestruktivní a časově nenáročná. Hlavním přínosem také bylo zjištění, že měřicí metoda citlivě ukazuje na rozdíly související s vlastním procesem obrábění nebo strukturou materiálu. Metoda citlivě rozlišuje jakékoliv anomálie v daném materiálu, jeho změny ve struktuře, menší tvrdost materiálu atd. V experimentech se tyto jevy projeví odlišností některých hodnot  $m_p$  od celkové průměrné hodnoty, někdy se anomálie projeví jen u jednotlivých bodů, někdy byly celé vzorky špatné. Byl také prokázán vliv tvrdosti, což potvrzují zkoušky dle Vickerse (příloha 5), které mají významný vliv na hodnoty  $m_p$  u zkoumaných vzorků. Na hodnotu  $m_p$  byl dále dokázán vliv řezných podmínek, tepla a materiálu.

S výhledem na další pokračování by mohlo být zajímavé zkoumání vlivu dalších podmínek broušení na velikost  $m_p$ . Například vliv rychlosti posuvu nebo otáček broušícího kotouče na hodnotu  $m_p$ . Také by bylo vhodné hledání dalších souvislostí mezi broušícími podmínkami a hodnotami  $m_p$ , mezi materiálem a velikostí magnetoelastického parametru, popřípadě hledat další závislosti magnetoelastického parametru na tvrdosti. V případě tohoto experimentu by bylo možné detailní hodnocení tvrdosti nebo analýza struktury u všech zkoumaných vzorků, která by mohla potvrdit nebo vyloučit příčiny anomálií, zjištěných při experimentech. Jiným řešením by mohlo být opětovné přebroušení všech vzorků a nové přeměření.

## 9. Seznam použité literatury

---

- [1] CARTZ, L. *Nondestructive Testing: radiography, ultrasonics, liquid penetrant, magnetic particle, eddy current*. 1st. edition. Cleveland: ASM International, aug. 1995. ISBN 0-87170-517-6.
- [2] CEURTER, S. J., SMITH, CH., OTT, R. Barkhausen noise inspection. *Advanced Materials & Processes*. vol. 160, april 2002, issue 4. pp. 1 – 3. ISSN 0882-7958.
- [3] *Earth's magnetic field*. [online]. Statesboro: Georgia Southern university. [cit. 4. března 2012]. Dostupné na: <http://www.bio.georgiasouthern.edu/bio-home/harvey/lect/images/curiet.gif>.
- [4] FITZPATRICK, M. E., LODINI, A. *Analysis of residual stress by diffraction using neutron and synchrotron radiation*. 1st. edition. New York: Taylor & Francis, 2003. ISBN 0-203-34593-2.
- [5] GANEV, N., KRAUS I. O spolehlivosti a věrohodnosti difrakční analýzy napětí. *Materials structure*. roč. 6, 1999, č. 1. s. 42-44. ISSN 1211-5894.
- [6] GANEV, N., KRAUS, I., Rentgenová difrakční technika měření makroskopických zbytkových napětí. *Materials structure*. roč. 9, 2002, č. 2. s. 82–83. ISSN 1211-5894.
- [7] GROS, X. E. *NDT Data Fusion*. 1st. edition. New York: Arnold, nov. 1997. ISBN 0-340-67648-5.
- [8] GROSSE, CH. U., OHTSU, M. *Acoustic emission testing. Basic for research – Applications in civil engineering*. 1st. edition. Berlin: Springer, 2008. ISBN 978-3-540-69895-1.
- [9] HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J. *Fyzika: Elektřina a magnetismus, část 3*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně - nakladatelství Vutium a Prometheus, 2000. ISBN 80-214-1868-0.
- [10] HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER. *Fyzika: Elektromagnetické vlny, optika, relativita, část 4*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně - nakladatelství Vutium a Prometheus, 2000. ISBN 80-214-1868-0.
- [11] HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER. *Fyzika: Mechanika, část 1*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně - nakladatelství Vutium a Prometheus, 2000. ISBN 80-214-1868-0.

- [12] HORT, F. *Diagnostický systém pro kontrolu ložisek s využitím metody akustické emise*. [online]. Brno: FSI VUT v Brně. [cit. 29. února 2012]. Dostupné na: [http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz\\_soubor.php?id=649](http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz_soubor.php?id=649).
- [13] CHEN, CH. *Ultrasonic and advanced methods for nondestructive testing and material characterization*. 1st. edition. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2007. ISBN 978-981-270-409-2.
- [14] CHENG, W., FINNIE, I. *Residual Stress Measurement and the Slitting Method*. 1st. edition. New York: Springer, 2007. ISBN 978-0-387-37065-1.
- [15] CHERN PENG, S.W. *Barkhausen emission and non-destructive testing of steel*. [Dissertation for degree of bachelor of mechanical engineering with honours]. Leicestershire, Loughborough University, april 2002.
- [16] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Guidebook on non-destructive testing of concrete structures*. Vienna: IAEA, sep. 2002. ISSN 1018-5518.
- [17] KAWAMOTO, S., SAM, W. R. *Acoustic emission and acousto-ultrasonic techniques for wood and wood-based composites - A review*. WI: U.S. Department of Agriculture, 2002. GTR-FPL-134.
- [18] KLOIBERT, M., KOTLÍNOVÁ, M. *Nedestruktivní defektoskopické přístroje používané při provádění stavebně technických průzkumů*. [online]. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, březen 2010. [cit. 20. února 2012]. Dostupné na: <http://stavba.tzb-info.cz/>.
- [19] KOLAŘÍK, K., GANEV, N., JERSÁK, J. Application of x-ray diffraction and barkhausen noise analysis for stability control during machining. *Materials engineering*. vol. 18, august 2010, no. 2, pp. 49-56. ISSN 1338-6174.
- [20] KOPEC, B., aj. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí*. Rec. P. Sullik, P. Mazal. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2008. 572 s. ISBN 978-80-7204-591-4.
- [21] KRÍŽ, A. *Integrita povrchu v oblasti tepelného zpracování*. [online]. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2009. [cit. 3. března 2012]. Dostupné na: <http://www.ateam.zcu.cz/>.
- [22] MACEK, K., ZUNA, P., aj. *Nauka o materiálu*. 1. vyd. Praha: vydavatelství ČVUT, 1999. ISBN 80-01-01507-6.
- [23] MÁDL, J., HOLEŠOVSKÝ, F. *Integrita obroběných povrchů z hlediska funkčních vlastností*. Rec. K. Kocman, K. Jandečka. 1. vyd. Ústí nad Labem: UJEP, FVTM, 2008. 230 s. ISBN 978-80-7414-095-2.

- [24] Manuál magnetoelastického analyzátoru MicroScan 600-1.
- [25] *Mechanická měření* (podklady pro výuku laboratorních cvičení předmětu MĚŘENÍ VE FYZIKÁLNÍCH TECHNOLOGIÍCH). [online]. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2008. [cit. 3. března 2012]. Dostupné na: <http://ttp.zcu.cz/cz/uvod>.
- [26] *MicroScan 600* (popis produktu). [online]. Vaajakoski: Stresstech group. [cit. 13.3.2012]. Dostupné na: <http://www.stresstechgroup.com/>
- [27] MILOŠ, V., HOUFEK, L., HLAVOŇ, P., aj. *Experimentální mechanika*. [online]. 1. vyd. Brno: VUT v Brně, 2003. [cit. 29. února 2012]. Dostupné na: [http://www.umt-old.fme.vutbr.cz/studium/opory/Experimentalni\\_mechanika.pdf](http://www.umt-old.fme.vutbr.cz/studium/opory/Experimentalni_mechanika.pdf).
- [28] MIX, PAUL E. *Introduction to nondestructive testing: A training guide*. 2nd edition. New Jersey: Wiley – Interscience, 2005. ISBN 0978190608.
- [29] *Nauka o materiálu – zbytková napětí a defektoskopie* (studijní materiály). [online]. Ostrava: Vysoká škola Baňská, katedra pružnosti a pevnosti. [cit. 27. února 2012]. Dostupné na: <http://www.339.vsb.cz/>.
- [30] NECKÁŘ, F., KVASNIČKA, I. *Vybrané statě z úběru materiálu*. 1. vyd. Praha: ES ČVUT, 1991. 88 s. ISBN 80-01-00696-4.
- [31] OCHODEK, V. *Residual stress evaluation in spirally welded pipes for gas pipeline*. In. 6th International Conference on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing, ICBM 6, 9-10 July 2007, Valenciennes, University of Valenciennes, France, ISBN 951-98400-7-9.
- [32] ONDIRKOVÁ, J. Zvýšenie efektívnosti technologickej operácie při brúsení ložiskových ocelí aplikáciou nových brúsnych kotúčov. *AT&P Journal*. Rec. M. Neslušan. roč. 10, květen 2003, s. 45 – 46. ISSN 1336-233X.
- [33] SOTIRIOS, J. VAHAVIOLOS. *Acoustic emission: standarts and technology*. 1st. edition. Philadelphia: ASTM, 1999. ISBN 0-8031-2498-8.
- [34] Strojírenská technologie (číslo 3 časopisu zaměřené na problematiku měření zbytkových napětí). -. Ústí nad Labem: ÚTRV UJEP, září 2006. ISSN 1211-4162.
- [35] *Studium rentgenového záření* (studijní texty pro fyzikální praktikum). [online]. Praha: Univerzita Karlova, fakulta matematicko-fyzikální, září 2004. [cit. 20. února 2012]. Dostupné na: <http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/>.
- [36] ŠIMEČEK, J. *Integrita povrchu a její význam v praktickém využití – možnosti měření a měřicí metody*. [online]. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2008. [cit. 3. Března 2012]. Dostupné na: <http://www.ateam.zcu.cz/>.

- [37] VRKOSLAVOVÁ, L., GANEV, N., SANTA-AHO, S. aj. *Comparative Study of Case-hardened and Nitrided Samples by Using Barkhausen Noise Analysis and X-Ray Diffraction*. Rec. -, In: 9th International Conference on Barkhausen noise and Micromagnetic Testing, str. 105 – 114. ISBN 978-952-67247-4-4.
- [38] *Výroba RTG aparatur v ČSR*. [online]. Praha: Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT. [cit. 28. února 2012]. Dostupné na: <http://www.xray.cz/xray/cs-ca/kol2010/abst/marek.htm>.
- [39] WASEDA, Y., MATSUBARA, E., SHINODA, K. *X-Ray diffraction crystallography: introduction, examples and solved problems*. 1st. edition. New York: Springer, 2011. ISBN 978-3642166341.



## Seznam příloh

---

Příloha č. 1: Hodnoty mp pro ocel 19 733.4	4 stránky
Příloha č. 2: Hodnoty mp pro ocel 14 100.4	4 stránky
Příloha č. 3: Hodnoty mp pro ocel 12 050.1	4 stránky
Příloha č. 4: Výsledky z rentgenové difrakce	2 stránka
Příloha č. 5: Hodnoty tvrdosti	6 stránky

Hodnoty mp pro podmínky broušení: ocel 19 733.4, hloubka záběru 0,01 mm, kotouč "Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>"

Vzorek 1a	bod	mp ve směru x			mp ve směru y		
	1	21,1	16,5	17,2	16,9	20,9	25,2
	2	16,7	17,7	18,7	24,5	25,1	25,4
	3	18,4	17,6	19,3	11,9	11,8	11,6
	4	21,2	27,1	20,7	10,7	10,6	10,6
	5	16,3	17,9	15,9	21,1	19,5	21,6
Průměrná hodnota mp (mV)		18,8			17,8		
Vzorek 1b	bod	mp ve směru x			mp ve směru y		
	1	15,1	14,9	15,4	19,9	14,4	10,8
	2	19,1	19,9	21,2	10,3	10,4	10,8
	3	15,9	14,7	15,2	20,3	23,1	21,7
	4	16,1	15,1	16,6	14,7	15,7	12,1
	5	16,2	16,7	16,8	18,9	21,3	20,8
Průměrná hodnota mp (mV)		16,6			16,3		
Vzorek 1c	bod	mp ve směru x			mp ve směru y		
	1	13,6	13,5	13,5	16,4	10,7	10,5
	2	11,9	12,1	12,5	10,9	11,4	13,0
	3	25,0	30,3	26,4	26,7	23,5	21,9
	4	14,3	13,9	13,8	10,3	9,9	10,0
	5	12,6	10,8	12,8	11,7	11,9	11,6
Průměrná hodnota mp (mV)		15,8			14,0		
Vzorek 1d	bod	mp ve směru x			mp ve směru y		
	1	27,6	29,6	32,2	11,4	11,4	11,4
	2	30,7	27,6	32,6	14,3	14,2	19,4
	3	30,4	32,1	34,8	15,3	14,8	13,2
	4	28,7	26,9	30,8	11,3	11,2	11,2
	5	16,7	16,9	19,6	17,6	18,9	18,4
Průměrná hodnota mp (mV)		27,8			14,3		
Vzorek 1e	bod	mp ve směru x			mp ve směru y		
	1	16,5	16,6	16,6	26,6	28,2	25,9
	2	18,1	18,6	19,1	17,1	11,1	12,2
	3	20,4	18,1	21,8	19,5	11,6	11,5
	4	36,5	34,9	43,6	67,7	69,2	71,2
	5	46,5	55,4	73,3	87,3	99,5	109,5
Průměrná hodnota mp (mV)		30,4			44,5		
Celková průměrná hodnota mp (mV)		21,9 ± 9,4			21,4 ± 18		

Hodnoty mp pro podmínky broušení: ocel 19 733.4, hloubka záběru 0,03 mm, kotouč "Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>"

Vzorek 4a	bod	mp ve směru x			mp ve směru y		
	1	30,9	40,0	41,4	17,6	15,9	17,8
	2	29,8	50,4	50,3	42,5	36,6	43,9
	3	32,8	35,1	31,9	36,1	33,9	28,2
	4	37,2	32,9	31,1	12,4	12,2	12,6
	5	26,9	26,2	26,8	19,4	22,6	19,5
Průměrná hodnota mp (mV)		34,9			24,9		
Vzorek 4b	bod	mp ve směru x			mp ve směru y		
	1	27,5	28,2	25,4	14,7	19,9	15,9
	2	27,4	23,5	22,1	9,9	10,3	10,2
	3	30,5	29,4	23,4	18,1	15,6	13,6
	4	28,1	23,3	29,2	14,7	11,8	12,3
	5	24,9	22,9	22,1	16,1	16,2	17,5
Průměrná hodnota mp (mV)		25,9			14,5		
Vzorek 4c	bod	mp ve směru x			mp ve směru y		
	1	24,4	16,6	24,8	11,9	14,1	12,8
	2	22,7	24,5	24,9	10,1	10,2	10,1
	3	25,6	26,4	21,6	10,3	10,1	10,1
	4	21,4	18,3	23,0	15,6	15,8	16,7
	5	28,8	29,1	21,7	10,3	10,3	10,1
Průměrná hodnota mp (mV)		23,6			11,9		
Vzorek 4d	bod	mp ve směru x			mp ve směru y		
	1	25,8	27,9	28,9	11,1	10,9	14,1
	2	21,8	23,9	24,1	11,9	13,9	10,7
	3	22,4	22,8	23,1	11,9	12,3	14,1
	4	26,6	26,4	28,3	11,1	11,1	10,9
	5	22,4	26,5	22,3	18,1	17,7	18,3
Průměrná hodnota mp (mV)		24,9			13,2		
Vzorek 4e	bod	mp ve směru x			mp ve směru y		
	1	46,8	57,1	51,6	29,1	18,6	35,1
	2	39,2	40,7	42,8	13,2	25,2	12,9
	3	40,8	40,7	43,3	20,1	13,1	21,7
	4	47,6	43,4	46,6	17,8	15,3	17,9
	5	31,3	33,5	36,6	19,9	21,7	21,1
Průměrná hodnota mp (mV)		42,8			20,2		
Celková průměrná hodnota mp (mV)		30,4 ± 11,4			16,9 ± 7,6		

Hodnoty mp pro podmínky broušení: ocel 19 733.4, hloubka záběru 0,01 mm, kotouč "SG"

Vzorek 7a	bod	mp ve směru x			mp ve směru y		
	1	13,5	14,9	15,7	15,9	15,2	15,9
	2	13,9	14,1	13,7	16,1	16,9	14,5
	3	16,8	16,1	16,6	14,5	14,1	14,3
	4	16,1	16,1	15,9	14,9	14,6	14,3
	5	16,7	17,4	17,4	14,2	14,6	14,6
Průměrná hodnota mp (mV)		15,7			15,0		
Vzorek 7b	bod	mp ve směru x			mp ve směru y		
	1	14,3	14,5	14,3	12,7	12,8	14,3
	2	12,1	13,5	12,4	12,9	12,7	14,8
	3	16,6	16,9	16,9	10,7	10,6	13,3
	4	15,7	15,4	15,6	9,9	13,5	13,8
	5	12,7	13,5	13,8	11,5	13,9	13,5
Průměrná hodnota mp (mV)		14,5			12,7		
Vzorek 7c	bod	mp ve směru x			mp ve směru y		
	1	21,4	22,1	22,4	14,3	14,5	14,3
	2	17,7	17,7	17,7	12,1	13,5	12,4
	3	17,4	19,1	19,4	16,6	16,9	16,9
	4	19,8	20,1	19,1	15,7	15,4	15,6
	5	14,8	15,1	16,2	12,7	13,5	13,8
Průměrná hodnota mp (mV)		18,7			14,5		
Vzorek 7d	bod	mp ve směru x			mp ve směru y		
	1	13,8	14,7	14,4	16,1	16,1	15,3
	2	13,3	13,8	13,3	13,5	14,5	14,1
	3	16,3	16,9	16,6	13,7	16,2	14,6
	4	16,6	16,6	16,3	13,7	13,7	13,3
	5	14,4	14,2	14,8	15,1	15,3	13,9
Průměrná hodnota mp (mV)		15,1			14,6		
Vzorek 7e	bod	mp ve směru x			mp ve směru y		
	1	17,0	17,7	15,6	13,6	13,9	13,8
	2	17,9	15,5	17,8	16,8	14,5	19,8
	3	14,3	17,6	17,8	14,2	14,7	14,3
	4	17,9	17,1	17,8	13,8	13,5	13,7
	5	14,8	13,4	14,8	17,1	19,5	18,2
Průměrná hodnota mp (mV)		16,5			15,4		
Celková průměrná hodnota mp (mV)		16,1 ± 2,3			14,4 ± 1,4		

Hodnoty mp pro podmínky broušení: ocel 19 733.4, hloubka záběru 0,03 mm, kotouč "SG"

Vzorek 10a	bod	mp ve směru x			mp ve směru y		
	1	20,2	23,5	28,1	21,4	18,8	13,2
	2	14,8	20,1	27,1	19,2	24,2	15,8
	3	25,4	26,2	32,8	21,4	18,3	17,7
	4	23,9	36,3	23,6	19,1	17,4	13,7
	5	28,9	43,6	39,6	47,8	22,4	28,8
Průměrná hodnota mp (mV)		27,6			21,3		
Vzorek 10b	bod	mp ve směru x			mp ve směru y		
	1	20,2	24,7	13,7	9,6	9,9	9,9
	2	19,3	28,9	13,4	9,9	11,7	10,3
	3	59,6	14,4	13,4	11,4	10,1	11,7
	4	41,3	15,3	15,3	9,6	10,6	9,9
	5	15,4	14,2	14,9	14,6	15,5	12,1
Průměrná hodnota mp (mV)		21,6			11,1		
Vzorek 10c	bod	mp ve směru x			mp ve směru y		
	1	16,2	15,3	16,3	14,7	13,4	13,7
	2	16,3	16,5	16,2	14,1	15,3	14,9
	3	16,6	18,2	21,7	14,1	14,7	14,1
	4	16,9	16,7	16,6	14,4	13,5	13,9
	5	15,9	15,4	15,6	14,6	15,6	14,5
Průměrná hodnota mp (mV)		16,7			14,4		
Vzorek 10d	bod	mp ve směru x			mp ve směru y		
	1	16,6	16,0	15,9	14,1	14,5	14,5
	2	15,9	15,9	16,1	20,1	15,8	19,8
	3	19,1	19,5	14,7	14,6	15,4	14,2
	4	19,0	18,2	19,1	17,2	14,7	18,1
	5	15,5	15,2	15,5	15,6	16,6	15,1
Průměrná hodnota mp (mV)		16,8			16,0		
Vzorek 10e	bod	mp ve směru x			mp ve směru y		
	1	17,1	18,5	14,6	14,8	14,8	14,3
	2	15,9	16,1	14,1	16,8	18,8	19,7
	3	18,1	17,6	17,8	13,7	15,4	14,3
	4	16,2	15,2	16,1	14,2	17,9	13,8
	5	18,9	15,5	19,1	14,1	14,1	13,9
Průměrná hodnota mp (mV)		16,7			15,4		
Celková průměrná hodnota mp (mV)		19,9 ± 6,7			15,6 ± 5,1		

Hodnoty mp pro podmínky broušení: ocel 14 100.4, hloubka záběru 0,01 mm, kotouč "Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>"

Vzorek 2a	bod	Napětí ve směru x			Napětí ve směru y		
	1	27,7	23,4	22,3	15,3	18,2	19,5
	2	28,4	26,8	28,6	10,6	18,9	10,6
	3	28,4	29,1	30,5	32,2	23,9	34,6
	4	27,1	25,5	28,6	17,9	13,4	22,1
	5	29,7	29,8	29,3	12,1	13,4	14,4
Průměrná hodnota mp (mV)		27,7			18,5		
Vzorek 2b	bod	Napětí ve směru x			Napětí ve směru y		
	1	19,3	19,7	20,2	19,5	19,7	20,2
	2	21,1	20,1	21,6	14,9	14,3	14,4
	3	22,1	19,5	20,2	28,3	30,1	28,5
	4	25,6	27,1	19,1	13,3	13,6	13,6
	5	26,2	27,3	23,2	12,6	13,1	18,1
Průměrná hodnota mp (mV)		22,2			18,3		
Vzorek 2c	bod	Napětí ve směru x			Napětí ve směru y		
	1	17,2	24,4	24,6	11,3	11,1	11,3
	2	23,7	26,4	25,0	11,6	12,5	13,1
	3	22,6	23,3	25,6	13,6	11,1	11,1
	4	26,2	26,1	25,6	12,3	11,1	11,0
	5	16,6	15,8	17,6	17,2	15,8	18,1
Průměrná hodnota mp (mV)		22,7			12,8		
Vzorek 2d	bod	Napětí ve směru x			Napětí ve směru y		
	1	22,5	23,3	19,1	14,9	14,9	15,4
	2	21,8	27,0	24,8	11,7	13,4	14,3
	3	28,1	29,4	28,5	12,1	12,9	13,9
	4	28,1	23,0	28,0	14,6	15,8	16,4
	5	54,0	36,5	36,7	11,7	11,9	11,9
Průměrná hodnota mp (mV)		28,7			13,7		
Vzorek 2e	bod	Napětí ve směru x			Napětí ve směru y		
	1	19,4	16,8	17,1	25,6	20,4	22,3
	2	27,8	31,7	31,6	11,5	15,2	12,1
	3	30,1	31,9	32,6	16,5	12,5	11,7
	4	21,8	29,2	26,5	16,5	15,2	16,2
	5	20,8	23,3	20,2	30,2	28,2	28,8
Průměrná hodnota mp (mV)		25,4			18,9		
Celková průměrná hodnota mp (mV)		25,3 ± 4			16,4 ± 4		

Hodnoty mp pro podmínky broušení: ocel 14 100.4, hloubka záběru 0,03 mm, kotouč "Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>"

Vzorek 5a	bod	Napětí ve směru x			Napětí ve směru y		
	1	24,9	25,6	26,9	15,8	22,0	16,1
	2	28,1	29,2	27,5	12,1	14,1	12,0
	3	16,9	19,7	20,9	17,5	16,9	17,5
	4	24,4	24,1	25,1	22,7	24,9	23,6
	5	22,1	24,2	18,6	20,6	15,1	14,9
Průměrná hodnota mp (mV)		23,9			17,7		
Vzorek 5b	bod	Napětí ve směru x			Napětí ve směru y		
	1	21,8	21,0	20,4	16,7	18,2	25,9
	2	30,9	34,1	33,6	13,5	15,8	14,9
	3	37,8	36,9	36,8	14,7	15,0	15,4
	4	37,6	30,2	31,7	22,3	24,1	21,3
	5	31,3	36,3	37,0	15,0	14,8	15,5
Průměrná hodnota mp (mV)		31,9			17,5		
Vzorek 5c	bod	Napětí ve směru x			Napětí ve směru y		
	1	27,7	25,3	19,7	18,5	20,2	28,6
	2	31,7	32,2	30,2	13,4	12,4	14,2
	3	28,3	27,9	26,8	13,1	12,9	14,1
	4	28,5	33,4	33,8	12,1	12,0	13,7
	5	50,3	56,2	40,5	17,0	21,0	13,1
Průměrná hodnota mp (mV)		32,8			15,8		
Vzorek 5d	bod	Napětí ve směru x			Napětí ve směru y		
	1	27,4	33,4	30,6	34,1	28,9	36,7
	2	49,0	33,8	44,3	32,2	13,3	27,9
	3	47,4	48,8	43,1	12,2	10,9	11,2
	4	25,8	26,8	28,6	35,0	20,9	40,3
	5	48,0	50,2	46,4	12,6	18,5	19,0
Průměrná hodnota mp (mV)		38,9			23,6		
Vzorek 5e	bod	Napětí ve směru x			Napětí ve směru y		
	1	41,3	38,9	35,2	16,7	15,3	29,8
	2	38,5	38,3	38,4	18,4	14,4	13,7
	3	48,8	47,5	20,2	13,7	11,4	12,9
	4	37,7	49,7	36,4	25,1	21,4	21,7
	5	34,9	38,9	34,5	11,1	11,3	10,8
Průměrná hodnota mp (mV)		38,6			16,5		
Celková průměrná hodnota mp (mV)		33,2 ± 8,5			18,2 ± 4,3		

Hodnoty mp pro podmínky broušení: ocel 14 100.4, hloubka záběru 0,01 mm, kotouč "SG"

Vzorek 8a	bod	mp ve směru x			mp ve směru y		
	1	20,8	22,3	22,1	24,6	20,9	18,2
	2	22,4	24,3	20,2	23,4	19,4	20,9
	3	18,8	21,1	17,2	15,6	17,3	15,4
	4	21,2	21,2	20,6	18,1	19,9	19,6
	5	21,9	20,7	23,2	14,3	15,2	14,5
Průměrná hodnota mp (mV)		21,2			18,5		
Vzorek 8b	bod	mp ve směru x			mp ve směru y		
	1	26,6	22,9	22,9	16,7	17,8	12,6
	2	20,9	21,5	19,4	17,8	15,0	17,8
	3	15,1	17,5	18,1	11,5	13,6	14,1
	4	242,4	244,8	264,4	423,8	302,3	306,0
	5	68,7	58,1	149,0	210,6	367,2	413,9
Průměrná hodnota mp (mV)		20,5			15,2		
Vzorek 8c	bod	mp ve směru x			mp ve směru y		
	1	223,8	194,2	204,0	329,7	336,7	353,3
	2	231,2	229,1	239,7	374,0	367,8	383,7
	3	398,6	404,2	396,0	442,7	431,0	435,3
	4	277,3	294,1	251,6	353,5	373,4	428,9
	5	178,8	191,5	191,9	332,8	322,0	408,3
Průměrná hodnota mp (mV)		-			-		
Vzorek 8d	bod	mp ve směru x			mp ve směru y		
	1	21,9	17,4	17,4	16,5	18,4	18,9
	2	26,8	27,6	26,3	11,4	11,8	11,9
	3	15,8	16,6	14,7	19,0	17,5	17,3
	4	26,0	25,2	26,4	12,0	11,6	11,2
	5	22,6	23,8	24,0	12,2	11,8	12,4
Průměrná hodnota mp (mV)		22,2			14,3		
Vzorek 8e	bod	mp ve směru x			mp ve směru y		
	1	27,3	28,6	27,7	12,5	16,4	12,9
	2	30,1	30,2	29,3	12,0	12,3	12,3
	3	28,2	26,1	24,9	16,5	13,5	16,2
	4	28,6	31,5	31,5	11,9	11,9	11,9
	5	16,6	21,5	19,0	14,8	18,2	16,9
Průměrná hodnota mp (mV)		26,8			14,1		
Celková průměrná hodnota mp (mV)		22,7 ± 5,2			15,5 ± 3,7		



Hodnoty mp pro podmínky broušení: ocel 14 100.4, hloubka záběru 0,03 mm, kotouč "SG"

Vzorek 11a	bod	mp ve směru x			mp ve směru y		
	1	29,5	35,4	26,1	10,7	10,9	11,9
	2	24,7	22,1	21,6	20,3	23,3	20,9
	3	30,1	33,4	31,8	12,2	11,5	10,6
	4	31,8	34,7	33,5	11,3	11,7	10,6
	5	20,0	24,6	28,9	20,5	21,2	19,4
Průměrná hodnota mp (mV)		28,5			15,1		
Vzorek 11b	bod	mp ve směru x			mp ve směru y		
	1	27,6	28,1	27,1	12,0	11,8	12,2
	2	30,0	27,1	32,4	10,9	11,2	11,4
	3	15,8	24,3	27,3	16,2	16,3	16,0
	4	31,3	29,9	30,4	10,3	10,4	10,6
	5	19,3	19,2	19,7	11,9	12,1	10,7
Průměrná hodnota mp (mV)		26,0			12,3		
Vzorek 11c	bod	mp ve směru x			mp ve směru y		
	1	20,3	23,3	23,0	22,3	13,6	21,1
	2	37,6	42,3	42,1	11,7	11,8	12,3
	3	64,7	61,2	57,6	13,4	29,8	21,3
	4	45,1	51,5	52,6	31,2	31,2	17,3
	5	32,3	27,2	30,1	12,6	12,9	13,3
Průměrná hodnota mp (mV)		40,7			18,4		
Vzorek 11d	bod	mp ve směru x			mp ve směru y		
	1	21,9	22,9	21,0	20,9	18,6	20,2
	2	31,1	31,6	32,8	11,3	11,6	11,4
	3	29,5	31,6	27,7	12,1	11,9	11,9
	4	25,3	22,2	25,8	24,8	21,2	21,8
	5	25,0	32,7	25,7	14,7	13,6	14,0
Průměrná hodnota mp (mV)		27,1			16,0		
Vzorek 11e	bod	mp ve směru x			mp ve směru y		
	1	38,3	34,0	34,7	31,5	28,0	33,0
	2	27,4	34,7	33,3	14,1	15,1	18,8
	3	22,9	22,8	22,6	16,6	18,8	15,9
	4	26,0	28,4	27,1	14,1	14,4	11,6
	5	24,3	24,3	24,5	12,5	12,5	12,1
Průměrná hodnota mp (mV)		28,5			18,0		
Celková průměrná hodnota mp (mV)		30,2 ± 8,3			16,0 ± 3,4		

Hodnoty mp pro podmínky broušení: ocel 12 050, hloubka záběru 0,01 mm, kotouč " Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>"

Vzorek 3a	bod	mp ve směru x			mp ve směru y		
	1	45,8	44,6	47,2	46,1	48,6	51,3
	2	56,5	54,9	57,7	38,5	46,4	48,9
	3	58,3	56,4	58,3	52,3	50,6	46,2
	4	50,7	51,3	53,2	38,6	39,6	47,8
	5	44,7	44,6	39,9	48,3	50,2	49,6
Průměrná hodnota mp (mV)		50,9			46,9		
Vzorek 3b	bod	mp ve směru x			mp ve směru y		
	1	44,8	49,1	54,2	49,2	54,1	51,5
	2	46,6	60,1	58,8	34,7	40,9	41,9
	3	53,4	58,7	55,5	53,2	48,3	45,5
	4	47,9	60,9	62,4	36,2	36,7	33,4
	5	64,1	61,8	65,3	59,1	54,6	57,3
Průměrná hodnota mp (mV)		56,2			46,4		
Vzorek 3c	bod	mp ve směru x			mp ve směru y		
	1	36,1	44,5	44,9	48,8	52,7	52,6
	2	47,6	53,1	54,8	34,7	31,9	37,1
	3	48,1	48,6	48,8	57,8	57,9	46,5
	4	57,5	54,9	52,6	43,2	44,3	49,5
	5	49,1	56,2	45,2	55,6	56,4	44,8
Průměrná hodnota mp (mV)		49,5			47,6		
Vzorek 3d	bod	mp ve směru x			mp ve směru y		
	1	33,6	47,1	46,5	38,9	53,1	53,6
	2	49,8	48,5	52,8	55,9	54,6	53,3
	3	48,3	49,8	50,3	54,2	51,9	65,6
	4	62,5	64,4	63,5	42,4	45,5	39,7
	5	49,1	54,2	52,7	52,4	34,4	44,8
Průměrná hodnota mp (mV)		51,5			49,4		
Vzorek 3e	bod	mp ve směru x			mp ve směru y		
	1	50,3	47,9	48,3	43,9	44,9	49,3
	2	57,7	63,9	62,3	32,4	36,3	38,8
	3	59,2	53,7	53,7	40,5	47,5	50,4
	4	57,5	52,1	54,7	46,7	49,8	49,5
	5	52,5	49,9	50,4	43,1	49,8	59,3
Průměrná hodnota mp (mV)		54,3			45,5		
Celková průměrná hodnota mp (mV)		52,5 ± 3,8			47,2 ± 2		

Hodnoty mp pro podmínky broušení: ocel 12 050, hloubka záběru 0,03 mm, kotouč "Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>"

Vzorek 6a	bod	mp ve směru x			mp ve směru y		
	1	79,2	50,9	48,6	43,1	44,5	44,1
	2	64,1	63,2	67,2	55,5	35,9	44,2
	3	64,2	68,1	64,8	39,1	43,2	38,7
	4	57,9	57,1	42,7	43,3	34,3	38,2
	5	52,7	54,1	56,2	56,3	55,7	39,7
Průměrná hodnota mp (mV)		59,4			43,7		
Vzorek 6b	bod	mp ve směru x			mp ve směru y		
	1	49,1	50,2	53,9	36,6	50,6	45,2
	2	56,6	62,9	71,3	61,5	45,1	41,3
	3	53,4	58,8	57,9	65,1	60,5	57,2
	4	65,2	61,2	66,8	48,6	48,9	49,3
	5	53,2	55,0	57,4	45,6	51,5	40,5
Průměrná hodnota mp (mV)		58,2			49,8		
Vzorek 6c	bod	mp ve směru x			mp ve směru y		
	1	38,9	47,6	48,2	63,0	70,4	61,4
	2	46,2	51,2	54,3	57,9	50,2	44,1
	3	59,2	58,7	59,2	45,4	43,9	57,7
	4	59,4	51,4	58,6	46,3	46,7	53,9
	5	52,8	38,6	57,2	54,8	45,1	54,5
Průměrná hodnota mp (mV)		52,1			53,0		
Vzorek 6d	bod	mp ve směru x			mp ve směru y		
	1	44,1	53,1	51,4	37,9	42,6	45,8
	2	56,5	61,3	55,9	37,5	41,3	40,4
	3	56,6	49,4	62,3	50,6	53,6	46,7
	4	55,3	67,9	46,3	45,7	58,5	42,8
	5	36,6	52,8	60,4	50,3	44,1	42,6
Průměrná hodnota mp (mV)		54,0			45,4		
Vzorek 6e	bod	mp ve směru x			mp ve směru y		
	1	38,9	50,3	58,3	39,7	42,8	40,2
	2	54,7	61,9	60,4	54,3	46,3	49,5
	3	60,3	64,9	58,6	49,5	48,8	43,4
	4	61,4	59,1	61,3	53,2	54,3	49,7
	5	58,1	58,4	60,2	41,3	43,3	45,5
Průměrná hodnota mp (mV)		57,8			46,8		
Celková průměrná hodnota mp (mV)		56,3 ± 4,3			47,7 ± 5,1		

Hodnoty mp pro podmínky broušení: ocel 12 050.1, hloubka záběru 0,01 mm, kotouč "SG"

Vzorek 9a	bod	mp ve směru x			mp ve směru y		
	1	38,9	38,9	43,6	22,2	29,3	32,4
	2	45,5	46,6	48,1	28,2	31,2	31,3
	3	37,3	38,1	33,1	40,6	42,8	28,8
	4	52,7	48,2	50,6	29,4	31,4	32,3
	5	39,1	44,4	43,3	46,3	46,9	36,8
Průměrná hodnota mp (mV)		43,2			34,0		
Vzorek 9b	bod	mp ve směru x			mp ve směru y		
	1	37,7	43,7	29,9	30,3	27,8	30,3
	2	40,6	39,9	44,7	27,5	25,2	28,3
	3	33,1	39,9	41,4	25,2	26,8	28,3
	4	37,1	39,5	41,2	43,6	41,9	31,6
	5	37,5	38,1	34,5	38,3	38,4	31,1
Průměrná hodnota mp (mV)		38,6			31,6		
Vzorek 9c	bod	mp ve směru x			mp ve směru y		
	1	45,3	37,5	47,6	26,7	24,3	24,1
	2	53,5	45,1	52,1	26,7	25,7	28,6
	3	56,8	55,6	58,1	28,9	26,4	31,3
	4	62,7	59,1	62,7	23,4	25,8	23,1
	5	54,4	56,4	56,9	23,1	22,2	21,7
Průměrná hodnota mp (mV)		53,6			25,5		
Vzorek 9d	bod	mp ve směru x			mp ve směru y		
	1	53,2	44,4	54,5	27,2	34,6	30,3
	2	57,5	52,7	56,6	49,9	34,4	33,7
	3	59,7	55,9	47,1	39,9	30,1	46,1
	4	56,9	53,1	49,4	37,9	43,5	29,1
	5	44,6	37,3	33,8	27,4	37,4	36,7
Průměrná hodnota mp (mV)		50,4			35,9		
Vzorek 9e	bod	mp ve směru x			mp ve směru y		
	1	47,9	48,1	43,2	34,9	33,5	35,8
	2	43,5	44,9	54,6	47,2	27,1	33,6
	3	42,7	38,9	43,4	33,1	48,3	29,2
	4	38,7	47,2	37,9	32,8	38,3	47,9
	5	34,5	41,9	39,6	34,1	23,4	35,6
Průměrná hodnota mp (mV)		43,1			35,7		
Celková průměrná hodnota mp (mV)		45,8 ± 8,4			32,5 ± 6		

Hodnoty mp pro podmínky broušení: ocel 12 050.1, hloubka záběru 0,03 mm, kotouč "SG"

Vzorek 12a	bod	mp ve směru x			mp ve směru y		
	1	46,2	38,9	46,8	34,1	48,6	46,3
	2	47,3	51,1	49,9	51,9	57,4	58,7
	3	47,1	33,9	50,9	37,1	53,4	51,2
	4	51,3	50,5	39,8	39,1	45,8	42,4
	5	47,2	43,8	47,3	37,2	40,6	42,5
Průměrná hodnota mp (mV)		46,1			45,8		
Vzorek 12b	bod	mp ve směru x			mp ve směru y		
	1	44,2	45,2	48,5	49,8	52,8	56,9
	2	42,4	53,7	48,7	53,2	50,3	53,1
	3	42,7	36,1	48,3	60,7	47,7	54,2
	4	41,6	46,5	56,1	36,8	38,7	34,1
	5	47,5	42,5	45,1	48,9	38,7	42,7
Průměrná hodnota mp (mV)		45,9			47,9		
Vzorek 12c	bod	mp ve směru x			mp ve směru y		
	1	39,9	48,4	46,8	25,9	41,1	34,4
	2	57,5	68,2	58,4	46,4	38,9	47,6
	3	59,9	61,7	61,3	50,5	60,8	49,4
	4	58,3	58,7	57,2	53,6	49,9	52,5
	5	50,4	51,9	55,4	49,9	52,1	52,4
Průměrná hodnota mp (mV)		55,6			47,0		
Vzorek 12d	bod	mp ve směru x			mp ve směru y		
	1	37,7	40,5	38,4	32,6	49,2	34,4
	2	41,6	40,5	42,5	34,5	53,4	32,1
	3	43,7	42,8	42,5	65,2	69,6	62,3
	4	44,6	45,1	43,7	54,1	66,1	67,9
	5	45,1	43,3	42,9	57,2	59,5	56,8
Průměrná hodnota mp (mV)		42,3			53,0		
Vzorek 12e	bod	mp ve směru x			mp ve směru y		
	1	47,9	48,5	49,3	44,4	45,1	31,7
	2	52,3	50,3	50,4	74,2	68,6	75,2
	3	47,3	49,8	46,7	65,9	64,6	61,8
	4	43,5	43,9	46,2	49,9	34,8	53,8
	5	39,4	39,2	39,2	50,7	49,3	48,8
Průměrná hodnota mp (mV)		46,3			54,6		
Celková průměrná hodnota mp (mV)		47,3 ± 6,9			49,7 ± 5,4		

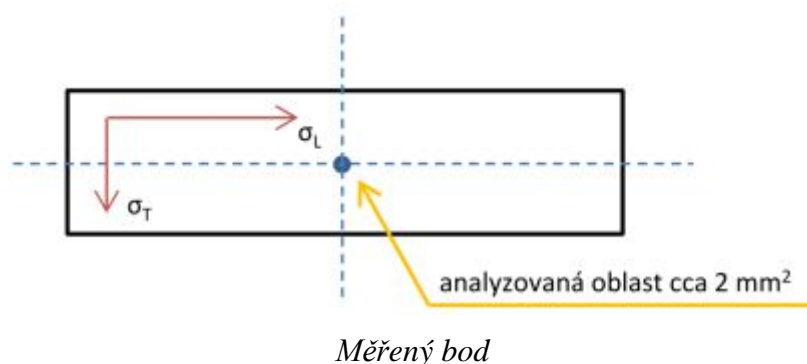
## Výsledky z rentgenové difrakce

Pro zjištění, jaký druh zbytkového napětí v broušených vzorcích převládá a pro porovnání velikosti zbytkového napětí byla u dvanácti vzorků provedena rentgenová difrakce, která je další nedestruktivní metodou pro zjišťování zbytkového napětí. Pro zkoumání pomocí rentgenové difrakce byl vybrán vždy jeden vzorek od každé podmínky (tab. 2) a měření bylo provedeno v jednom bodu, přibližně ve středu vzorku (obr. níže), čemuž odpovídají tři hodnoty  $m_p$  na třetí pozici (příloha 1, 2, 3). Průměrná hodnota hodnot na třetí pozici je vyznačena v tabulkách níže.

Je vhodné poznamenat, že metoda rentgenové difrakce zjišťuje zbytkové napětí ve velmi tenké povrchové vrstvě. Tato vrstva se pohybuje v řádech  $\mu\text{m}$ . Měření pomocí analýzy Barkhausenova šumu zjišťuje hodnotu  $m_p$  v hloubce několika setin mm. Přesnou hloubku nelze určit, protože na ní má vliv tzv. útlum (kapitola 3.1).

V úvodu bylo také řečeno, že tlaková napětí snižují hodnotu magnetoelastického parametru a tahová napětí zvyšují hodnotu  $m_p$ . Všechny hodnoty z rentgenové difrakce byly záporné. V povrchové vrstvě tedy převládalo tlakové zbytkové napětí. Mělo by tedy znamenat, že čím vyšší záporná hodnota z rentgenové difrakce, tím menší hodnota  $m_p$ . Z výsledků hodnot se tato teorie potvrdila jen u některých hodnot. Je pravděpodobné, že na to mělo vliv právě hloubka, ve které došlo ke snímání.

Měření potvrdilo, že hodnoty ve směru  $\sigma_T$ , což by odpovídalo směru  $y$  (směr kolmý ke směru posuvu) u analýzy Barkhausenova šumu, jsou menší než ve směru  $\sigma_L$ , což by odpovídalo směru  $x$  (směr ve směru posuvu) u Barkhausenova šumu. U oceli třídy 12 jsou hodnoty z rentgenové difrakce menší než u oceli třídy 19 a 14, což je zřejmě dáno menší tvrdostí oceli. Například nejmenší hodnota  $-64$  MPa koresponduje s největší hodnotou magnetoelastického parametru  $61,3$  mV.



**Ocel 19 733.4***Hodnoty z difrakční analýzy a Barkhausenova šumu*

Vzorek	$\sigma_L$ , MPa	$\sigma_T$ , MPa	$\langle W \rangle$ , deg	Hodnoty mp (směr x), mV	Hodnoty mp (směr y), mV
1a	-422	-730	2,57	18,4	11,8
4b	-403	-663	2,59	27,8	15,8
7d	-309	-697	2,82	16,6	14,8
10c	-294	-732	2,71	18,8	14,3

**Ocel 14 100.4***Hodnoty z difrakční analýzy a Barkhausenova šumu*

Vzorek	$\sigma_L$ , MPa	$\sigma_T$ , MPa	$\langle W \rangle$ , deg	Hodnoty mp (směr x), mV	Hodnoty mp (směr y), mV
2b	-289	-476	1,89	20,6	29,0
5a	-336	-551	2,32	19,2	17,3
8d	-500	-655	2,59	15,7	17,9
11a	-493	-635	2,37	31,8	11,4

**Ocel 12 050***Hodnoty z difrakční analýzy a Barkhausenova šumu*

Vzorek	$\sigma_L$ , MPa	$\sigma_T$ , MPa	$\langle W \rangle$ , deg	Hodnoty mp (směr x), mV	Hodnoty mp (směr y), mV
3a	-177	-313	1,38	57,7	49,7
6e	-64	-249	1,35	61,3	47,2
9e	-129	-270	1,40	41,6	36,9
12a	-158	-300	1,37	44,0	47,2

## Hodnoty tvrdosti

Pro výsledky experimentu byly změřeny tvrdosti některých zkoumaných vzorků. Ke zjištění tvrdosti byla použita metoda dle Vickerse, protože tato zkouška je vhodná pro tvrdé i měkké materiály. Zkouška byla provedena při malém zatížení HV 2 při nominální hodnotě zkušebního zatížení  $F = 19,61 \text{ N}$ .

Metoda: Vickers

Objektiv: 40x

Zatížení: HV 2

Doba zatížení: 10 s

### Ocel 19 733.4

#### Vzorek 1e

měření	Kraj A			Střed			Kraj B			
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	4
d1 [ $\mu\text{m}$ ]	81.8	82.7	83.3	91.7	93.8	89.8	91.5	92.8	90.7	92.8
d2 [ $\mu\text{m}$ ]	82.2	80.0	81.6	92.6	93.6	88.9	90.8	93.4	92.6	93.3
d [ $\mu\text{m}$ ]	82.0	81.3	82.5	92.2	93.7	89.3	91.1	93.1	91.7	93.0
HV 2	551.0	560.4	545.5	436.6	422.2	464.6	446.4	427.9	441.5	428.5
Průměr HV 2	552,3			441,1			436,1			

#### Vzorek 4a

měření	Kraj A					Střed					Kraj B		
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3
d1 [ $\mu\text{m}$ ]	83.1	81.5	76.1	84.4	78.9	84.3	78.1	82.5	81.4	78.4	81.6	79.3	82.6
d2 [ $\mu\text{m}$ ]	81.6	79.0	81.1	82.1	83.7	81.2	80.8	81.2	80.0	82.8	78.7	82.0	77.7
d [ $\mu\text{m}$ ]	82.4	80.2	78.6	83.2	81.3	82.7	79.5	81.8	80.7	80.6	80.2	80.7	80.1
HV 2	546.6	576.2	600.5	535.3	561.0	541.6	587.4	553.8	569.5	570.5	576.7	569.6	577.8
Průměr HV 2	563.9					564.5					574.7		

#### Vzorek 4d

měření	Kraj A				Střed					Kraj B				
	1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
d1 [ $\mu\text{m}$ ]	83.3	81.6	83.9	86.4	78.5	79.6	83.9	80.4	79.3	80.0	79.6	83.7	82.5	81.0
d2 [ $\mu\text{m}$ ]	83.3	86.2	88.1	85.5	81.6	79.8	84.7	83.3	85.2	80.8	80.0	79.4	83.1	83.7
d [ $\mu\text{m}$ ]	83.3	83.9	86.0	86.0	80.1	79.7	84.3	81.9	82.2	80.4	79.8	81.5	82.8	82.4
HV 2	534.7	526.8	501.7	501.9	578.4	583.8	521.5	553.3	548.5	573.6	582.6	557.7	541.1	546.7
Průměr HV 2	516.3				557.1					560.3				



Vzorek 4e

měření	Kraj A			Střed				Kraj B			
	1	2	3	1	2	3	4	1	2	3	4
d1 [μm]	81.4	81.3	82.5	94.3	91.9	87.4	87.0	84.7	87.0	86.8	87.4
d2 [μm]	82.9	83.3	81.2	93.0	91.1	89.5	87.8	85.6	87.2	88.3	86.4
d [μm]	82.2	82.3	81.8	93.6	91.5	88.4	87.4	85.2	87.1	87.5	86.9
HV 2	549.1	547.7	553.9	423.1	443.0	474.2	485.3	511.5	488.9	484.0	491.0
Průměr HV 2	550.2			456.4				493.8			

Vzorek 10a

měření	Kraj A					Střed					Kraj B			
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4
d1 [μm]	90.1	91.5	88.8	90.3	85.7	82.9	81.6	88.0	88.5	81.5	77.5	80.2	81.4	78.8
d2 [μm]	91.3	91.0	90.7	84.9	89.4	85.7	85.5	88.6	85.0	90.3	85.6	80.6	80.4	84.9
d [μm]	90.7	91.2	89.8	87.6	87.6	84.3	83.5	88.3	86.7	85.9	81.5	80.4	80.9	81.8
HV 2	450.7	445.5	460.1	483.2	483.4	522.0	531.4	475.3	493.3	502.7	557.9	573.9	566.5	554.1
Průměr HV 2	464.6					504.9					563.1			

Vzorek 10b

měření	Kraj A						Střed				Kraj B			
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	1	2	3	4
d1 [μm]	76.3	76.5	78.7	78.7	77.7	79.3	80.8	76.7	76.3	78.2	78.3	79.6	81.0	82.9
d2 [μm]	78.5	75.3	77.8	78.4	80.3	78.2	80.7	81.4	80.1	79.3	85.9	82.7	80.2	79.7
d [μm]	77.4	75.9	78.3	78.5	79.0	78.7	80.8	79.1	78.2	78.8	82.1	81.1	80.6	81.3
HV 2	618.8	644.4	605.4	601.2	594.3	598.0	568.4	593.4	606.2	597.4	549.9	563.6	570.8	560.9
Průměr HV 2	610.3						591.4				561.3			

## Ocel 14 100.1

Vzorek 8a

měření	Kraj A				Střed				Kraj B		
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3
d1 [μm]	78.3	79.6	73.6	79.4	79.2	81.6	78.8	79.0	80.0	78.8	80.6
d2 [μm]	81.9	80.2	82.3	80.2	81.2	82.0	78.7	82.6	79.4	81.7	80.1
d [μm]	80.1	79.9	77.9	79.8	80.2	81.8	78.7	80.8	79.7	80.2	80.4
HV 2	578.2	581.0	610.5	582.4	576.8	554.0	598.1	568.0	584.1	576.1	574.0
Průměr HV 2	588.0				574.2				578.1		

Vzorek 8b

měření	Kraj A			Střed			Kraj B			
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	4
d1 [μm]	81.4	81.8	81.8	78.0	79.8	77.5	93.6	106.6	107.5	109.1
d2 [μm]	80.3	79.6	79.9	78.7	80.0	82.4	97.7	112.2	109.5	107.2
d [μm]	80.9	80.7	80.9	78.3	79.9	80.0	95.7	109.4	108.5	108.1
HV 2	567.1	568.9	567.1	604.5	581.1	580.0	405.2	310.1	314.9	317.1
<b>Průměr HV 2</b>	567.7			588.5			336.9			

Vzorek 11b

měření	Kraj A			Střed			Kraj B				
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	4	5
d1 [μm]	76.7	76.9	79.4	79.4	80.2	79.4	83.7	80.0	82.0	84.1	81.4
d2 [μm]	80.2	80.2	78.3	80.6	79.8	82.2	79.9	81.0	81.8	79.8	78.7
d [μm]	78.4	78.6	78.8	80.0	80.0	80.8	81.8	80.5	81.9	81.9	80.1
HV 2	602.8	601.0	596.8	579.2	579.6	567.9	554.1	572.0	552.4	552.3	578.6
<b>Průměr HV 2</b>	600.2			575.6			561.9				

Vzorek 11c

měření	Kraj A			Střed				Kraj B		
	1	2	3	1	2	3	4	1	2	3
d1 [μm]	82.0	79.8	80.2	81.0	80.6	80.2	80.8	84.1	82.3	81.2
d2 [μm]	80.2	81.4	81.2	83.3	84.3	80.8	80.0	81.1	82.2	84.1
d [μm]	81.1	80.6	80.7	82.2	82.5	80.5	80.4	82.6	82.2	82.7
HV 2	563.7	571.0	569.1	549.5	545.4	572.0	573.5	543.0	548.5	542.7
<b>Průměr HV 2</b>	568.0			560.1				544.7		

Vzorek 11d

měření	Kraj A				Střed				Kraj B			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
d1 [μm]	81.2	78.5	79.4	78.8	80.4	79.8	79.6	77.7	83.9	79.6	79.6	79.8
d2 [μm]	80.8	80.9	80.4	83.1	80.2	78.3	80.8	82.1	79.4	80.6	78.0	81.0
d [μm]	81.0	79.7	79.9	80.9	80.3	79.1	80.2	79.9	81.7	80.1	78.8	80.4
HV 2	565.4	583.4	581.0	566.4	575.3	593.2	576.2	580.5	556.0	578.5	597.6	574.2
<b>Průměr HV 2</b>	574.0				581.3				576.6			

Vzorek 11e

měření	Kraj A			Střed				Kraj B		
	1	2	3	1	2	3	4	1	2	3
d1 [μm]	79.9	79.5	80.0	79.8	78.0	79.4	80.2	80.6	80.6	80.8
d2 [μm]	82.3	81.7	81.6	80.2	83.5	78.7	81.5	79.5	81.0	80.2
d [μm]	81.1	80.6	80.8	80.0	80.7	79.1	80.8	80.1	80.8	80.5
HV 2	564.0	570.6	568.4	579.6	568.8	593.4	567.6	578.7	568.2	572.3
<b>Průměr HV 2</b>	567.7			577.3				573.1		

Ocel 12 050.1

Vzorek 9a

měření	Kraj A				Střed				Kraj B		
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3
d1 [μm]	135.2	134.3	132.8	136.9	131.1	131.1	132.7	131.0	135.0	133.6	131.8
d2 [μm]	128.0	133.7	129.9	130.2	130.2	134.3	132.8	131.8	133.4	133.6	134.2
d [μm]	131.6	134.0	131.3	133.6	130.7	132.7	132.7	131.4	134.2	133.6	133.0
HV 2	214.2	206.6	215.0	207.9	217.1	210.5	210.5	214.9	206.0	207.8	209.7
<b>Průměr HV 2</b>	210,9				213,3				207,9		

Vzorek 9b

měření	Kraj A				Střed			Kraj B			
	1	2	3	4	1	2	3	1	2	3	4
d1 [μm]	132.8	132.6	133.6	132.7	131.9	129.4	131.0	134.5	136.0	127.1	134.3
d2 [μm]	130.3	131.9	127.3	131.1	129.4	131.8	130.3	127.1	127.7	131.1	126.9
d [μm]	131.6	132.3	130.4	131.9	130.6	130.6	130.7	130.8	131.8	129.1	130.6
HV 2	214.2	212.0	217.9	213.2	217.4	217.4	217.3	216.8	213.4	222.6	217.4
<b>Průměr HV 2</b>	214,3				217,4			197,1			

Vzorek 9c

měření	Kraj A			Střed				Kraj B			
	1	2	3	1	2	3	4	1	2	3	4
d1 [μm]	143.2	141.9	142.2	148.5	147.2	149.3	148.7	145.6	147.1	146.5	144.4
d2 [μm]	145.1	143.2	141.8	145.9	148.4	147.3	144.4	145.7	144.5	148.2	145.8
d [μm]	144.2	142.6	142.0	147.2	147.8	148.3	146.6	145.7	145.8	147.4	145.1
HV 2	178.3	182.3	183.9	171.1	169.7	168.6	172.5	174.7	174.4	170.7	176.1
<b>Průměr HV 2</b>	181.5			170.5				174.0			

Vzorek 9d

měření	Kraj A				Střed			Kraj B			
	1	2	3	4	1	2	3	1	2	3	4
<b>d1 [μm]</b>	139.2	136.6	138.0	136.4	136.8	135.9	132.9	124.2	127.8	136.0	134.3
<b>d2 [μm]</b>	125.3	137.2	132.4	137.0	129.5	133.5	132.8	139.2	138.4	128.6	133.5
<b>d [μm]</b>	132.3	136.9	135.2	136.7	133.2	134.7	132.9	131.7	133.1	132.3	133.9
<b>HV 2</b>	212.0	197.9	202.8	198.5	209.2	204.4	210.1	213.8	209.3	211.9	206.8
<b>Průměr HV 2</b>	202,8				207,9			210,5			

Vzorek 12b

měření	Kraj A			Střed				Kraj B		
	1	2	3	1	2	3	4	1	2	3
<b>d1 [μm]</b>	138.4	135.2	135.9	137.6	133.6	135.2	132.8	140.9	137.6	133.6
<b>d2 [μm]</b>	136.8	141.7	135.2	135.1	133.6	134.5	136.2	135.2	137.5	140.0
<b>d [μm]</b>	137.6	138.4	135.5	136.4	133.6	134.8	134.5	138.0	137.6	136.8
<b>HV 2</b>	196.0	193.5	201.9	199.4	207.8	204.0	204.9	194.6	196.0	198.1
<b>Průměr HV 2</b>	197,1			204,0				196,2		

Vzorek 12c

měření	Kraj A				Střed				Kraj B		
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3
<b>d1 [μm]</b>	143.5	144.7	142.7	150.3	152.4	151.1	148.9	147.8	146.2	143.9	144.8
<b>d2 [μm]</b>	142.6	147.1	149.8	148.6	150.2	148.7	146.8	151.6	143.5	145.8	143.2
<b>d [μm]</b>	143.1	145.9	146.3	149.5	151.3	149.9	147.9	149.7	144.9	144.9	144.0
<b>HV 2</b>	181.1	174.2	173.2	166.0	162.0	165.0	169.5	165.5	176.6	176.6	178.8
<b>Průměr HV 2</b>	173.6				165.5				177.3		

Vzorek 12d

měření	Kraj A				Střed				Kraj B			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
<b>d1 [μm]</b>	133.5	132.8	136.8	133.5	138.2	136.8	137.6	146.5	139.6	132.2	131.3	128.5
<b>d2 [μm]</b>	129.4	140.0	138.4	129.6	135.1	130.2	134.4	130.5	138.7	129.4	134.3	138.2
<b>d [μm]</b>	131.5	136.4	137.6	131.6	136.6	133.5	136.0	138.5	139.2	130.8	132.8	133.4
<b>HV 2</b>	214.6	199.4	195.9	214.2	198.6	208.0	200.5	193.3	191.4	216.8	210.4	208.5
<b>Průměr HV 2</b>	206,0				200,1				206,8			

Vzorek 12e

	Kraj A				Střed				Kraj B			
měření	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
<b>d1 [μm]</b>	139.3	138.3	127.7	136.6	134.2	141.6	141.7	132.0	126.1	140.1	131.9	138.2
<b>d2 [μm]</b>	136.0	132.6	148.1	135.3	145.0	139.8	134.6	137.7	141.5	140.3	142.5	131.1
<b>d [μm]</b>	137.6	135.4	137.9	135.9	139.6	140.7	138.1	134.9	133.8	140.2	137.2	134.7
<b>HV 2</b>	195.8	202.2	195.1	200.7	190.2	187.3	194.4	203.9	207.1	188.6	197.1	204.5
<b>Průměr HV 2</b>	198,4				193,9				199,3			