



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

# HODNOCENÍ POVRCHOVÝCH A PODPOVRCHOVÝCH VLASTNOSTÍ OBRÁBĚNÉHO POVRCHU METODOU ANALÝZY BARKHAUSENOVA ŠUMU (BNA)

EVALUATION OF THE MACHINED SURFACE AND SUBSURFACE PROPERTIES USING BARKHAUSEN  
NOISE ANALYSIS

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Dominik Blažíček

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Jiří Švejcar, CSc.

BRNO 2018

## Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav materiálových věd a inženýrství  
Student: **Bc. Dominik Blažíček**  
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství  
Studijní obor: Materiálové inženýrství  
Vedoucí práce: **prof. Ing. Jiří Švejcar, CSc.**  
Akademický rok: 2017/18

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

### **Hodnocení povrchových a podpovrchových vlastností obráběného povrchu metodou analýzy Barkhausenova šumu (BNA)**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Účelem práce je experimentálně ověřit použitelnost nedestruktivní metody BNA pro hodnocení integrity obráběného povrchu a ukázat a ověřit vazbu parametrů z BNA s některými dalšími parametry integrity povrchu u vybraných typů ocelí.

#### **Cíle diplomové práce:**

Cílem diplomové práce pro studenta je seznámit se důkladně s metodou analýzy Barkhausenova šumu a jejího využití pro hodnocení integrity obráběného povrchu. Na příkladech zejména z oblasti průmyslu dopravních zařízení má zpracovatel demonstrovat metodu BNA pro hodnocení stavu povrchových a podpovrchových vrstev dílu po obrábění.

#### **Seznam doporučené literatury:**

KARPUSCHEWSKI, B. Introduction to micromagnetic techniques. Proceedings of 1 st International Conference on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing, September 1-2, 1998, Hannover – Germany.

DUBOIS, M., FISET, M. Evaluation of case depth on steels by Barkhausen noise measurements. Mater Sci Technol. 1995.

MOORTHY, V., SHAW, B. A. Magnetic Barkhausen emission measurement for evaluation of depth of material properties in gears. NDT&E, 2008.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18.

V Brně, dne 27. 10. 2017



A handwritten signature in blue ink, appearing to be "Ivo Dlouhý".

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.  
ředitel ústavu

A handwritten signature in blue ink, appearing to be "Jaroslav Katolický".

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

## Abstrakt:

Diplomová práce se zabývá vlivem operace frézování na výslednou integritu povrchu ozubených kol, která je měřena metodou analýzy Barkhausenova šumu. K řešení problému byly použity dvě série kol frézovaných různou technologií, ale za srovnatelných podmínek. Po výrobních operacích chemicko-tepelného zpracování a broušení byly provedeny analýzy integrity povrchu. Experimentem bylo zjištěno, že ovlivnění povrchové a podpovrchové vrstvy, způsobené frézováním, zůstává v materiálu i po operaci tepelného zpracování a broušení. Na základě těchto výsledků lze tvrdit, že frézování ovlivňuje výslednou integritu povrchu po TZ.

## Klíčová slova:

Metoda Analýza Barkhausenova šumu, integrita povrchu, zbytkové napětí

## Abstract:

Master thesis deals with the influence of milling to resulting surface integrity of gear tested by Barkhausen Noise Analysis technique. Two sets of gears milled by different machines by comparable parameters were used to solve the task. The testing of surface integrity was carried out after heat treatment and final grinding. It was experimentally approved the effected surface/subsurface damage caused by milling remains in the material through the heat treatment. Based on these results, it can be assumed that different milling affects the resulting surface integrity after HT.

## Key words:

Barkhausen noise analysis, surface integrity, residual stress

## **Bibliografická citace**

BLAŽÍČEK, D. *Hodnocení povrchových a podpovrchových vlastností obráběného povrchu metodou analýzy Barkhausenova šumu (BNA)*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 62 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Jiří Švejcar, CSc.

## **Prohlášení**

*Já, Dominik Blažíček prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Hodnocení povrchových a podpovrchových vlastností obráběného povrchu metodou analýzy Barkhausenova šumu (BNA) vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na konci práce.*

*V Brně dne: 25. 5. 2018*

*Podpis: .....*

*Dominik Blažíček*

## **Poděkování**

Tímto děkuji prof. Ing. Jiřímu Švejcarovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále děkuji firmě PCS spol. s.r.o. za poskytnutí měřicího přístroje Rollscan a potřebných snímačů.

## Obsah

1. Úvod.....	10
2. Cíle práce .....	11
3. Integrita povrchu .....	12
4. Zbytkové napětí .....	14
4.1. Vznik zbytkového napětí .....	16
4.2. Typy zbytkového napětí .....	18
4.3. Měření zbytkového napětí .....	21
4.3.1. Metoda chemického leptání.....	23
4.3.2. Magnetická metoda .....	23
4.3.3. Ultrazvukové metody.....	23
4.3.4. Odvrtávací metoda .....	24
4.3.5. Rentgenová difrakce .....	26
5. Analýza Barkhausenova šumu .....	27
5.1. Historie .....	27
5.2. Feromagnetismus.....	28
5.3. Princip.....	30
5.4. Faktory ovlivňující měření .....	32
5.5. Měřicí zařízení .....	35
5.5.1. RollScan.....	35
5.5.2. Snímače.....	38
5.5.3. Software.....	40
5.5.4. Specializované měřicí zařízení .....	41
6. Experimentální část .....	44
6.1. Experimentální materiál.....	44
6.2. Použité přístroje .....	45
6.3. Experimentální metodiky a výsledky .....	45
6.3.1. Stanovení podmínek měření.....	46
6.3.2. Ruční měření.....	49
6.3.3. Robotické měření.....	49
7. Výsledky měření .....	50
7.1. Ruční měření .....	50

7.2. Robotické měření .....	52
7.3. Korelace výsledků ručního a robotického měření .....	54
8. Diskuze výsledků.....	55
9. Závěr .....	58
Seznam použitých zdrojů .....	59
Seznam použitých symbolů a zkratek.....	63
Seznam použitých obrázků a tabulek .....	64

## 1. Úvod

Otázka integrity povrchu a konkrétně zbytkového napětí je v současné době velmi aktuální. Je samozřejmostí, že zákazník si předepisuje integritu povrchu ve smyslu drsnosti povrchu, tvrdosti, geometrické přesnosti atd. V současné době stále více zákazníků vyžaduje i kontrolu zbytkového napětí. Přítomnost zbytkového napětí je způsobena mimo jiné plastickou deformací při obrábění (soustružení, broušení aj.). Každá výrobní operace a způsob jejího provedení má na výsledné zbytkové napětí v materiálu vliv.

Například broušení, které se velmi často používá jako dokončovací operace, je definováno jako hromadné rychlostní mikrořezání povrchových vrstev těles velmi jemnými zrny brusiva s nedefinovanou geometrií [1]. Velikost plastické deformace v povrchové vrstvě obrobku po broušení je závislá na brusných podmínkách.

Metod, které slouží k určení velikosti zbytkového napětí v materiálu, existuje celá řada. V této diplomové práci bude uveden jejich stručný popis. Větší pozornost bude věnována metodě analýzy Barkhausenova šumu, u které bude detailně popsán její teoretický základ i praktický postup měření.

Na teoretickou část bude navázáno částí experimentální. Ta byla vypracována v rámci projektu, který porovnával vliv frézování na výslednou integritu povrchu výrobku. Cílem bylo potvrdit nebo vyvrátit tvrzení, že primární výrobní operace, v tomto případě frézování, má vliv na výslednou integritu povrchu. K těmto účelům s byly použity dvě skupiny ozubených kol, které se lišily pouze způsobem frézování. Obě skupiny kol byly změřeny nedestruktivní zkouškou analýzy Barkhausenova šumu a výsledné hodnoty magnetoelastického parametru navzájem porovnány.

## 2. Cíle práce

Cílem práce je podrobný popis měření integrity povrchu nedestruktivní metodou analýzy Barkhausenova šumu a publikování výsledků experimentů, které zkoumaly vliv operace frézování na výslednou integritu povrchu.

### 3. Integrita povrchu

Současná situace ve strojním průmyslu je velmi hektická a uspěchaná. Všechny podniky se snaží zkracovat výrobní čas, a tím zvyšovat produktivitu. Tato skutečnost může mít zásadní vliv na kvalitu výrobků (např. součásti daného typu ozubeného kola, ložiska, klikové hřídele). Kvalitu těchto výrobků můžeme také chápat jako jakost obrobeného povrchu neboli integritu povrchu. Integrita povrchu je soubor všech vlastností a charakteristik povrchu vzniklého výrobním procesem na strojní součásti. Hodnotí se zde vlastnosti povrchové plochy a podpovrchové vrstvy vzhledem k vlastnostem základního materiálu.

Jakost obrobeného povrchu můžeme posuzovat podle [2]:

- přesnosti rozměru a tvaru:

Je dána především vlastní přesností stroje a tuhostí systému.

- drsnosti a mikrostruktury:

Tyto vlastnosti jsou přímo ovlivňovány řezným procesem, nejvíce řeznou rychlostí, tvarem, materiálem nástroje atd.

- vlastností povrchové vrstvy:

Sleduje se rozlišnost vlastností povrchových a podpovrchových vrstev oproti vlastnostem základního materiálu. Jejich odlišnost je dána strukturními změnami při tepelném zpracování, popřípadě změnou chemického složení při chemicko-tepelném zpracování, stupněm zpevnění, ale také energetickým působením břitů nástroje.

Důvod, proč můžeme považovat výslednou integritu povrchu za ukazatel kvality výrobků, vyplývá ze statistiky, ze které je zřejmé, že většina poruch strojních součástí vzniká na povrchu nebo velmi těsně pod ním. Z tohoto důvodu mezní stav závisí na lokálních vlastnostech materiálu v nejnámáhanějším místě. Tyto vlastnosti jsou značnou měrou ovlivňovány procesem vytváření nového povrchu, proto znalost mechanismu napomáhá ke zvolení správného procesu a nastavení co nejlepších podmínek.

Na stav integrity povrchu má vliv celá řada vnitřních a vnějších vlivů. Vnější vlivy jsou [3, 4]:

- mechanické (provozní napětí);
- chemické (koroze);
- fyzikální (záření);
- tepelné (fázové změny);
- elektrické (změna magnetických vlastností).

Za vlivy vnější se považují i různé kombinace vnějších vlivů jako koroze pod napětím, elektrochemická koroze nebo technologické procesy (např. tepelné zpracování, tváření, obrábění).

Mezi vlivy vnitřní řadíme [4, 5]:

- zbytková napětí;
- morfologii povrchu (drsnost);
- materiálové a mechanické vlastnosti povrchu (tvrdost, zpevnění, struktura, povrchová úprava);
- přítomnost povrchových a podpovrchových vad (vměstky, trhliny, řediny aj.).

V současné době neexistuje charakteristika, která by komplexně popisovala integritu povrchu jako jeden parametr. V průmyslové praxi se proto integrita povrchu popisuje pomocí těchto složek [5]:

- drsnost povrchu;
- geometrická přesnost;
- změna tvrdosti v povrchové vrstvě;
- změna struktury v povrchové vrstvě;
- tepelné změny;
- trhliny;
- zbytková napětí.

## 4. Zbytkové napětí

Jak bylo řečeno v úvodu, tato diplomová práce se zabývá měřením zbytkového napětí, proto si o něm řekneme něco víc. Zbytkové napětí je takové napětí, které zůstane v pevném materiálu i po odstranění příčiny vzniku za předpokladu plastické deformace povrchové vrstvy. Zbytkové napětí může mít kladný i záporný vliv na mechanické vlastnosti materiálu, konkrétně na životnost, odolnost proti opotřebení a rozměrovou stálost. Zda je efekt kladný, nebo záporný záleží na velikosti a orientaci zbytkového napětí. Obecně se dá říct, že zbytková tahová napětí materiál ovlivňují negativně, a tlaková pozitivně. Tohoto efektu využívá technologická operace tryskání. Během tryskání je na povrch materiálu metáno tzv. abrazivo, např. kuličky, které mají vysokou kinetickou energii a na povrchu vytváří důlky. Při dopadu kuličky na povrch se část energie přemění na mechanickou práci, která způsobí nehomogenní elasticko-plastickou deformaci. Většina kinetické energie se přemění na teplo a zbytek kinetické energie zůstane kuličce, díky níž se od povrchu odrazí. Při vytváření důlků je materiál nejprve pružně zatlačen, čímž v materiálu vzniká tahové pnutí. Následně v podpovrchových vrstvách dojde k překročení meze kluzu a vytvoření trvalého důlku. Po odrazu kuličky se elastická složka deformace vrátí zpět, čímž dojde k zmenšení povrchu v okolí místa dopadu a v materiálu vznikne požadované tlakové napětí. Princip vzniku tlakového napětí v podpovrchové vrstvě je znázorněn na obr. 1. [2, 4, 6]



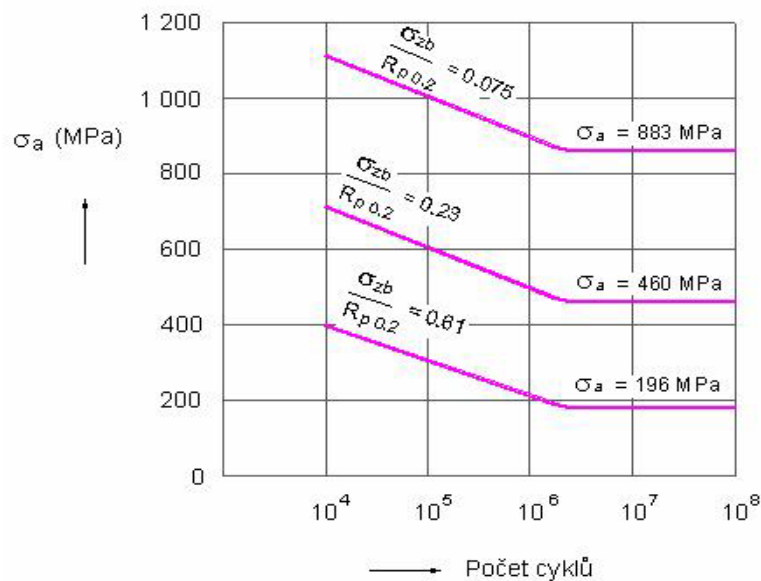
Obrázek 1 Tlakové pnutí [6]

Zbytkové tlakové napětí uvnitř materiálu brání vzniku a šíření únavových trhlin, čímž dochází k zvýšení únavové životnosti. Pokud se na povrchu vyskytují nějaké trhliny, tlakové pnutí má tendenci tyto trhliny „zavírat“ a bránit růstu těchto trhlin. Průběh velikosti tlakového napětí pod povrchem po operaci tryskání je ukázán na obrázku 2. [2, 4, 6]



Obrázek 2 Graf závislosti vnitřního pnutí na hloubce pod povrchem [6]

Jak již bylo zmíněno, tahová zbytková napětí ovlivňují mechanické vlastnosti materiálu negativně. Nejvíce se tento efekt projevuje na únavové životnosti materiálu, která s rostoucím tahovým zbytkovým napětím značně klesá, jak je dobře vidět na obrázku 3. Účinek zbytkového napětí je významně ovlivněn provozní teplotou. Obecně se dá říct, že při provozu součásti při vyšších teplotách může dojít k relaxaci zbytkového napětí. [2, 4]



Obrázek 3 Závislost velikosti zbytkových napětí na mezi únavy v ohybu [2]

## 4.1. Vznik zbytkového napětí

Příčiny vzniku zbytkového napětí mohou být různé, ale vždy musí dojít k dodání určité formy energie. Tato energie může být mechanická, tepelná nebo chemická. Je tedy nutné pamatovat na to, že zbytkové napětí může vzniknout v kterékoliv výrobní operaci, proto se tento typ zbytkového napětí označuje jako technologické. Zbytková napětí mohou vzniknout v povrchové vrstvě pouze za předpokladu plastické deformace. Smysl zbytkového napětí (tah nebo tlak) závisí na tom, jak deformace vzniká. Hlavní příčiny vzniku technologických zbytkových napětí jsou [2, 4, 7]:

**a) nerovnoměrná plastická deformace:**

Nerovnoměrnost je způsobena rozdílně působícími silami v povrchové vrstvě a jádře materiálu. Do materiálu mohou být vnášena nechtěná tahová zbytková napětí vlivem obrábění nebo se do materiálu vnáší záměrně tlaková napětí, například kuličkováním.

**b) nerovnoměrný ohřev či ochlazení:**

Vznik teplotního gradientu. Při běžném způsobu ohřevu materiálu dochází k výraznému zvýšení teploty na povrchu, ale teplota jádra se skoro nemění. Při následném chladnutí dochází ke smrštění povrchu, a tím vzniku plastické deformace a tahových zbytkových napětí na povrchu a tlakových napětí v jádře materiálu. Rozdílu povrchových tahových napětí a tlakových napětí v jádře říkáme tepelná zbytková napětí v povrchové vrstvě.

**c) nerovnoměrné strukturní změny:**

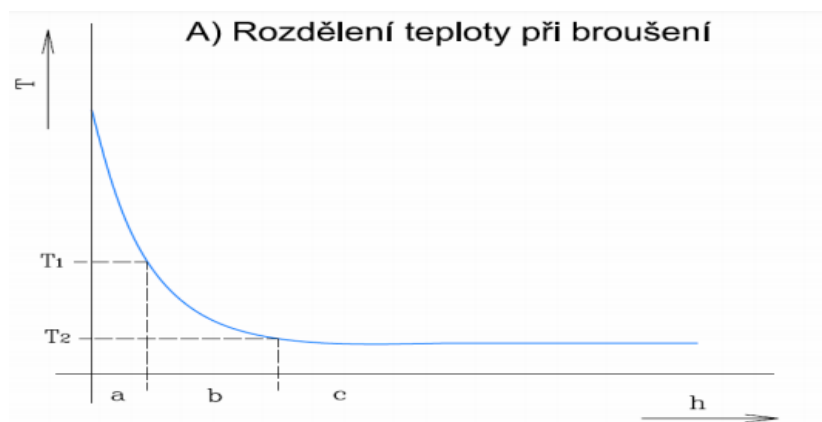
Nerovnoměrné strukturní změny jsou obvykle způsobeny zvýšenou teplotou nebo deformací při obrábění. Dochází k fázové transformaci nebo vylučování jiných strukturních složek, které mají rozdílné fyzikální vlastnosti, mechanické vlastnosti a měrný objem. Důsledek změny objemu uvnitř materiálu dochází ke vzniku tzv. strukturních napětí.

**d) chemické procesy:**

V tomto případě je příčinou vzniku technologických zbytkových napětí především difuze plynů a cizích látek do povrchové vrstvy.

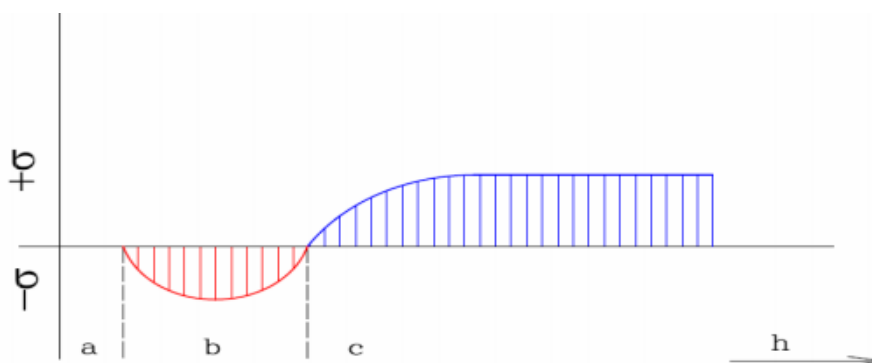
Obecně se dá říct, že každá technologická operace způsobuje změnu zbytkových napětí určitým způsobem a v takovém objemu, ve kterém je schopna vyvolat plastickou deformaci nebo jej tepelně ovlivnit. Velikost technologických zbytkových napětí je ovlivněna velikostí působícího mechanického zatížení a množstvím dodaného tepla při výrobní operaci. Z toho vyplývá, že řezné podmínky (řezná rychlost, velikost třísky aj.), řezné prostředí (chladicí kapalina) a materiál obrobku i nástroje mají zásadní vliv na velikost technologického zbytkového napětí. [2, 7]

Samotný princip vzniku technologických zbytkových napětí není dosud zcela objasněn. Glikmanov a Štěpanov [7] publikovali hypotézu, kterou podložili experimenty. Tato hypotéza ale obsahuje řadu omezení a nemá obecnou platnost. Jejím prvním předpokladem je, že uvažuje pouze tepelný účinek operace. Lze předpokládat, že při obrábění (např. při broušení) je teplota rozložena podle obrázku 4.



Obrázek 4 Rozložení teploty při broušení [7]

Materiál s teplotou větší než  $T_1$  (vrstva **a**) je vlivem tepelného napětí plasticky deformován. Druhým předpokladem je, že tato vrstva **a** je v dokonale plastickém stavu a vrstva **c** nemění svoji teplotu vlivem obrábění. Průběh napětí během obrábění je uveden na obrázku 5. Ve vrstvě **a** není žádné napětí, neboť je v dokonale plastickém stavu. Vrstva **b** se vlivem teplotní roztažnosti snaží zvětšit svůj objem, čemuž brání vrstva **c**. Z toho vyplývá, že v tomto okamžiku bude ve vrstvě **b** tlakové a ve vrstvě **c** tahové napětí.



Obrázek 5 Hloubkový profil napětí během obrábění [7]

Při chladnutí teplota vrstvy **a** klesne pod  $T_1$  a materiál bude mít snahu se smrštit, čemuž ale brání vrstvy **b** a **c**. Proto zde začnou vznikat tahová zbytková napětí. Výsledkem tedy je, že ve vrstvě **a** je zbytkové napětí tahové a ve vrstvách **b** a **c** jsou zbytková napětí tlaková. [7]

Největším nedostatkem Glikmanovy a Štěpanovovy hypotézy je skutečnost, že uvažovali pouze tepelný účinek obrábění, což samozřejmě nevystihuje zcela dobře vznik technologického zbytkového napětí, protože při obrábění je materiál ovlivňován nejen tepelně, ale i mechanicky. Později byla publikována hypotéza, že při vzniku zbytkového napětí při obrábění převažuje tepelný vliv nad mechanickým. Tato hypotéza byla vypracována na základě tepelného modelování zbytkového napětí. [7]

#### 4.2. Typy zbytkového napětí

Zbytkové napětí můžeme dělit podle různých kritérií. Za základní rozdělení lze chápat rozdělení podle velikosti objemu, ve kterém se napětí vyskytují [8,9]:

**a) Zbytková napětí I. druhu – tzv. makroskopická napětí:**

Vyskytují se v celém objemu součástky nebo v její podstatné části. V extrémním případě mohou vést k makroskopické změně tvaru nebo rozměru tělesa.

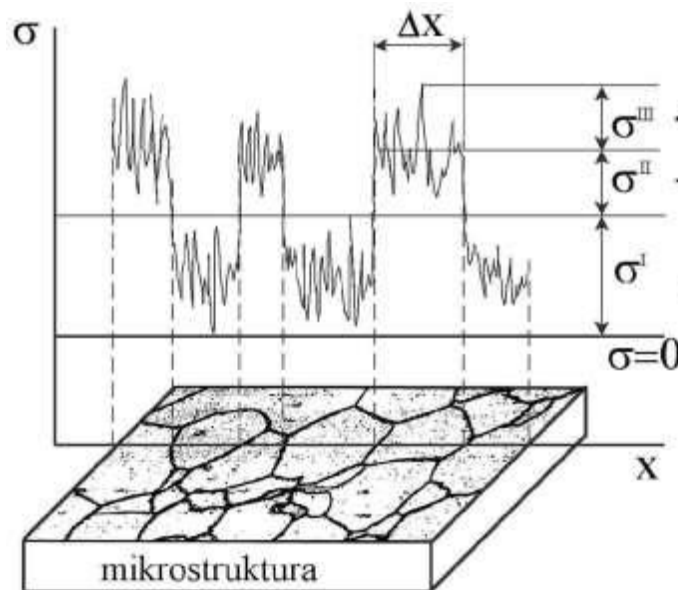
**b) Zbytková napětí II. druhu – tzv. mikroskopická napětí:**

Tento druh zbytkového napětí se vyskytuje v oblasti několika zrn. U vícefázových struktur mohou mít jednotlivá zrna i opačné zbytkové napětí.

**c) Zbytková napětí III. druhu – tzv. submikroskopická napětí:**

Zbytkové napětí, které se vyskytuje v oblasti několika atomových vrstev a nikdy nevyvolá makroskopickou deformaci.

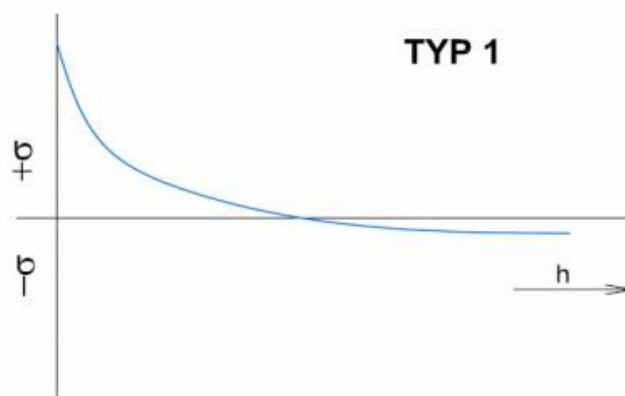
V materiálu se zpravidla všechny druhy vyskytují současně, ale v technické praxi se pojmem zbytkové napětí rozumí makroskopické zbytkové napětí (I. druhu). Princip rozdělení jednotlivých druhů napětí je schematicky znázorněn na obr. 6.



Obrázek 6 Znáznornění makroskopických ( $\sigma'$ ), mikroskopických ( $\sigma''$ ) a submikroskopických ( $\sigma'''$ ) zbytkových napětí [4]

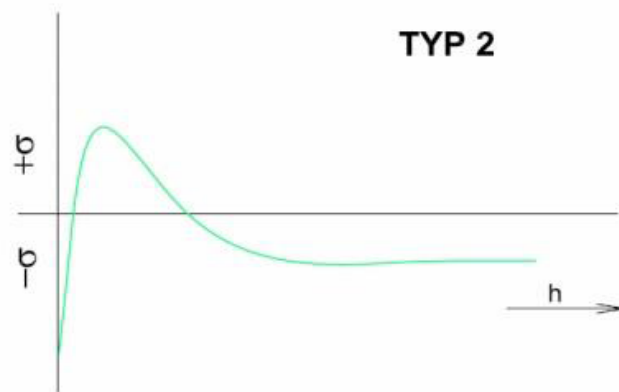
Dalším kritériem pro rozdělení je původ zbytkového napětí. V předchozí části je popsán vznik zbytkových napětí vlivem tepelného ovlivnění, a také je uvedeno, že materiál je ovlivňován i mechanicky. Podle podílu tepelného a mechanického ovlivnění dělíme zbytkové napětí na tři základní typy [8,9]:

- Typ 1** – zbytková napětí, která vznikla tepelným ovlivněním materiálu. Zbytkové napětí v povrchových a podpovrchových vrstvách je tahové, což vede ke snížení životnosti a usnadňuje šíření trhlin. Příklad hloubkového profilu zbytkového napětí typu 1 ukazuje obrázek 7.



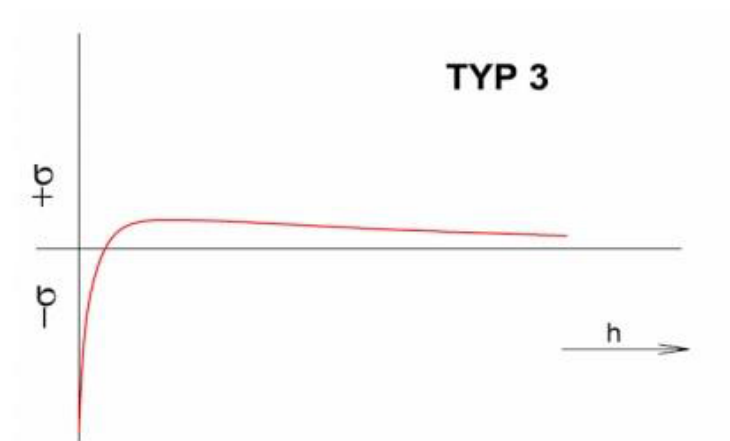
Obrázek 7 Hloubkový profil zbytkového napětí - Typ 1 [7]

2. **Typ 2** – zbytkové napětí, které je výsledkem kombinace mechanického a tepelného působení na materiál. Hlubkový profil těchto napětí může být různý, záleží, která složka namáhání převažuje. Na obrázku 8 je ukázán příklad zbytkového napětí typu 2, kde na povrchu je napětí tlakové, ovšem v podpovrchových vrstvách přechází do tahového směru.



Obrázek 8 Hlubkový profil zbytkového napětí - Typ 2 [7]

3. **Typ 3** – zbytkové napětí vyvolané mechanickým (silovým) působením na vzorek (obrázek 9). Jeho vznik můžeme ovlivnit parametry výrobní operace.



Obrázek 9 Hlubkový profil zbytkového napětí - Typ 3 [7]

### 4.3. Měření zbytkového napětí

Během posledního období bylo vyvinuto mnoho různých metod na měření zbytkového napětí. Zajímavostí je, že většina z nich pracuje na zcela odlišných fyzikálních principech. Základní rozdělení těchto metod je na:

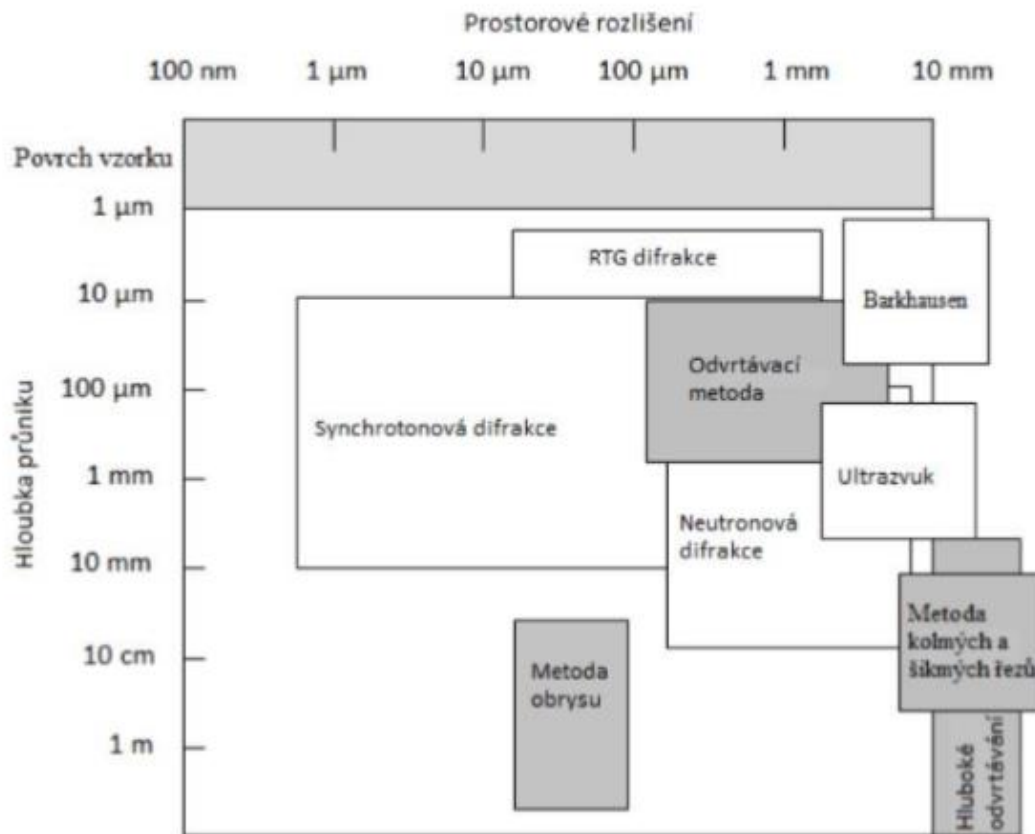
- Destruktivní
- Semidestruktivní
- Nedestruktivní

Jak samotný název napovídá, při změření zbytkového napětí destruktivní metodou dojde k destrukci vzorku nebo jeho části. Základní princip je jednoduchý. Proveďte se uvolnění zbytkového napětí, což způsobí deformaci vzorku, která se následně změní. Naopak u zkoušek nedestruktivních k porušení vzorku nedochází, což je jejich největší výhoda. Pracují na principu vzájemné souvislosti zbytkového napětí a fyzikálních a krystalografických vlastností. Mezi těmito metodami leží zkoušky semidestruktivní. Při těchto zkouškách dochází pouze k částečnému porušení vzorku, který lze i nadále používat.

Jak již bylo řečeno, existuje mnoho metod na měření zbytkového napětí. Mezi nejčastěji využívané zkoušky patří:

- Metoda chemického leptání
- Ultrazvukové metody
- Magnetická metoda
- Odvrtávací metoda
- Metoda rentgenové difrakce

Toto je jen stručné shrnutí zkoušek, které budou podrobněji popsány v následujících podkapitolách. Jednotlivé zkoušky měří zbytkové napětí v různých hloubkách pod povrchem a z různé velikosti povrchu. Přehled těchto charakteristik pro jednotlivé zkoušky je zobrazen na následujícím obrázku 10.



Obrázek 10 Hloubka průniku a prostorové rozlišení jednotlivých metod hodnocení zbytkových napětí. Destruktivní a semidestruktivní metody jsou označeny šedou barvou. [4]

#### 4.3.1. Metoda chemického leptání

Metoda chemického leptání se ke zjištění zbytkového napětí používala spíše v minulosti, ovšem některé firmy ji využívají dodnes. Postup je prostý, povrch vzorku se naleptá nitalem, což je 2% roztok kyseliny dusičné ( $\text{HNO}_3$ ) v etanolu ( $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ ). V takto připraveném vzorku se pomocí mikroskopu zkoumá struktura. Jedinou výhodou této metody je možnost zjištění hloubkového profilu zbytkového napětí. Oproti tomu má řadu nevýhod. První z nich a asi největší je, že se jedná o zkoušku destruktivní. Dále pak že se u ní využívá kyselina, což zvyšuje riziko úrazu a vyžaduje odbornou kvalifikaci. Poslední, nikoli však nevýznamnou, nevýhodou je fakt, že povrch může být leptán nerovnoměrně. [11]

#### 4.3.2. Magnetická metoda

Tato metoda využívá závislost magnetické indukce materiálu na zbytkovém napětí. Zkouška, která pracuje na tomto principu, se nazývá metoda Barkhausenova šumu a bude podrobně popsána v kapitole 5.

#### 4.3.3. Ultrazvukové metody

Zkoumání zbytkového napětí pomocí ultrazvuku je velmi snadné a rychlé, což je velká výhoda této metody. Využívá různé rychlosti šíření ultrazvukové vlny ve vzorcích s různě velkými zbytkovými napětími. Rozlišujeme dvě provedení této metody, a sice odrazové a průchozí. Velkou nevýhodou této zkoušky je fakt, že zbytkové napětí je měřeno v celém objemu. To velmi zkresluje skutečnou velikost zbytkového napětí v povrchové vrstvě, která je pro nás stěžejní. [4]

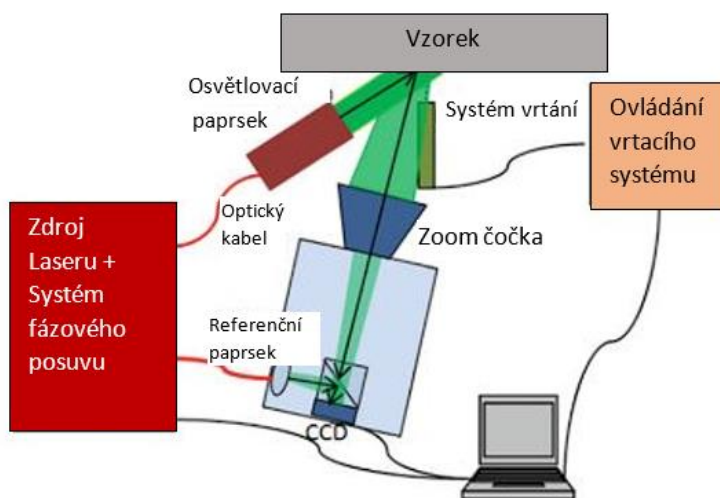
#### 4.3.4. Odvrtávací metoda

Odvrtávací zkouška se řadí mezi metody semidestruktivní. Dochází zde k vyvrtání malého otvoru do povrchu vzorku (průměr přibližně 1mm), což způsobí uvolnění zbytkových napětí a z toho plynoucí deformaci otvoru. Podle velikosti deformace je pomocí metody spočteno zbytkové napětí I. druhu před jeho uvolněním. Jelikož průměr vrtáku je velmi malý, i deformace jsou velmi malé, proto existují pouze dva způsoby, jak je můžeme měřit. První je pomocí tenzometrů, které jsou nalepeny kolem díry. Tato starší metoda je velmi nákladná a přesnost záleží na správnosti nalepení tenzometrů, proto byla později modifikována a používají se tenzometrické růžice (obr. 11). [10,12,13]



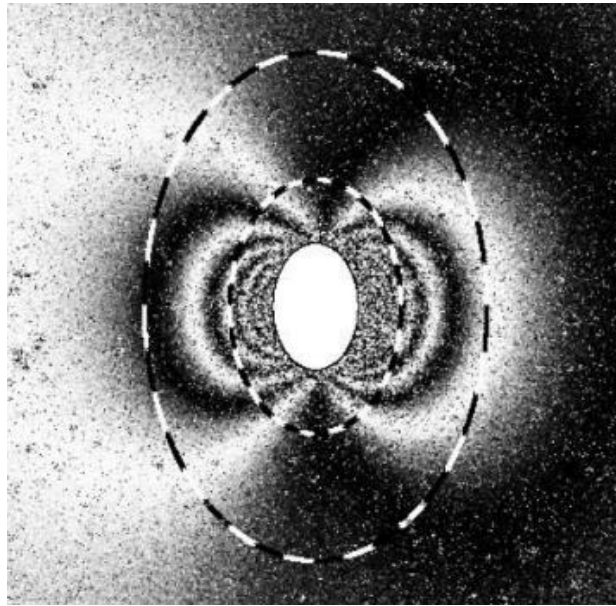
Obrázek 11 Nalepovací přípravek s tenzometry pro měření deformace vyvrtané díry [13]

Další způsob, jak měřit deformaci, je pomocí elektromagnetické interferometrie (ESPI). Při této technologii je vzorek osvětlen koherentním laserovým světlem, které je od povrchu odráženo v závislosti na jeho optické drsnosti. Princip je znázorněn na obr. 12.



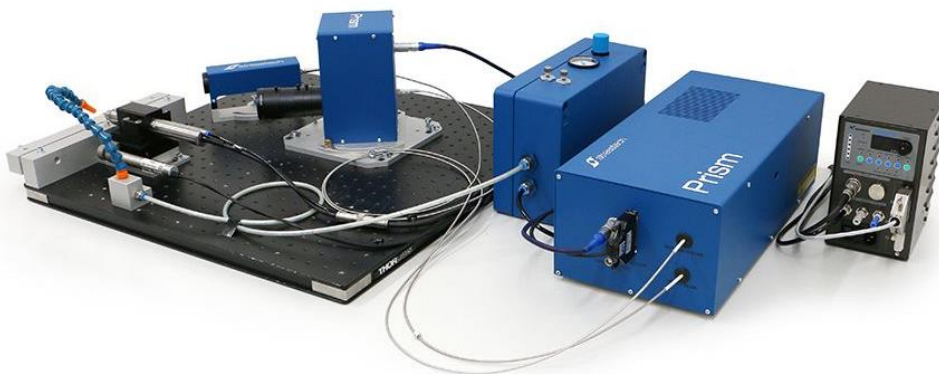
Obrázek 12 Odvrtávací metoda - deformace měřena ESPI [14]

Kamera v každém pixelu snímá odražené světlo z několika míst, které se skládá konstruktivně nebo destruktivně, čímž vzniká obraz, který se skládá ze světlých a tmavých míst (obr. 13).



Obrázek 13 Interferogram [15]

Nejprve se pořídí čtyři obrazy místa vrtání, přičemž každý z nich vzniká koherentním světlem s vlnovou délkou o čtvrtinu větší než obraz předchozí. To umožní výpočet fázového úhlu pro každý pixel. Poté dojde k vyvrtání díry do určité hloubky a pořízení dalších čtyř obrazů. Vzájemným porovnáním obrazů pro různé hloubky vyvrtání provede software výpočet jednotlivých pixelů, a tím deformaci vzorku. Jak již bylo řečeno, z této deformace je spočteno zbytkové napětí I. druhu, které bylo v materiálu před jeho uvolněním. Operace vrtání a pořízení obrazů se opakuje, než docílíme požadované hloubky měření zbytkového napětí. Z těchto kroků vyplývá největší výhoda této metody, a sice že jsme velmi rychle a přesně schopni určit hloubkový profil zbytkového napětí ve vzorku. Nevýhodou této metody je vyšší cena zkoušky a její imobilita. Imobilita vyplývá z nutnosti přesné konfigurace vzorku, laseru, kamery a vrtáku. Příklad uspořádání měřicího přístroje je uveden na obrázku 14. [14,15]



Obrázek 14 Zařízení pro odvrtávací metodu Stresstech Prism [16]

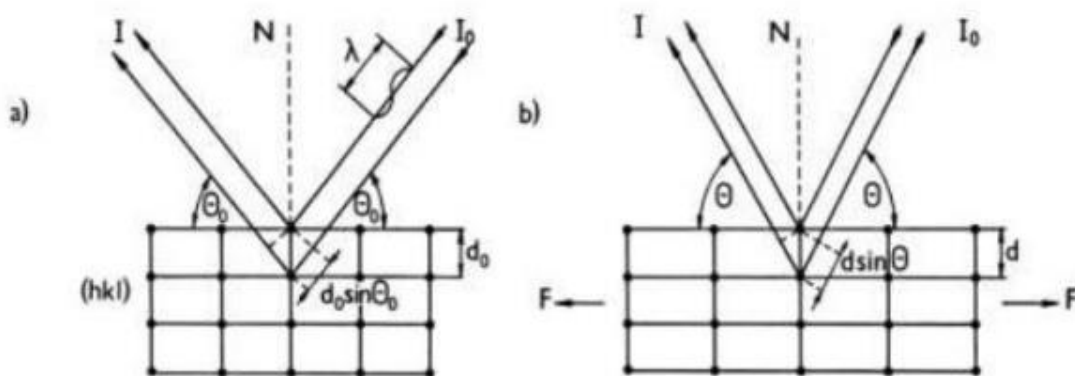
#### 4.3.5. Rentgenová difrakce

Metoda spočívá v interakci rentgenového záření s krystalografickou mřížkou materiálu. Toto záření dopadá na krystalografické roviny, na kterých dochází ke konstruktivní nebo destruktivní interferenci rozptýleného záření. To, k jaké interferenci dojde, se řídí podle Braggova zákona [17]:

$$n\lambda = 2d\sin\theta,$$

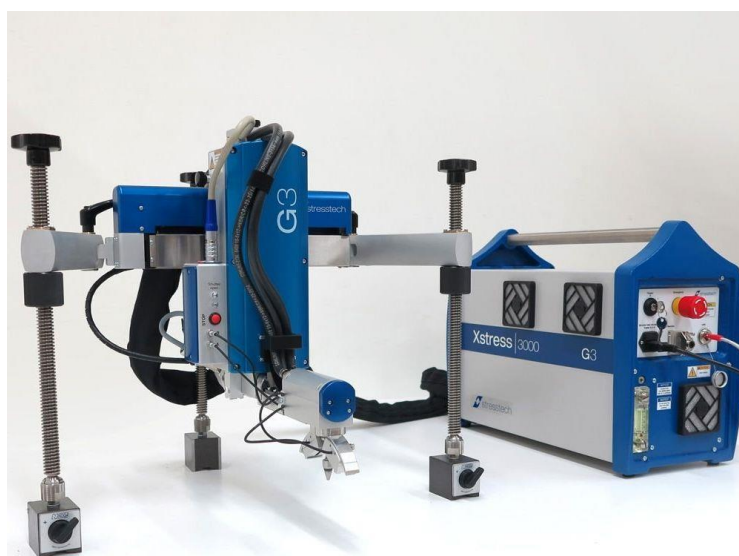
kde  $\theta$  je Braggův úhel,  $\lambda$  vlnová délka záření,  $n$  řád reflexe a  $d$  mezirovinná vzdálenost. Rentgenová difrakce měří zbytkové napětí v závislosti na změně meziatomové vzdálenosti v charakteristické rovině a Youngova modulu pružnosti  $E$ . Obecným předpokladem je lineární elastická deformace.

Teoretický materiál má meziatomovou vzdálenost  $d_0$  a z toho plynoucí Braggův úhel  $\theta_0$  (obrázek 15a). Při zatížení materiálu, respektive při přítomnosti vnitřního napětí, dojde k deformaci mřížky, s čímž souvisí změna mezirovinné vzdálenosti, a tedy změna Braggova úhlu ( $d$  a  $\theta$ , obrázek 15b).



Obrázek 15 Změna Braggova úhlu při zatížení krystalické mřížky silou F [18]

Fotografie skutečného rentgenového měřicího zařízení je uvedena na obrázku 16.



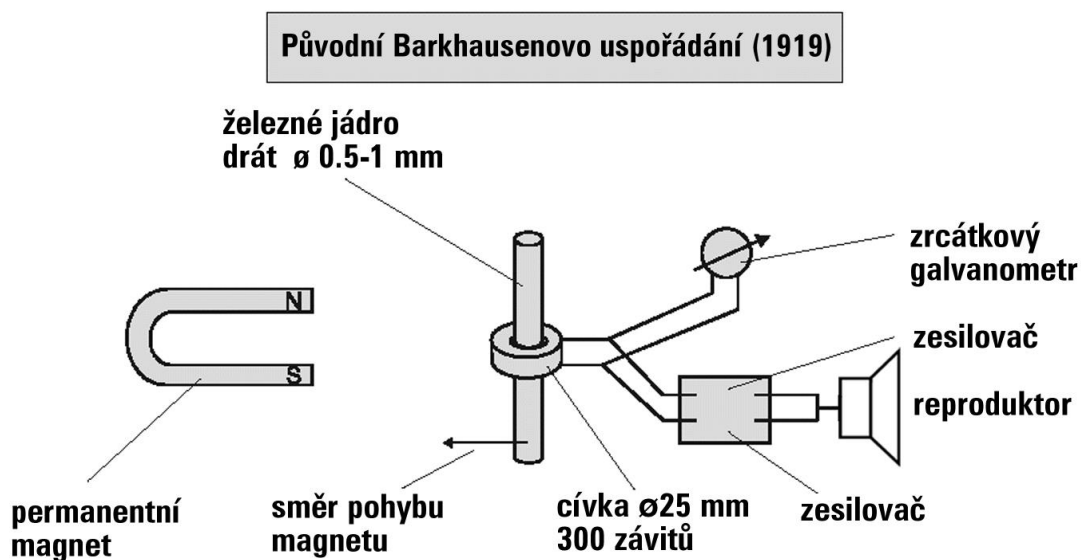
Obrázek 16 Rentgenový difraktometr Stresstech G3 [16]

## 5. Analýza Barkhausenova šumu

Analýza Barkhausenova šumu nebo také Mikromagnetická metoda je nedestruktivní magnetická zkouška na určení integrity povrchu. Zkouška využívá závislosti magnetické indukce materiálu na integritě povrchu, nicméně přesný princip bude popsán v následujících podkapitolách. Další faktor, který ovlivňuje hodnotu magnetoelastického parametru (MP - výstupní veličina z analýzy Barkhausenova šumu), je struktura povrchové a podpovrchové vrstvy. Jak bylo uvedeno v kapitole 3, pojmem integrita povrchu se rozumí soubor velkého počtu vlastností, které popisují povrch materiálu. Většina těchto vlastností ovlivňuje hodnotu magnetoelastického parametru. Z tohoto důvodu říkáme, že se jedná o zkoušku porovnávací, což je největší nevýhoda této metody. Druhá nevýhoda je, že lze měřit pouze feromagnetické materiály. Oproti tomu má analýza Barkhausenova šumu obrovské výhody. První a zřejmě největší výhodou je, že se jedná o zkoušku nedestruktivní. Další výhodou je rychlost provedení zkoušky. Čas pro provedení jednoho měření je v porovnání s jinými metodami značně kratší. Z těchto dvou výhod plyne třetí neméně důležitá výhoda, a tou je nízká cena. Jelikož zkouška je provedena rychle a je nedestruktivní, klesnou náklady na obsluhu a výrobu zkušebních vzorků. [4, 8, 19, 20, 21]

### 5.1. Historie

Historie zkoušky se začala psát po skončení první světové války, v roce 1919. Tehdy německý profesor Heinrich Georg Barkhausen (2. 12. 1881 – 20. 2. 1956), jehož jméno tato metoda nese, provedl experiment, který je zobrazen na obrázku 17.



Obrázek 17 Původní Barkhausenův experiment [20]

Profesor Barkhausen pohyboval železným drátem, který v zapojení plnil funkci jádra cívky, v magnetickém poli vytvářeném permanentním magnetem. Při tomto pohybu bylo z reproduktoru slyšet určité chrastění či praskání. Tento jev byl v kvantové fyzice později popsán jako nespojitost během procesu magnetizace feromagnetického materiálu. Spekuluje se o tom, že Barkhausen tento experiment provedl při vývoji zařízení, které by odhalovalo ponorky a torpéda pod vodní hladinou. [21]

## 5.2. Feromagnetismus

Analýzu Barkhausenova šumu lze provést pouze na feromagnetickém materiálu, proto je třeba tento problém blíže popsat. Materiály můžeme rozdělit podle magnetických vlastností na:

- Paramagnetické látky
- Diamagnetické látky
- Feromagnetické látky

Tyto tři skupiny materiálu se od sebe liší velikostí permeability ( $\mu$ ), resp. relativní permeability ( $\mu_r$ ). Permeabilita je definována jako podíl magnetické indukce  $B$  [T] a intenzity magnetického pole  $H$  [A/m]

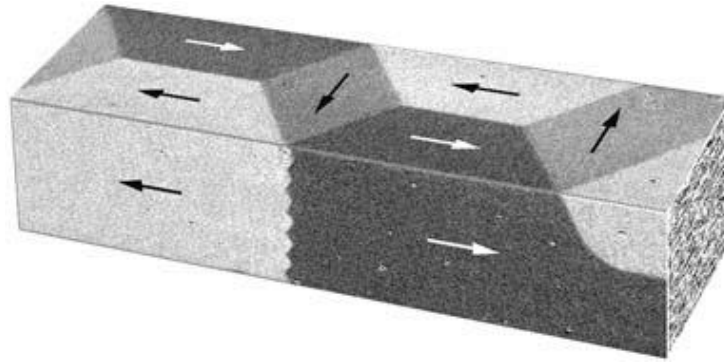
$$\mu = \frac{B}{H}$$

relativní permeabilita jako podíl permeability a permeability vakua ( $\mu_0$ )

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

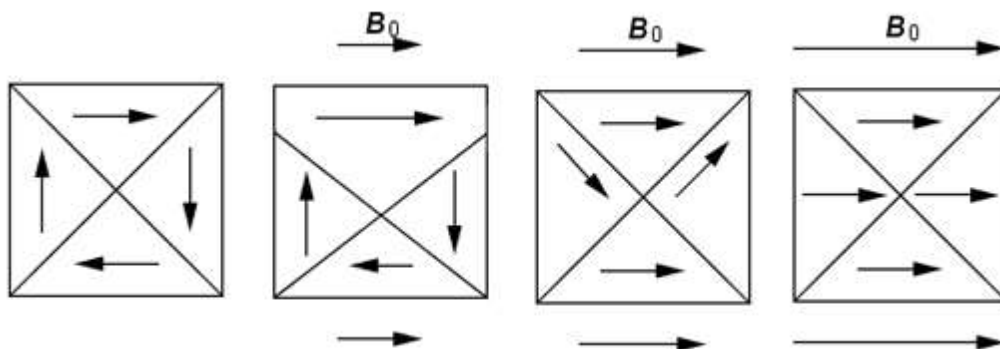
U paramagnetických látek je hodnota relativní permeability větší než jedna, což znamená, že při vložení paramagnetické látky do magnetického pole tato látka pole zesiluje ( $\mu_r > 1$ ). Paramagnetické látky vytvářejí vlastní magnetické pole a nejznámějším zástupcem této skupiny je hliník. Oproti tomu diamagnetické látky magnetické pole zeslabují ( $\mu_r < 1$ ). Diamagnetismus vykazuje měď, zlato, stříbro a jiné. U feromagnetických látek je relativní permeabilita veliká ( $10^2$  až  $10^5$ ), což znamená, že magnetické pole zesilují velmi výrazně. Feromagnetismus je za běžných teplot pozorován u čtyř prvků, a sice železa, niklu, kobaltu, gadolinia, a několika slitin. Každý feromagnetický materiál při určité teplotě, zvané Curieova teplota, svůj feromagnetismus ztrácí a stává se paramagnetickým materiálem. [22]

Feromagnetismus je jev, který je závislý na uspořádání atomů (iontů) v krystalové mřížce. Přesněji řečeno, feromagnetické materiály mají tzv. doménovou strukturu. Každá Weissova doména, jak je buňka struktury nazývána, se chová jako tyčový magnet, který má tzv. směr snadné magnetizace. Pokud se feromagnetický materiál nenachází ve vnějším magnetickém poli, nevytváří navenek žádné magnetické pole. Účinky jednotlivých domén se navzájem ruší. (obr. 18)



Obrázek 18 Schematicky znázorněná doménová struktura feromagnetického materiálu, bez působení vnějšího magnetického pole [23]

Pokud jej umístíme do vnějšího magnetického pole, domény, které mají stejný směr snadné magnetizace, jako je směr vnější magnetizace, skokově začnou růst. Při zvětšení velikosti magnetického pole dojde k „natočení tyčových magnetů“ v ostatních doménách. (obr. 19) Těmito procesy dojde k vytvoření magnetického pole materiálu (šipka pod obrázkem), které má stejný směr jako vnější magnetické ( $B_0$ ) pole a výrazně jej zesiluje. [4, 19, 23]



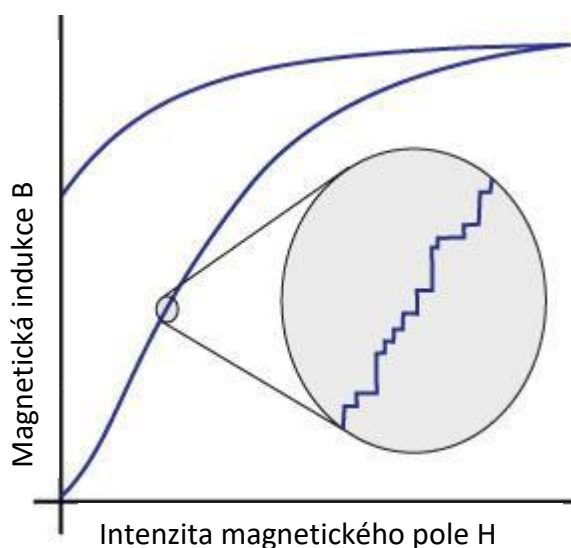
Obrázek 19 Schéma orientace magnetických domén při působení vnějšího magnetického pole [4]

Za teploty absolutní nuly by měl nastat ideální stav, kdy celý objem materiálu by byl tvořen jednou Weissovou doménou. Tento stav je za normálních teplot nestabilní a dochází k rozpadu domén a vzniku Blochových stěn<sup>1</sup>. Velikost Weissových domén je řádově  $10^{-4}$  až  $10^{-6}$  metrů. Pozorování domén na mikroskopu je možné pomocí metody tzv. Bitter-Akulových obrazů, která umožňuje zviditelnění Weissových domén, a tím studium feromagnetického stavu zkoumaných látek. Z praktického hlediska má metoda význam pro zjištění souvislosti mezi doménovou strukturou feromagnetik a jejich kvalitou z hlediska technických požadavků na tyto materiály. [24, 25, 26]

<sup>1</sup> Blochova stěna, neboli doménová stěna, je přechodová oblast mezi doménami s rozdílným směrem snadné magnetizace. [24]

### 5.3.Princip

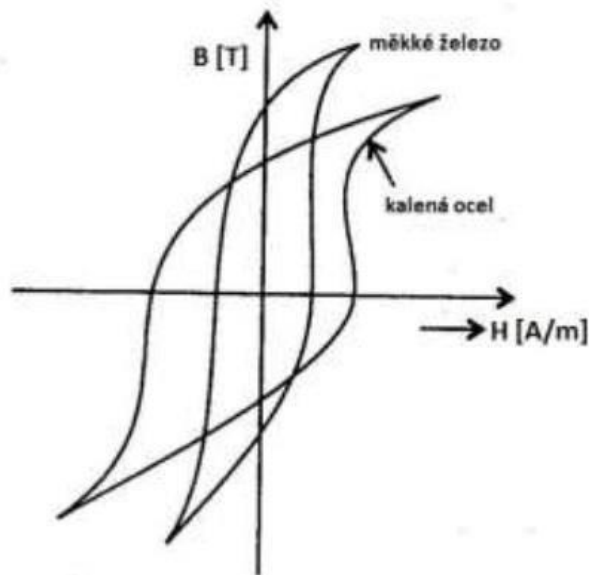
Při analýze Barkhausenova šumu je feromagnetický materiál lokálně magnetizován střídavým magnetickým polem. Důsledkem toho dochází k pohybu Blochových stěn. Tento pohyb ovšem není spojitý, ale skokový. Každý skok způsobí změnu výsledné magnetizace, a pokud se poblíž nachází cívka (viz kapitola 5.5.2), je na ní indukován elektrický impulz. Když sečteme všechny impulzy od všech přeskoků ve zmagnetizované oblasti, dostaneme signál, který se nazývá Barkhausenův šum. Jak již bylo zmíněno, profesor Barkhausen v roce 1919 dokázal nespojitost během procesu magnetizace, která je způsobena skokovým pohybem Blochových stěn. K popisu magnetizace slouží hysterezní křivka, která z důvodu skokového pohybu doménových stěn není spojitá, ale také skoková (obr. 20). [4, 8, 21]



Obrázek 20 Skoky na hysterezní křivce [19]

Hysterezní křivka je uzavřená křivka v grafu závislosti magnetické indukce  $B$  na vnějším magnetické poli  $H$ , která popisuje jeden cyklus magnetování feromagnetického materiálu střídavým magnetickým polem. Na odmagnetizovanou feromagnetickou látku začneme působit magnetickým polem, jehož velikost budeme zvyšovat do nasyceného stavu (saturace). To je takový stav, kdy magnetická indukce materiálu dosáhne svého maxima. Velikost Weissových domén, jejichž směr snadné magnetizace je totožný nebo velmi podobný jako směr vnější magnetizace, je maximální. Na obrázku 21 je tento proces zakreslen křivkou prvotní magnetizace, která se jinak také nazývá panenská křivka. Bude-li se poté velikost vnějšího magnetického pole zmenšovat, bude klesat i magnetická indukce látky, ovšem ne „po panenské křivce“, ale pomaleji. Klesne-li vnější magnetizace na nulu, feromagnetický materiál dál indukuje magnetické pole o velikosti  $B_r$  – remanentní (zbytková) indukce. Tato indukce zmizí v okamžiku, kdy vnější magnetické pole působí opačným směrem a dosáhne velikosti  $H_c$  – koercitivní síla. Dá se říct, že koercitivní síla je magnetické pole potřebné k odmagnetizování určitého feromagnetického materiálu. Při dalším zvětšování magnetického pole, které má opačný směr, dosáhneme opět saturace. Je-li proveden celý magnetizační cyklus, křivka se uzavře a nazývá se hysterezní křivka feromagnetika. [4, 8, 20, 27]

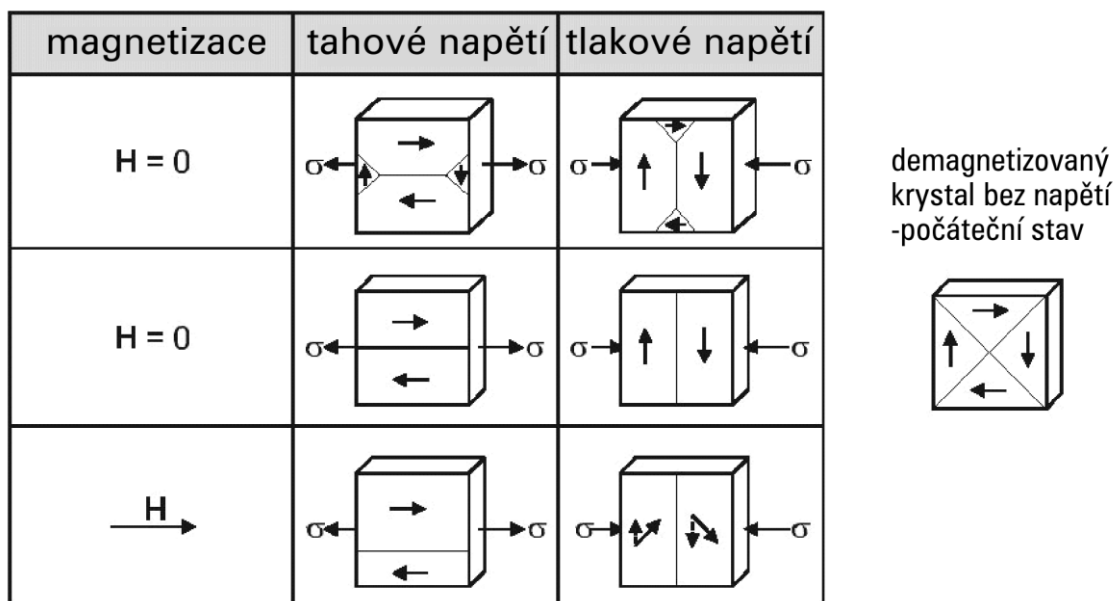
Tvar hysterezní křivky se pro různé materiály liší. Z tohoto hlediska feromagnetické materiály rozdělujeme na magneticky měkké a magneticky tvrdé (obr. 21). Magneticky měkké jsou ty materiály, jejichž hysterezní křivka je úzká a vysoká. Mají velkou remanentní indukci, ale malou koercitivní sílu. Přesný opak platí pro magneticky tvrdé materiály. Tyto vlastnosti jsou dány především chemickým složením, strukturou a technologickým zpracováním.



Obrázek 21 Různé tvary hysterezních křivek pro magneticky měkké a tvrdé materiály [28]

Analýza Barkhausenova šumu využívá závislosti magnetických vlastností, resp. tvaru hysterezní křivky na napětí v materiálu. Napětí v materiálu mohou být vnější, od vnějšího silového působení, nebo zbytková, která byla popsána v kapitole 4. Jak napětí ovlivňují doménovou strukturu, je ukázáno na obrázku 22. Hlavní příčinou pohybu Blochových stěn vlivem napětí je změna hustoty elastické energie. V principu jde o to, že napětí způsobí zvýšení hustoty elastické energie, na což feromagnetický materiál reaguje změnou tvaru domén, čímž minimalizuje vnější energii. Této reakci se říká magnetoelastická odezva na mechanicky indukované napětí.

Pokud na demagnetizovaný monokrystal feromagnetika aplikujeme prostý tah, domény, které mají směr snadné magnetizace rovnoběžný se směrem namáhání, začnou růst na úkor domén s kolmým směrem snadné magnetizace. Při působení prostého tlaku je efekt opačný. Rostou domény s příčnou orientací na úkor rovnoběžně orientovaných domén. Pokud vzorek, jehož domény jsou vlivem tahového napětí přeorientovány, vložíme do magnetického pole, které má totožný směr jako tahové napětí, dojde k růstu domén s totožnou orientací vektoru snadné magnetizace na úkor domén s orientací opačnou. Další zvyšování magnetizace vede k dalšímu pohybu Blochových stěn až do stavu, kdy antiparalelní domény vymizí. Využívá se zde superpozice tahového napětí a magnetizace, což vede k snazšímu pohybu Blochových stěn. Při působení tlakového napětí má magnetizace snahu otáčet domény do směru vnějšího pole. Výsledný vliv na Blochovy stěny je opačný a omezuje jejich pohyb. [20]



Obrázek 22 Změna doménové struktury vlivem napětí [20]

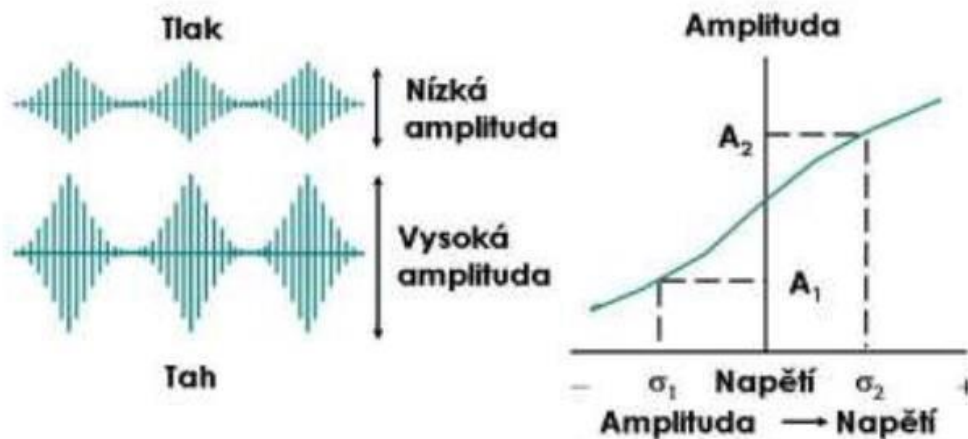
#### 5.4. Faktory ovlivňující měření

Magnetoelastický parametr (MP) závisí na integritě povrchu, která zahrnuje velké množství parametrů. Skutečnost, že hodnotu MP ovlivňuje tolik parametrů, je výhodou a zároveň nevýhodou Barkhausenovy zkoušky. Výhodou je, že můžeme sledovat velké množství parametrů, ale pokud naměříme nečekaně vysokou hodnotu MP, nevíme, který z parametrů to způsobil. Toto omezení je největší nevýhodou analýzy Barkhausenova šumu a důvod, proč tuto zkoušku řadíme mezi porovnávací. Nemůžeme tedy říct, že určitá hodnota MP je kritická a vzorek nevyhověl. V praxi se tento nedostatek řeší experimentálně. U velkosériové výroby se provede série měření, z níž pověřený pracovník určí rozmezí, ve kterém by se měla pohybovat hodnota MP u měřených kusů pro dané nastavení. U kusové nebo malosériové výroby je situace složitější. Obvykle měření těchto kusů provádí odborníci ze specializované firmy, kteří z tvaru a hustoty Barkhausenova šumu poznají, zda se jedná o dobrý kus nebo zda je hodnota MP příliš vysoká. Faktory, které především ovlivňují MP, jsou [21]:

- zbytkové napětí v materiálu;
- struktura a mikrostruktura materiálu;
- chemické složení;
- tepelné a chemicko-tepelné zpracování;
- tvrdost materiálu;
- nastavení parametrů měření (Rollscanu).

Rollscan je měřicí přístroj pro zkoušku Barkhausenova šumu. Jeho popisu a vlivu jeho nastavení na hodnotu MP bude věnována kapitola 5.5.

Vliv zbytkového napětí na pohyb Blochových stěn byl popsán v předchozí podkapitole. Nyní bude ukázáno, jak tyto napětí ovlivňují hodnotu magnetoelastického parametru. Vlivem magnetoelastické odezvy klesá hodnota MP neboli amplituda Barkhausenova šumu, a to u vzorků, které obsahují tlakové (záporné) zbytkové napětí. Naopak, pokud jsou v materiálu tahová (kladná) zbytková napětí, hodnota MP začne růst (obr. 23). Tato obecná pravidla platí pro materiály, které mají kladnou magnetostrikci<sup>2</sup>.



Obrázek 23 Vliv napětí na amplitudu Barkhausenova šumu [30]

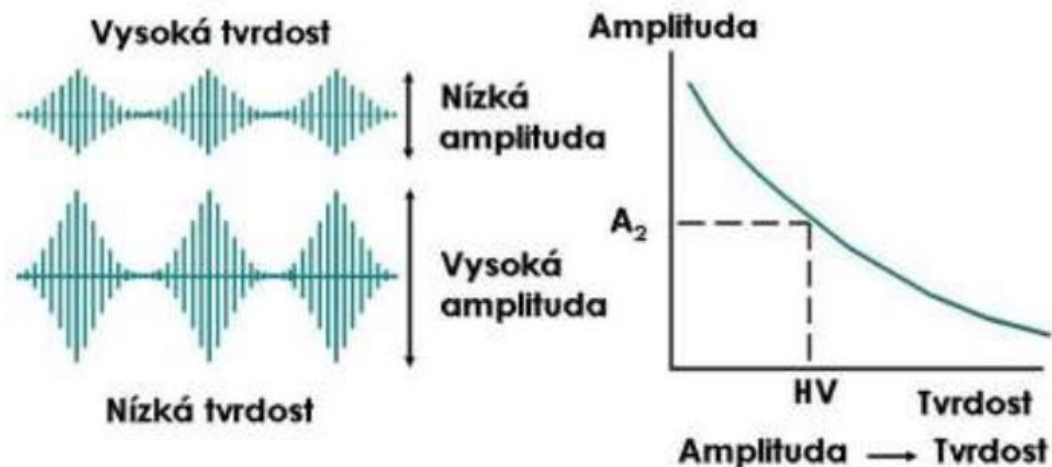
Druhý faktor, který zásadně ovlivňuje hodnotu MP a lze jej kvantifikovat, je tvrdost materiálu. Tvrdost je definována jako odpor, který klade materiál proti vnikání cizího tělesa. Obecně známá je souvislost tvrdosti a pevnosti, která lze vyjádřit empirickým vztahem:

$$R_m = k \cdot HB$$

kde  $R_m$  je mez pevnosti,  $HB$  tvrdost podle Brinella a  $k$  koeficient závislý na materiálu (pro ocel je v rozmezí 3,1 až 4,1).

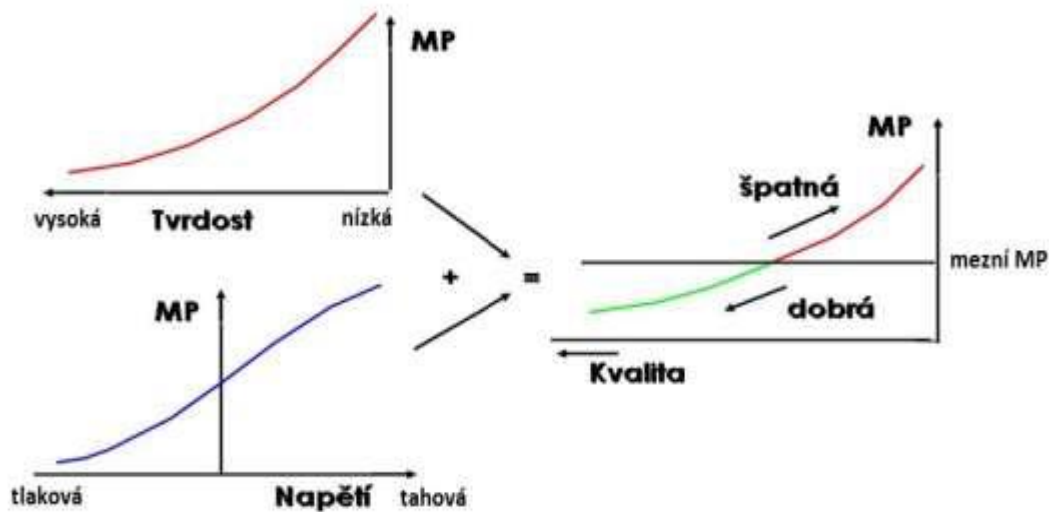
Mezi tvrdostí a hodnotou MP platí nepřímá úměra (obr. 24). Přesněji řečeno, u tvrdších materiálů je energeticky náročnější pohyb Blochových stěn, proto jsou hodnoty MP nižší. [4, 8, 30, 31]

<sup>2</sup> Magnetostrikce je fyzikální jev, popisující změnu tvaru a rozměru feromagnetického materiálu v magnetickém poli. Magnetostrikce může být pozitivní nebo negativní. Pokud vzorek z feromagnetického materiálu s pozitivní magnetostrikcí vložíme do magnetického pole, zvětší svůj objem. Toto chování je běžné u většiny materiálů včetně ocelí. Méně obvyklá je magnetostrikce záporná. Tyto materiály v magnetickém poli svůj objem zmenšují. [29]



Obrázek 24 Vliv tvrdosti na amplitudu Barkhausenova šumu [30]

Tyto dva faktory ovlivňují hodnotu MP nejmóvrazněji. Další faktory, jako struktura, chemické složení aj., nelze kvantifikovat. Z tohoto důvodu se využívá souvislosti těchto vlastností s tvrdostí. Ta je považována za hlavní faktor, který ovlivňuje hodnotu MP a není primárně měřena analýzou Barkhausenova šumu. Obecně se dá říct, že dobře obrobený povrch součásti (např. ozubeného kola) by měl ukazovat nízké hodnoty MP, tedy být dostatečně tvrdý a bez zbytkových tahových napětí (obr. 25). Pokud dojde k poklesu tvrdosti nebo výskytu zbytkového tahového napětí, hodnota MP vzroste.



Obrázek 25 Závislost MP na integritě povrchu [32]

Pokles tvrdosti nebo výskyt zbytkových tahových napětí signalizuje určitou vadu materiálu, např. brusnou spáleninu, výskyt oduhlíčené oblasti, probroušení vrstvy chemicko-tepelného zpracování. Tyto vady lze analýzou Barkhausenova šumu velmi rychle a efektivně identifikovat, což umožňuje i posuzování integrity povrchu.

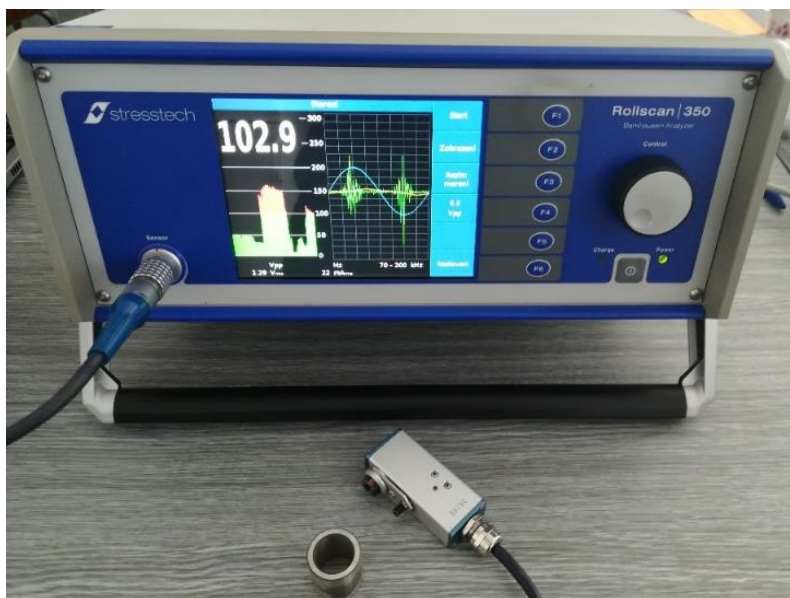
## 5.5. Měřící zařízení

Výrobci měřících zařízení pro analýzu Barkhausenova šumu není mnoho. Světovou jedničkou je finská společnost Stresstech patřící do skupiny Nova Instruments LLC.

### 5.5.1. RollScan

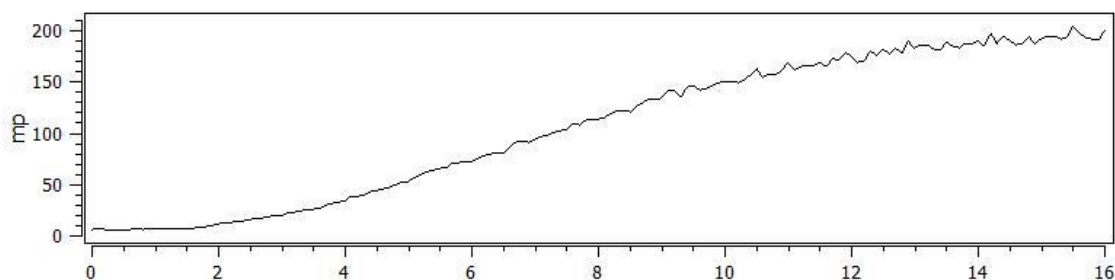
Řada analyzátorů Barkhausenova šumu od firmy Stresstech se nazývá Rollscan a existuje již v několika generacích. Starší analyzátoři s označením 200 byly nastavovány mechanicky a synchronizace s počítačem byla omezená. Nejnovějším typem Rollscanu je verze 350, jehož fotografie je na obrázku 26. Stresstech také vyrábí stanice měřící Barkhausenův šum na konkrétních výrobcích.

V kapitole 5.4 bylo zmíněno, že hodnotu MP ovlivňuje nastavení Rollscanu, neboli nastavení parametrů měření. Nastavení parametrů měření se rozumí nastavení magnetizačního napětí a magnetizační frekvence.



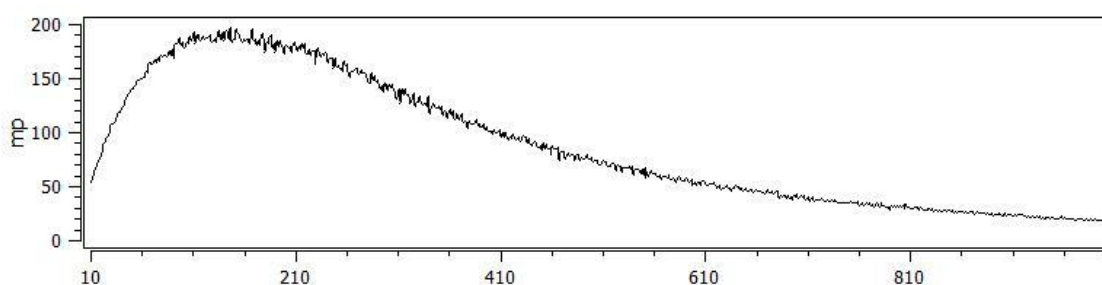
Obrázek 26 Rollscan 350

Nastavení magnetizačního napětí je nastavení hodnoty napětí budícího magnetického pole. Rollscan 350 pracuje v rozsahu 0-16 V s krokem 0,1 V. K nastavení optimální hodnoty magnetizačního napětí slouží funkce napěťový přeběh, která při konstantní frekvenci postupně zvyšuje napětí ve zvoleném intervalu. Hodnoty MP jsou zanášeny do grafu, viz obrázek 27. V místě, kde má křivka největší stoupání, je optimální hodnota magnetizačního napětí.



Obrázek 27 Napěťový přeběh

Podobný postup se volí u zjišťování optimální hodnoty frekvence střídavého magnetického pole. Rollscan disponuje funkcí frekvenční přeběh, která při konstantním budícím napětí postupně zvyšuje magnetizační frekvenci ve zvoleném intervalu. Hodnoty MP jsou vyneseny do grafu stejně jako u napěťového přeběhu. Frekvenční přeběh je zobrazen na obrázku 28. Rollscan umožňuje měnit frekvenci v rozsahu 1-1000 Hz, což ovšem neznamená, že při vyšších frekvencích se Blochovy stěny nepohybují. Pohyb stěn probíhá i za vyšších frekvencí. Tento interval je pouze výrobní omezení Rollscanu. Obecně se dá říct, že Barkhausenův šum je možno měřit ve střídavém magnetickém poli s frekvencí do 2 MHz.



Obrázek 28 Frekvenční přeběh

Magnetizační frekvence především ovlivňuje hloubku vniku magnetického pole, což je ve své podstatě měřený objem materiálu. Tato hloubka je také ovlivňována dvěma materiálovými charakteristikami, a sice vodivostí a permeabilitou. Zjednodušený vzorec pro hloubku vniku  $\delta$  je:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi\mu\sigma f}}$$

kde  $\mu$  je magnetická permeabilita,  $\sigma$  elektrická vodivost materiálu a  $f$  frekvence střídavého magnetického pole. Typická hloubka vniku pro analýzu Barkhausenova šumu je 0,01 až 1 mm. Hloubka vniku je velmi důležitá z hlediska nalezení podpovrchových defektů. Hloubkový profil zbytkového napětí různých stavu materiálů můžeme vidět na obrázku 29. [8, 32, 33]

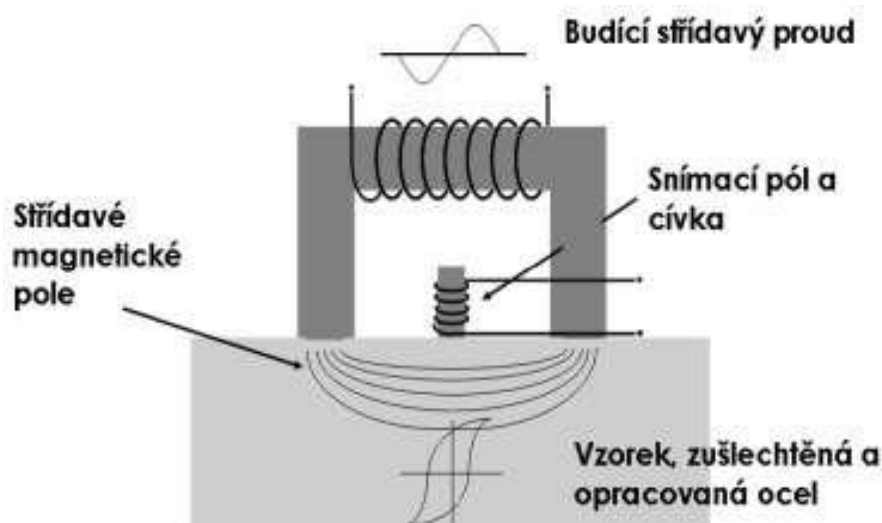


Obrázek 29 Typický hloubkový profil zbytkových napětí v materiálu [33]

Výsledná hodnota Barkhausenova šumu by v ideálním případě měla být získávána z celého objemu, který je lokálně magnetizován. Příspěvek povrchové vrstvy je oproti příspěvku některé podpovrchové vrstvy markantnější. Obecně se dá říct, že útlum signálu je exponenciální v závislosti na vzdálenosti, kterou musí projít materiálem. Příčinou tlumení signálu jsou vířivé proudy, které jsou v materiálu indukovány. Útlum tedy určuje hloubku, ze které lze získat informaci o amplitudě Barkhausenova šumu. [4]

### 5.5.2. Snímače

Vlastní měření zbytkového napětí se provádí ručně nebo strojově za pomoci snímače. Jelikož se pomocí této metody analyzuje velké portfolio výrobků, musí existovat velké množství různých snímačů. Princip fungování a komponenty, které obsahují, musí být vždy stejné, liší se pouze jejich provedení. Každý snímač musí obsahovat dva magnetizační póly, které jsou napojeny na magnetizační cívku. Magnetizační cívka slouží k buzení střídavého elektromagnetického pole o zvolené frekvenci a intenzitě. Důsledkem tohoto magnetického pole je pohyb Blochových stěn, který je snímán pomocí třetího pólu. Snímací pól je umístěn jako jádro cívky, na které jsou vlivem poskoků Blochových stěn indukované elektrické pulzy. Schématické zapojení snímače je ukázáno na obrázku 30. [4, 8, 34, 35]



Z velké rozmanitosti snímačů budou uvedeny dva nejpoužívanější. Prvním je snímač univerzální (obr. 31), který slouží k měření různých součástí a povrchů. Výhodou tohoto snímače je, že snímací (prostřední) pól přechází přes póly budící a je odpružený. Díky tomuto provedení je možné měřit odleptané povrchy při zjišťování hloubkového profilu zbytkového napětí. Póly jsou vyrobeny z feritu, díky čemuž nedochází k odření vzorku při měření. Jejich tvar je broušen ručně. Během měření dochází k opotřebování pólů, proto je možná jejich poměrně snadná výměna. [8]



Obrázek 31 Univerzální snímač

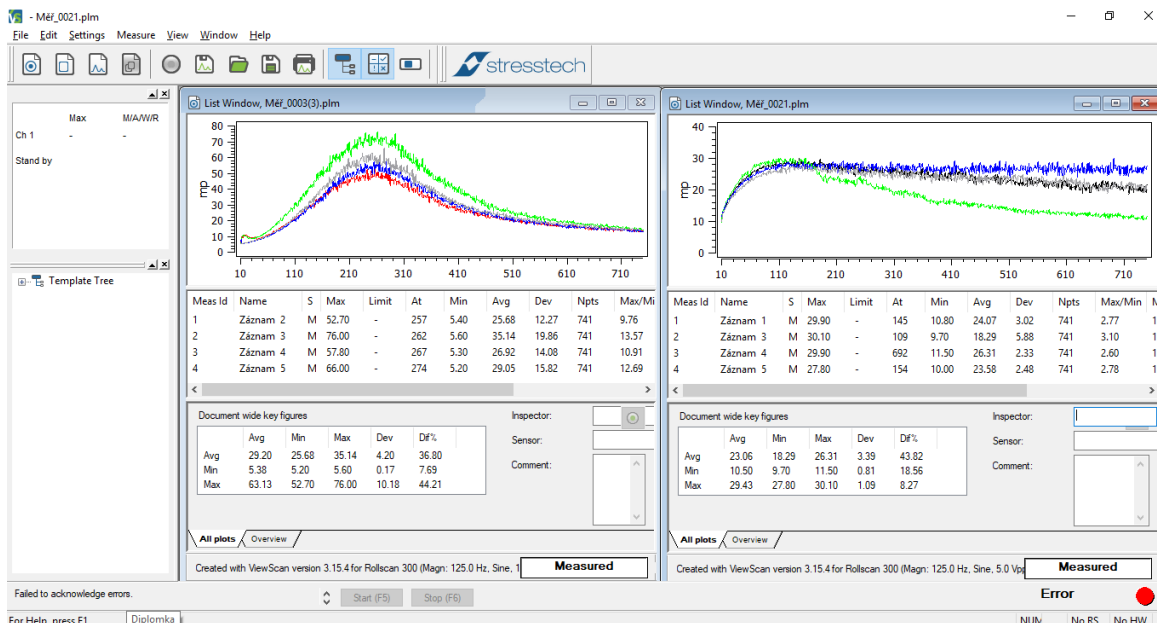
Druhým nejpoužívanějším typem snímačem je snímač zubový (obr. 32), který slouží k měření zubů ozubených kol. Zubový snímač se vyrábí v různých velikostech podle modulu ozubení, jež s ním bude měřeno. Póly těchto snímačů jsou pevné a nevyměnitelné, což zaručuje stálost výsledků. Aby nedošlo k odření pólů, jsou od sebe odděleny proužky z korundu, které je chrání. Nevýhodou tohoto provedení je možnost poškrábání ozubeného kola. [8]



Obrázek 32 Zubový snímač

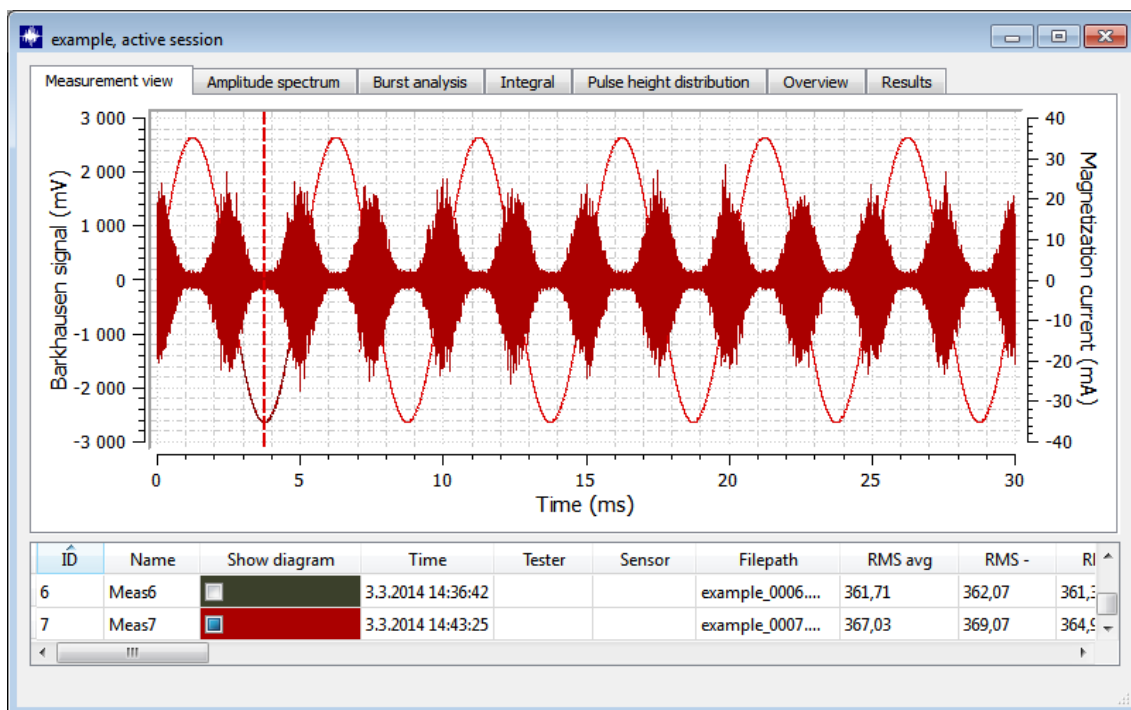
### 5.5.3. Software

Pro sběr a zpracování dat měření se používá se speciální software ViewScan, jehož interface je ukázán na obrázku 33. Pomocí ViewScanu je možno nastavovat veškeré parametry, spouštět a ukončovat měření nebo naměřené hodnoty statisticky zpracovávat.



Obrázek 33 Interface softwaru ViewScan

Pro podrobnější záznam a sběr veškerých dat měření je vhodnější MicroScan, který disponuje velkým množstvím funkcí. Jeho interface ukazuje obr. 34.

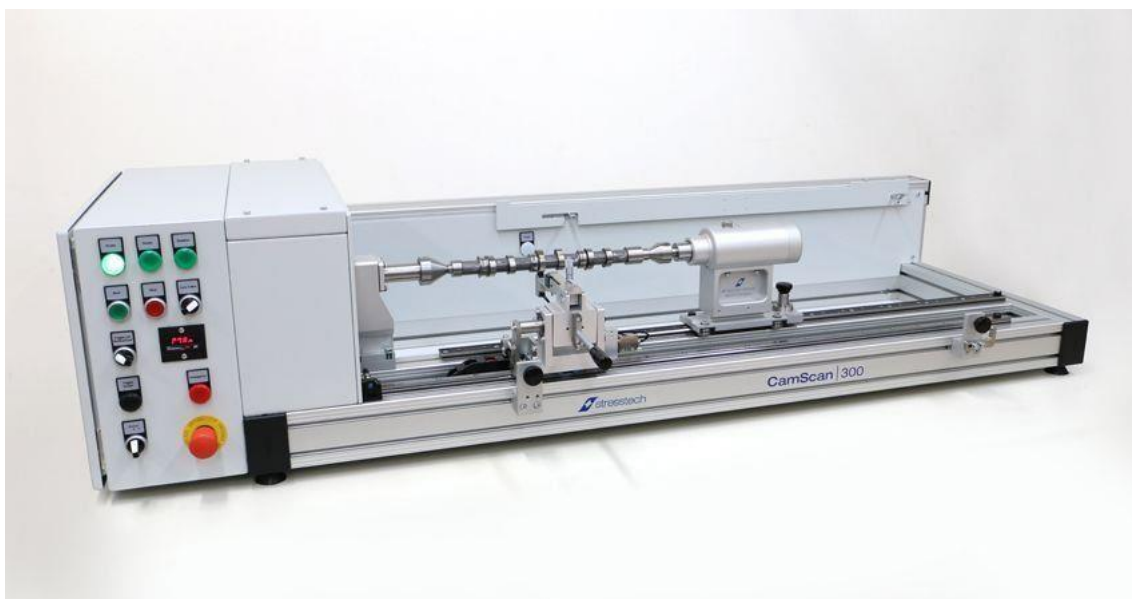


Obrázek 34 Interface softwaru MicroScan [36]

#### 5.5.4. Specializované měřicí zařízení

Ruční měření pomocí Rollscanu je velmi rychlé, ale jeho stabilita je ovlivněna obsluhou. Přesnější výsledky zkoušek dostaneme pomocí specializovaných měřících zařízení (SMZ) nebo z robotického měření.

SMZ se rozumí zařízení, které zajišťuje pohyb vzorku a snímače. Další zapojení je totožné jako u ručního měření, tedy snímač je připojený na Rollscan, který je ovládán pomocí Viewscanu. Použití těchto zařízení je běžné v automobilovém průmyslu. Zde se takto kontrolují především vačkové a klikové hřídele. SMZ pro měření vačkových hřídelí je nazýváno CamScan a je vyráběno v několika provedeních. Semiautomatické provedení CamScan 300 je ukázáno na obrázku 35.



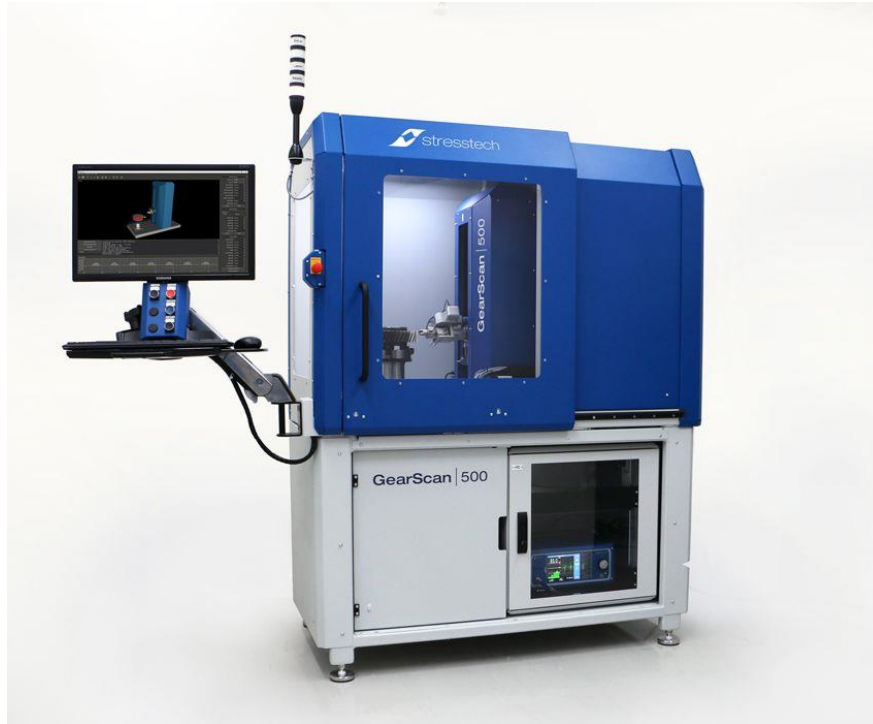
Obrázek 35 Stresstech CamScan 300 [36]

SMZ pro měření klikových hřídelí se nazývá CrankScan a podobně jako CamScan je vyráběno v několika provedeních. Na obrázku 36 je ukázán semiautomatický CrankScan 300.



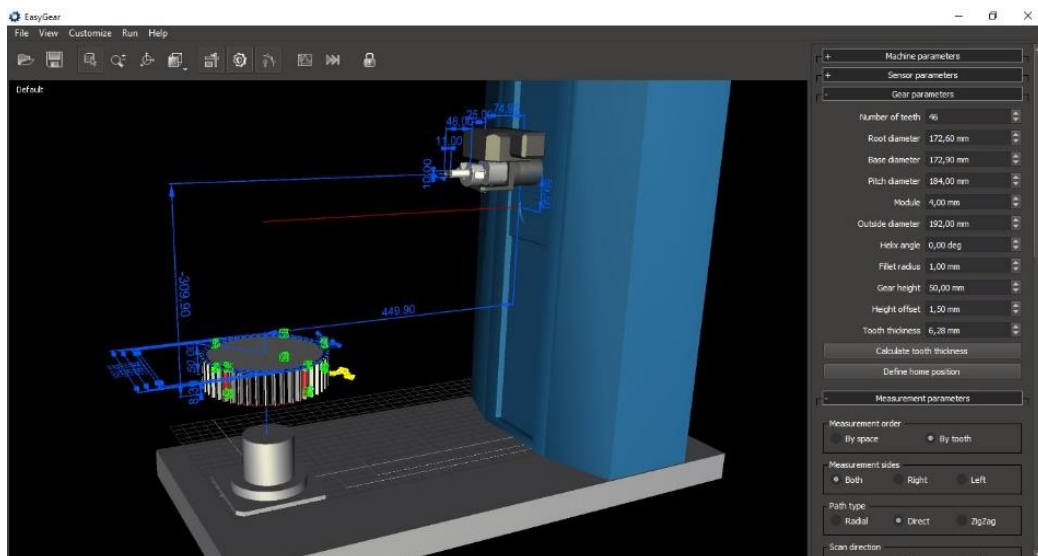
Obrázek 36 Stresstech CrankScan 300 [36]

Další komponentou velmi využívanou v automobilovém průmyslu, ale nejen tam, je ozubené kolo. U tohoto výrobku je výsledná integrita povrchu funkční části velmi důležitá, proto je potřeba ji pozorně kontrolovat. Tvar ozubení a velké výrobní série neumožňují ruční měření, proto firma Stresstech vyvinula SMZ zvané GearScan 500 (obr. 37).



Obrázek 37 Stresstech GearScan 500 [36]

GearScan je zařízení určené k měření Barkhausenova šumu na ozubených kolech a hřídelích s ozubením. Veškeré nastavení (rozměrové a tvarové charakteristiky ozubení, umístění ozubení ve stroji, dráhy pohybu snímače aj.) se provádí v softwaru EasyGear, jehož interface je zobrazen na obrázku 38.



Obrázek 38 Interface softwaru EasyGear

Poslední SMZ, které je v práci zmíněno, je RoboScan 500 (obr. 39). Jak název napovídá, jedná se o umístění snímače Barkhausenova šumu na rameno manipulačního robota. Tento systém umožňuje měření komplexních ploch s velkou přesností.

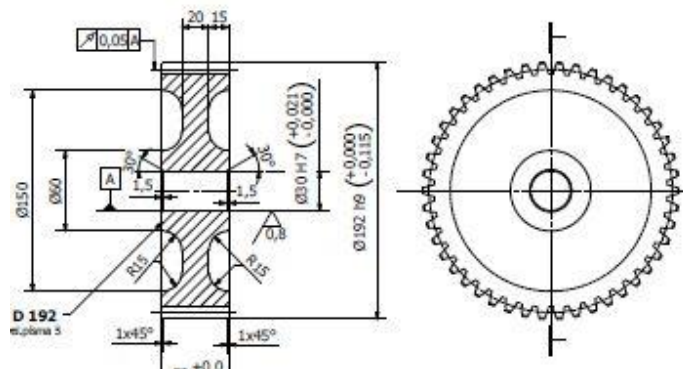


Obrázek 39 Stresstech RoboScan 500 [36]

## 6. Experimentální část

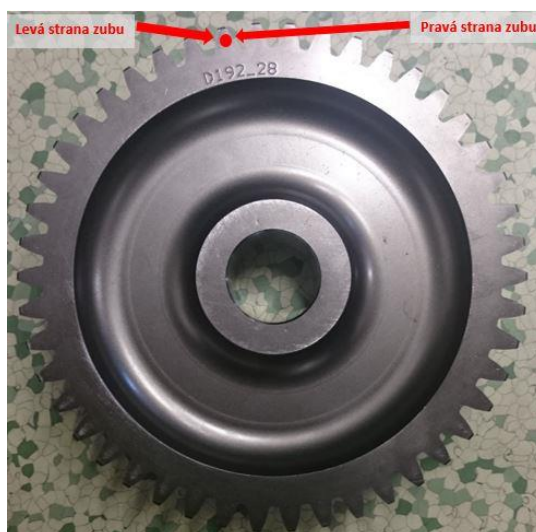
### 6.1. Experimentální materiál

Jako experimentální materiál byly použity dvě série ozubených kol, jejichž výrobní náčrt je na obrázku 40. Kola byla vyrobena frézováním s následným chemicko-tepelným zpracováním a broušením.



Obrázek 40 Náčrt ozubeného kola

Jak kolo vypadá ve skutečnosti, je ukázáno na obrázku 41. Strana, na které je vyraženo číslo kola, např. D192-28, je považována za „přední stranu“. Při pohledu na ni rozlišíme strany zubů. Tedy logicky vlevo je levá strana zubu a vpravo pravá strana zubu.



Obrázek 41 Fotografie ozubeného kola

Na jednom kole byla provedena analýza chemického složení. Konkrétně na emisním spektrometru od firmy Oxford Instruments. Výsledné chemické složení v hmotnostních procentech je v tabulce 1. Tyto hodnoty odpovídají oceli s označením 16MnCr5 a naprosto vyhovují požadavkům výrobce, resp. odběratele.

	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Al
Wt %	0,16	1,18	0,27	0,005	0,017	1,01	0,1	0,18	0,02	0,021

Tabulka 1 Chemické složení ozubených kol

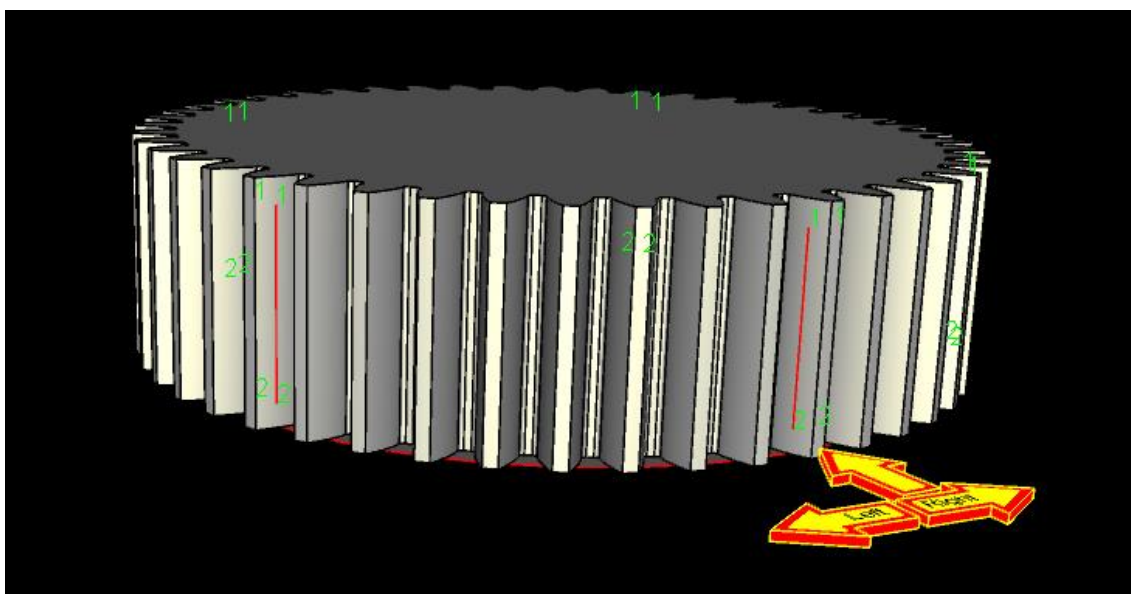
## 6.2. Použité přístroje

Měření zbytkového napětí metodou analýzy Barkhausenova šumu bylo provedeno přístrojem Rollscan 300, vlastněným firmou PCS s.r.o. Od stejné firmy jsem měl k dispozici zubový snímač S1-18-12-01. Dále jsem v experimentu používal měřicí stanici na ozubená kola. Tato zařízení má označení GearScan 500, v němž je umístěn analyzátor Rollscan 250.

## 6.3. Experimentální metodiky a výsledky

Cílem experimentu bylo porovnat série kol na základě integrity povrchu, která byla analyzována metodou analýzy Barkhausenova šumu, a tedy vyjádřena hodnotou magnetoelastického parametru (MP). První série kol, dále nazývaná technologie A, byla obrobena odvalovacím frézováním. Druhá série kol, dále nazývaná technologie B, byla obrobena profilovým frézováním u renomovaného výrobce fréz. Po operaci frézování následovalo chemicko-tepelné zpracování (cementace) a broušení. Obě série kol byly tepelně zpracovávány v jedné dávce a broušeny na jedné brusce za stejných brusných podmínek. Všechna tato opatření v druhém a třetím výrobním kroku byla provedena z důvodu eliminace faktorů ovlivňujících výslednou integritu povrchu. Jinými slovy, jiná dávka polotovaru, rozdílné brusné podmínky, jiná řezná kapalina nebo jiná dávka tepelného zpracování. To vše a mnoho dalších „maličností“ ovlivňují výslednou integritu povrchu a mohou smazat případný rozdíl, který si kola sebou mohou nést z výrobní operace frézování.

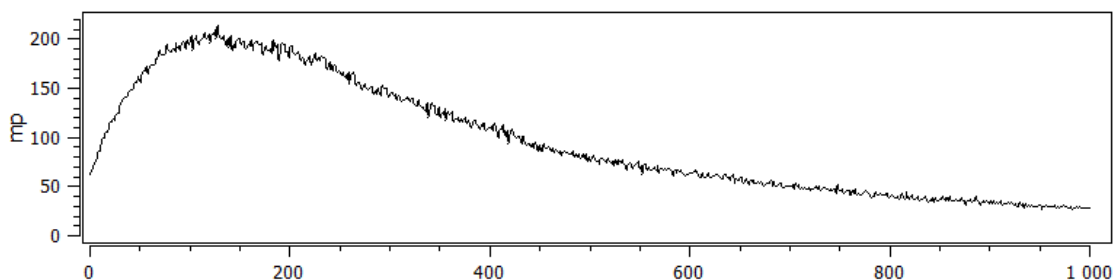
Na kolech, po jednotlivých operacích, byla provedena ruční Barkhausenova zkouška a byly zjištěny hodnoty magnetoelastického parametru (MP). Měření probíhalo na obou stranách zubu po celé jejich délce, a to od přední strany kola k zadní. Po ručním měření následovalo měření robotické. Dráhy měření byly totožné s ručním měřením a jsou zobrazeny na obrázku 42.



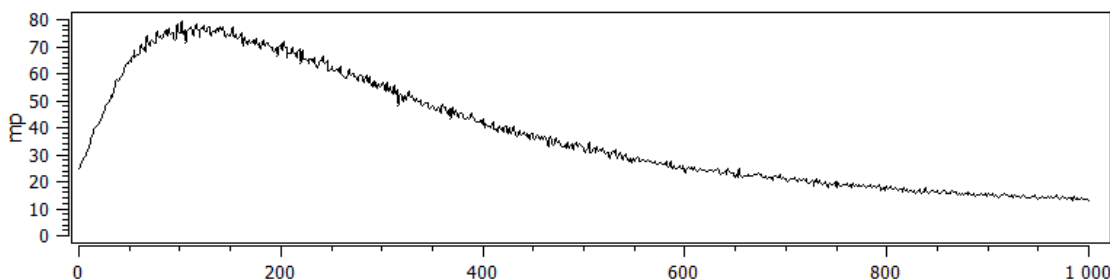
Obrázek 42 Dráhy měření ukázané v softwaru EasyGear

### 6.3.1. Stanovení podmínek měření

Pro stanovení optimálních hodnot magnetizační frekvence a magnetizačního napětí bylo potřeba provést průběhy těchto veličin. Podstata a to, jak se tyto průběhy měří, je popsáno v kapitole 5.5.1. Při praktickém provedení těchto zkoušek můžeme konstatovat naprostou shodu s teorií. Konkrétně, na frekvenci je nejvíce závislá hloubka vniku lokální magnetizace, a tím oblast měřeného materiálu. Nejvyšší hodnoty jsou obvykle měřeny v rozmezí 100 – 150 Hz, což potvrdil i náš experiment. Dále se ukázalo, že křivka frekvenčního přeběhu se téměř nemění v závislosti na tom, po které operaci je měření provedeno. Obrázky 43 a 44 tyto křivky zobrazují tak, že na ose y je MP [-] a na ose x frekvence [Hz]. V obou případech je maximum křivky ve zmíněném rozmezí, proto měřicí frekvence byla zvolena 125 Hz.

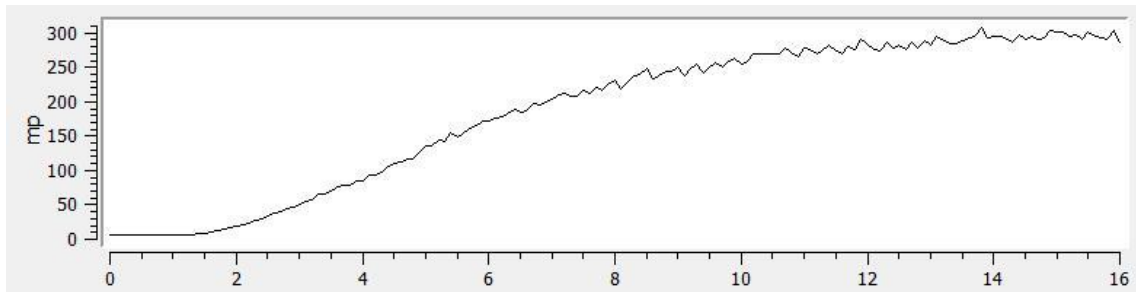


Obrázek 43 Frekvenční přeběh na kole po TZ

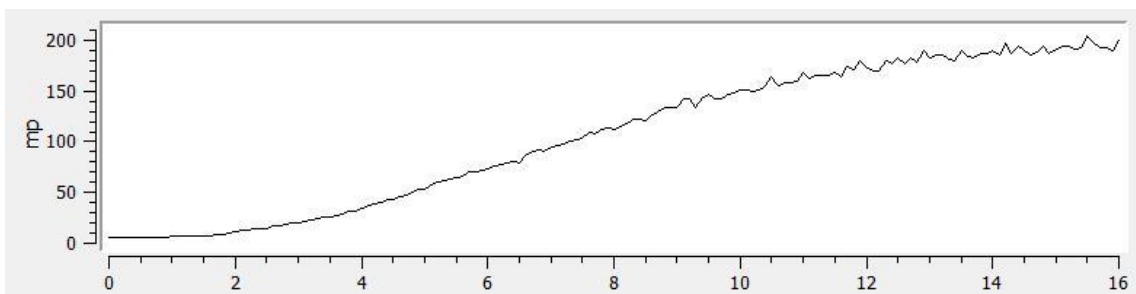


Obrázek 44 Frekvenční přeběh na kole po broušení

Napětové přeběhy kol po tepelném zpracování (obr. 45) a po broušení (obr. 46) jsou si velmi podobné. Důvodem je, že nedochází ke změně struktury ale pouze ke změně rozměru a drsnosti povrchu. Největší stoupání křivek je vidět mezi 6 a 7 V, proto magnetizační napětí bylo zvoleno 6,6V.



Obrázek 45 Napětový přeběh na kole po TZ

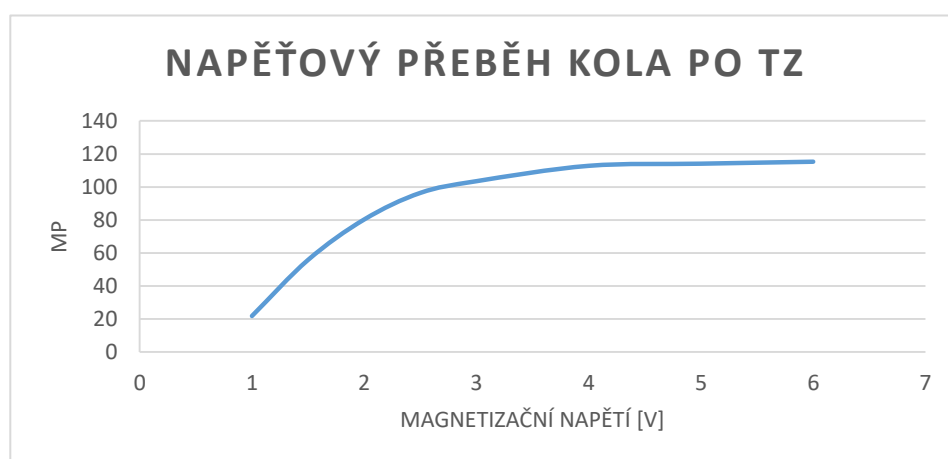


Obrázek 46 Napětový přeběh na kole po broušení

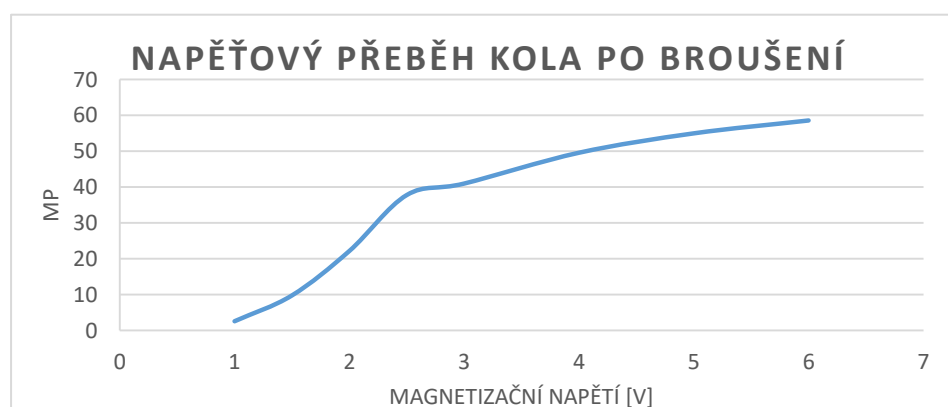
Ostatní nastavení Rollscanu 350:

- tvar magnetizačního signálu: sinus;
- filtr: 70-200 kHz;
- interval čtení magnetoelastického parametru: 50 ms;
- rozsah napětí: 0 – 16 V;
- rozsah frekvencí: 10 – 1000 Hz;
- automatická demagnetizace vypnuta.

Menší problém nastal u robotického měření, jelikož GearScan, resp. Rollscan 250, není vybaven funkcemi napěťového a frekvenčního přeběhu. Magnetizační frekvence je pro naprostou většinu měření z intervalu 100-150 Hz, proto zde byla použita frekvence 125 Hz, stejně jako u ručního měření. Stejně hodnoty magnetizačního napětí jako u ručního měření nemohly být použity z důvodu jiného zdroje magnetického pole a jiného snímače. Hrozilo zde, že magnetizační napětí bude příliš vysoké, což by způsobilo, že hodnota MP by byla satureovaná a výsledky by neodpovídaly realitě. Určení vhodné hodnoty magnetizačního napětí muselo být provedeno experimentálně. Ze skupin kol po tepelném zpracování a po broušení, bylo vybráno jedno kolo, které bylo podrobeno sérii měření ve snaze simulovat napěťový přeběh. Při zvolené magnetizační frekvenci (125 Hz) byla kola změřena za různých hodnot magnetizačního napětí (1, 1.5, 2, 2.5, 3, 4, 5, 6 V). Z výsledků těchto měření byly sestaveny grafy (obrázek 47 a 48), připomínající napěťové přeběhy, které slouží k určení optimální velikosti magnetizačního napětí.



Obrázek 47 Napěťový přeběh na kole po TZ pro robotické měření



Obrázek 48 Napěťový přeběh na kole po broušení pro robotické měření

Z těchto dvou grafických závislostí pak byly určeny optimální velikosti magnetizačního napětí, a sice 1,5V pro kola po TZ a 2,5V pro kola po broušení.

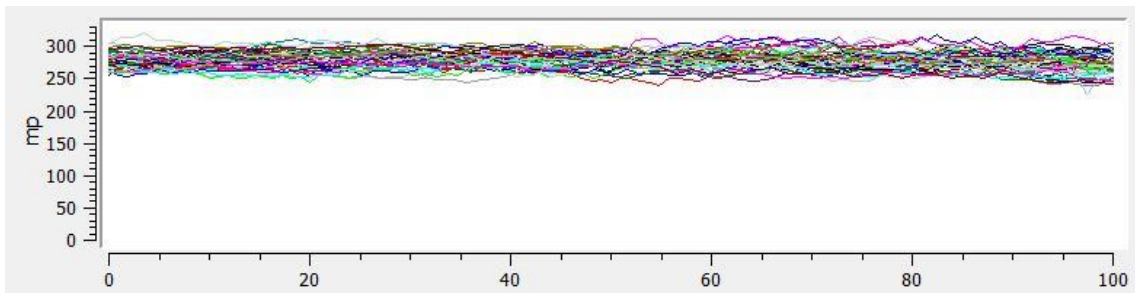
### 6.3.2. Ruční měření

Pro potřeby našeho experimentu nám bylo dodáno 21 ozubených kol, 9 frézovaných technologií A a 12 technologií B. Každé ozubené kolo má 46 zubů. Kdybychom uvažovali, že každý zub změříme po obou jeho stranách tak počet měření vypočteme podle rovnice:

$$n_m = 2 \cdot z \cdot n.$$

V této rovnici  $n_m$  znamená počet měření,  $z$  počet zubů,  $n$  počet ozubených kol, rovnice je vynásobena konstantou dva z důvodu měření po obou stranách zubu. Počet ozubených kol je po každé operaci jiný, konkrétně po TZ 21 a po broušení 10. Po dosažení dostaneme celkem  $n_m = 2852$  měření, což by bylo velmi nákladné, proto počet měření musel být určitým způsobem zredukován.

Byl zvolen následující postup. Nejprve bylo změřeno jedno kolo po frézování, a sice zub po zubu z obou stran. To, jak měření jedné strany dopadlo, je ukázáno na obrázku 49. Vidíme, že velikost magnetoelastického parametru je po délce všech zubů přibližně stejná. Z čehož lze usuzovat, že napětí není ovlivněno nějakými tvarovými nedostatky polotovaru, ale také to, že při frézování se do výrobku vnáší konstantní míra zbytkového napětí. Abychom měli alespoň určitou kontrolu konstantního napětí v zubech po obvodu kola, byly měřeny zuby číslo: 1, 10, 20, 30 a 40. Číslování bylo prováděno tak, že první zub byl zvolen náhodně a dále pokračovalo číslování zubů po směru hodinových ručiček.



Obrázek 49 Záznam MP pro ruční měření všech zubů

Po chemicko-tepelném zpracování všech 21 kol bylo provedeno měření podle výše uvedeného postupu. Posledním výrobním krokem u tohoto typu ozubených kol je broušení. Proto bylo 10 kol (pět z každé série) obroušeno na jedné brusce totožnými brusnými podmínkami. Veškeré měření proběhlo při zvolené magnetizační frekvenci (125 Hz) a zvoleném magnetizačním napětí (6,6V).

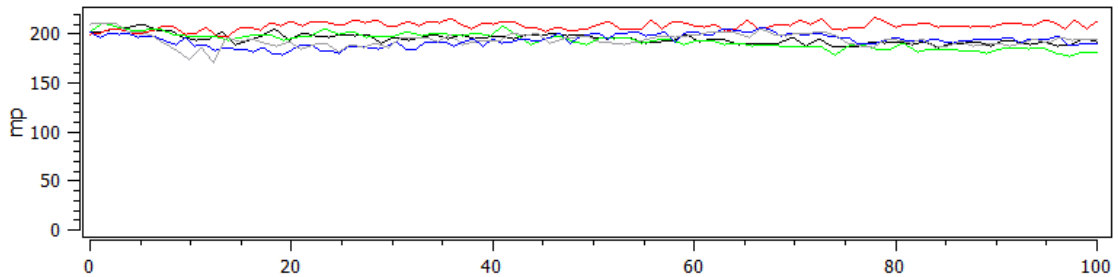
### 6.3.3. Robotické měření

Robotické měření následovalo až po veškerých výrobních operacích, proto nebylo možné změřit všechna kola po každé výrobní operaci, ale pouze ve stavu, ve kterém se nacházela na konci experimentu. Konkrétně 11 kol po TZ a 10 kol po broušení. Hodnota magnetizační frekvence byla pro všechny měření stejná, a sice 125. Hodnoty magnetizačního napětí byly 1,5 V pro měření kol po TZ a 2,5 V pro měření kol po broušení.

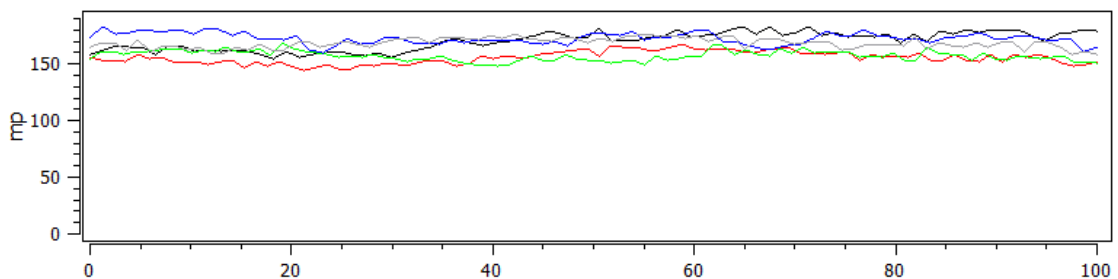
## 7. Výsledky měření

### 7.1. Ruční měření

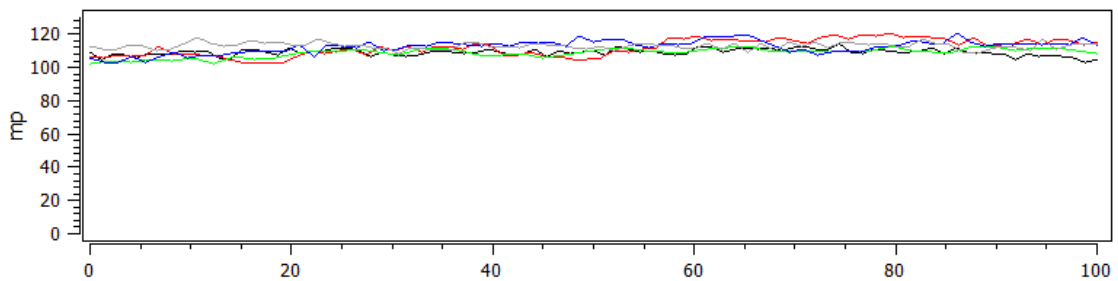
Na obrázcích 51 až 53 je ukázáno vzájemné porovnání průběhu MP na kolech, po jednotlivých výrobních operacích, frézovaných technologií A a technologií B. Výsledky z ručního měření jsou shrnuty do tabulek 2 a 3.



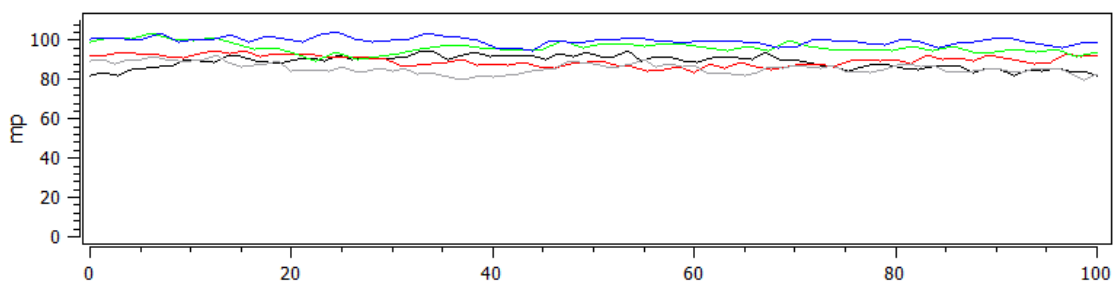
Obrázek 50 Záznam MP ručního měření kola D192-04 po TZ (frézováno technologií A)



Obrázek 51 Záznam MP ručního měření kola D192-29 po TZ (frézováno technologií B)



Obrázek 52 Záznam MP ručního měření kola D192-12 po broušení (frézováno technologií A)



Obrázek 53 Záznam MP ručního měření kola D192-15 po broušení (frézováno technologií B)

Kola frézovaná technologií A				
Označení	Po TZ		Po broušení	
	Levá	Pravá	Levá	Pravá
D192-03	197,78	193,66	108,44	106,82
D192-04	201,62	202,92	109,9	105,65
D192-05	205,44	215,72		
D192-06	229,56	232,74		
D192-11	221	215,78	115,22	109,8
D192-12	210,68	226,9	115,14	116,96
D192-16	220,8	234,58		
D192-17	197,42	206,3		
D192-24	220,26	217,62	110,2	109,74

Tabulka 2 Tabulka hodnot MP ručního měření kol frézovaných technologií A

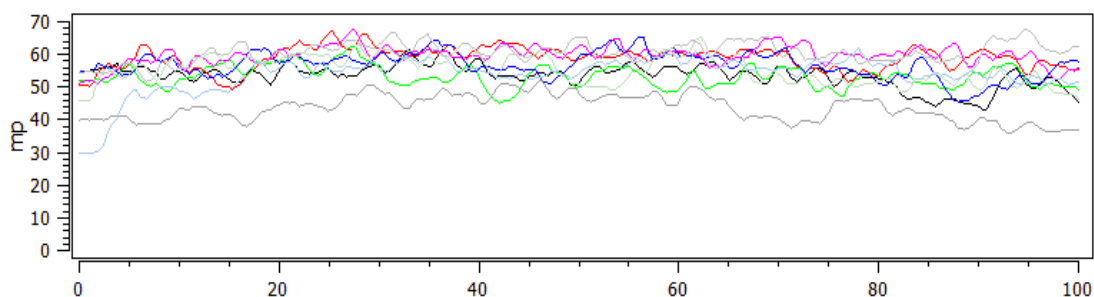
Kola frézovaná technologií B				
Označení	Po TZ		Po broušení	
	Levá	Pravá	Levá	Pravá
D192-08	204,16	200,4		
D192-09	173	168,8		
D192-13	223,82	216,54	109,96	107,24
D192-14	152,56	147,36		
D192-15	198,24	189,66	102,06	97,6
D192-18	184,08	188,08		
D192-20	206,98	204,52		
D192-21	200,96	192,88	105	101,92
D192-22	183,22	187,92		
D192-25	168,8	175,7	97,74	99,22
D192-28	158,56	155,64	88,22	87,2
D192-29	175,1	173,46		

Tabulka 3 Tabulka hodnot MP ručního měření kol frézovaných technologií B

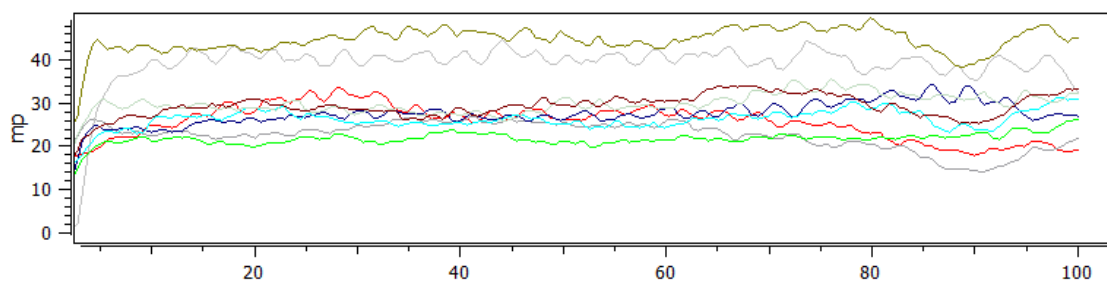
Čísla v tabulkách vyjadřují hodnoty magnetoelastického parametru pro jednotlivá kola po jednotlivých operacích. Konkrétně průměr maximálních hodnot MP na měřených zubech. Na každém kole, po každé operaci, byla změřena pětice zubů z obou stran po celé délce.

## 7.2. Robotické měření

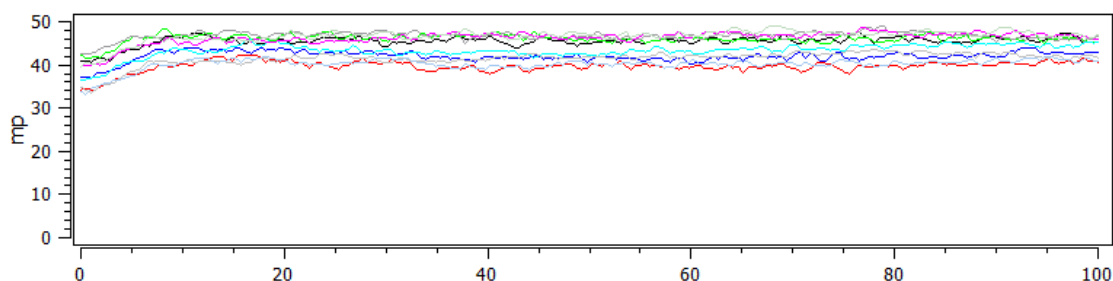
Vzájemné porovnání výsledku robotické měření je provedeno stejně jako porovnání výsledků ručního měření v předchozí podkapitole. Obrázky 54 a 56 ukazují kola frézovaná technologií A po TZ a broušení a obrázky 55 a 57 kola frézovaná technologií B, po týchž operacích.



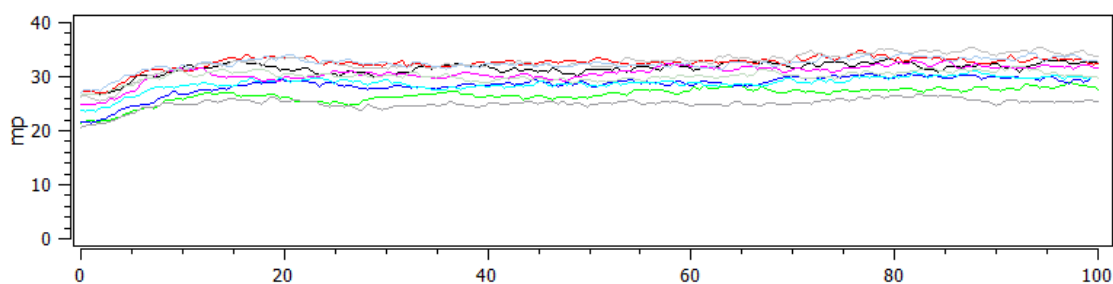
Obrázek 54 Záznam MP z robotického měření kola D192-06 po TZ (frézováno technologií A)



Obrázek 55 Záznam MP z robotického měření kola D192-14 po TZ (frézováno technologií B)



Obrázek 56 Záznam MP z robotického měření kola D192-12 po broušení (frézováno technologií A)



Obrázek 57 Záznam MP z robotického měření kola D192-28 po broušení (frézováno technologií B)

Tyto záznamy jsou, v porovnání se záznamy ručního měření, méně „uhlazené“. Důvodem je menší šířka snímače a jeho rychlost posuvu. Díky těmto dvou faktorům je na povrchu indikována sebemenší změna jakéhokoli parametru, který ovlivňuje hodnotu MP. Výsledky robotického měření jsou zobrazeny v tabulkách 4 a 5. Hodnoty MP vyjadřují průměr průměrných hodnot měření jednotlivých zubů.

Kola frézovaná technologií A		
Označení	Po tepelné zpracování	Po broušení
D192-03		39,24
D192-04		42,31
D192-05	53,46	
D192-06	66,36	
D192-11		33,74
D192-12		46,03
D192-16	58,29	
D192-17	53,82	
D192-24		41,94

Tabulka 4 Tabulka hodnot MP robotického měření kol frézovaných technologií A

Kola frézovaná technologií B		
Označení	Po tepelné zpracování	Po broušení
D192-08	52,47	
D192-09	36,3	
D192-13		38,51
D192-14	34,59	
D192-15		35,84
D192-18	37,08	
D192-20	48,64	
D192-21		39,75
D192-22	43,11	
D192-25		33,39
D192-28		32,03
D192-29	44,14	

Tabulka 5 Tabulka hodnot MP robotického měření kol frézovaných technologií B

### 7.3. Korelace výsledků ručního a robotického měření

Dříve než budou okomentovány výsledky experimentu, přiblížíme si vzájemnou korelaci ručního a robotického měření. V tabulkách 6 a 7 jsou uvedena data (hodnoty MP), ze kterých byl spočítán korelační koeficient. Některé hodnoty ručního měření byly vynechány, a to z důvodu, že nebylo možné změřit kolo v téže konfiguraci pomocí GearScanu (např. kolo D192-03 po TZ). Z teorie korelačního koeficientu vyplývá, že data, mezi kterými se snažíme nalézt vzájemnou korelaci, musí být roztržena do dvou skupin. Této podmínce experiment naprosto vyhovuje. První skupinou jsou hodnoty MP z ručního měření a druhou skupinou hodnoty MP z robotického měření.

Označení	Technologie A po TZ		Technologie A po broušení	
	Ruční	Robotické	Ruční	Robotické
D192-03			107,63	39,24
D192-04			107,78	42,31
D192-05	210,58	53,46		
D192-06	231,15	66,36		
D192-11			112,51	33,74
D192-12			116,05	46,03
D192-16	227,69	58,29		
D192-17	201,86	53,82		
D192-24			109,97	41,94

Tabulka 6 Porovnávací tabulka hodnot MP ručního a robotického měření kol

Označení	Technologie B po TZ		Technologie B po broušení	
	Ruční	Robotické	Ruční	Robotické
D192-08	202,28	52,47		
D192-09	170,9	36,3		
D192-13			108,6	38,51
D192-14	149,96	34,59		
D192-15			99,83	35,84
D192-18	186,08	37,08		
D192-20	205,75	48,64		
D192-21			103,46	39,75
D192-22	185,57	43,11		
D192-25				
D192-28				
D192-29	174,28	44,14		

Tabulka 7 Porovnávací tabulka hodnot MP ručního a robotického měření kol

Celková korelace dat robotického a ručního měření je 0,78 tedy 78%.

Důvodem určité neshody dat je fakt, že robotické měření je citlivější z důvodu menšího rozměru snímače. Další faktory mohou být nestálá rychlost posuvu a poloha snímače u ručního měření.

## 8. Diskuze výsledků

Provedením experimentů byly získány informace o stavu integrity povrchu kol, po jednotlivých výrobních operacích. Integrita povrchu je zde zastoupena magnetoelastickým parametrem (MP). Pracovat se všemi hodnotami by bylo velmi nepřehledné, proto došlo k určité sumarizaci výsledků. Z tabulek 2 a 3, které obsahují hodnoty MP z ručního měření pro kola po jednotlivých operacích, byla vytvořena tabulka 8. Tabulka obsahuje informace o průměrné hodnotě MP pro skupiny kol po jednotlivých operacích a její směrodatné odchylce.

Průměrné hodnoty MP	Technologie A		Technologie B	
	Průměr levé a pravé strany	Směrodatná odchylka	Průměr levé a pravé strany	Směrodatná odchylka
Po TZ	<b>214</b>	<b>13</b>	<b>185</b>	<b>20</b>
Po broušení	<b>111</b>	<b>4</b>	<b>100</b>	<b>7</b>

Tabulka 8 Porovnávací tabulka ručního měření

Nejprve se zaměříme na porovnání technologie A a technologie B na kolech po TZ. Na kolech obráběných technologií A je průměrná hodnota MP  $214 \pm 14$  a na kolech obráběných technologií B je tato hodnota  $185 \pm 20$ . Z těchto hodnot se dá říct, že kola obráběná technologií A jsou z pohledu integrity povrchu v průměru o 16 % horší, než frézovaná technologií B. Naopak kola frézovaná technologií B jsou z pohledu integrity povrchu o 14 % lepší než kola frézovaná technologií A. Ze statistického pohledu pak pro průměry MP na hladině významnosti 95% platí:

- Dolní mez intervalu spolehlivosti pro kola frézovaná technologií A je 208 MP
- Horní mez intervalu spolehlivosti pro kola frézovaná technologií B je 193 MP

Z výsledků je patrné, že na hladině významnosti 95 % jsou kola po TZ frézovaná technologií A statisticky významně horší než kola po TZ frézovaná technologií B.

Stejný postup porovnání těchto dvou výrobních technologií provedeme z dat, naměřených na kolech po broušení. Zde je průměrná hodnota MP na kolech A  $111 \pm 4$  a na kolech B  $100 \pm 7$ . Po broušení jsou kola obrobena technologií B v průměru o 10% lepší než kola obrobena technologií A, resp. kola A jsou o 11% procent horší než kola B. Ze statistického pohledu na hladině významnosti 95% platí:

- Dolní mez intervalu spolehlivosti pro kola frézovaná technologií A je 109 MP
- Horní mez intervalu spolehlivosti pro kola frézovaná technologií B je 104 MP

Na kolech po broušení je statistický rozdíl na hladině významnosti 95% menší než na kolech po TZ, ovšem ne zanedbatelný.

Totožný postup, jaký byl proveden v předchozích odstavcích s výsledky ručního měření, bude proveden s výsledky robotického měření. Tabulka průměrných hodnot MP robotického měření (tab. 9) vychází z tabulek 4 a 5 uvedených v kapitole 7.2.

Průměrné hodnoty MP	Kola frézovaná technologií A		Kola frézovaná technologií B	
	Hodnota MP	Směrodatná odchylka	Hodnota MP	Směrodatná odchylka
Po TZ	<b>58</b>	<b>6</b>	<b>42</b>	<b>7</b>
Po broušení	<b>41</b>	<b>4</b>	<b>36</b>	<b>3</b>

Tabulka 9 Porovnávací tabulka robotického měření

Na robotickém měření kol po TZ můžeme opět pozorovat, že kola frézovaná technologií A jsou na hladině významnosti 95% statisticky horší než kola frézovaná technologií B.

Poslední zkoumanou skupinou dat jsou hodnoty MP získané robotickým měřením kol po broušení. Zde platí, že na kolech obráběných technologií A je průměrná hodnota MP  $41 \pm 4$  a na kolech obráběných technologií B je tato hodnota  $36 \pm 3$ . Z těchto hodnot se dá říct, že kola obráběná technologií A jsou z pohledu integrity povrchu v průměru o 14 % horší, než frézovaná technologií B. Naopak kola frézovaná technologií B jsou z pohledu integrity povrchu o 12 % lepší než kola frézovaná technologií A. Ze statistického pohledu pak pro průměry MP na hladině významnosti 95% platí:

- Dolní mez intervalu spolehlivosti pro kola frézovaná technologií A je 39 MP
- Horní mez intervalu spolehlivosti pro kola frézovaná technologií B je 38 MP

Z výsledků je patrné, že na hladině významnosti 95 % jsou kola po broušení frézovaná technologií A statisticky téměř totožné jako kola po TZ frézovaná technologií B.

Z předchozího je patrné, že kola frézovaná technologií A mají statisticky horší integritu povrchu než kola frézovaná technologií B. Dá se tedy předpokládat, že změna technologie frézování může vést k lepší integritě povrchu na výsledné součásti. Větší rozdíl v hodnotách MP nalezneme na kolech po TZ. Tento fakt lze vysvětlit tím, že při broušení dojde k odstranění části zplastizované vrstvy, která zhoršuje integritu povrchu. Dále lze potvrdit fakt, že ovlivnění povrchové a podpovrchové vrstvy frézováním není zcela odstraněno při procesu tepelného zpracování.

Vhodnost použití metody Barkhausenova šumu na posouzení integrity povrchu ozubených kol je popsána v publikaci *Strukturní vlastnosti podpovrchových vrstev broušených ozubených kol a jejich vazba na parametry z analýzy Barkhausenova šumu* [8]. Zde je mimo jiné popsána vzájemná korelace hodnot magnetoelastického parametru a výsledků ze zkoušky rentgenovou difrakcí. Detailní výsledky této korelace jsou publikovány v článcích *Using Barkhausen Noise Analysis for evaluation of capability different grinding machines* [37] a *The Attempt of New Approach to Evaluate Surface Integrity* [38].

## 9. Závěr

Diplomová práce byla zaměřena na analýzu integrity povrchu s využitím metody Barkhausenova šumu. V první teoretické části byly objasněny pojmy integrity povrchu a zbytkového napětí. Dále zde byla detailně popsána analýza Barkhausenova šumu, nedestruktivní metoda k zjištění integrity povrchu. Cílem druhé, experimentální, části bylo potvrdit nebo vyvrátit předpoklad, že výsledná integrita povrchu je ovlivněna primární výrobní operací, v tomto případě frézováním. Polotovary ozubených kol, z materiálů 16MnCr5, byly frézovány dvěma technologiemi. První skupina polotovarů byla vyfrézovaná na odvalovací fréze, která je v práci označovaná jako technologie A. Technologií B, čímž byla vyfrézovaná druhá skupina kol, je nazýváno inovativní profilové frézování. Ofrézované polotovary byly chemicko-tepelně zpracovány (cementovány) a následně obroušeny.

Na kolech po výrobních operacích tepelného zpracování a broušení byla provedena ruční i robotická analýza Barkhausenova šumu. Na základně naměřených hodnot magnetoelastického parametru lze konstatovat, že změnou primární technologie obrábění můžeme dosáhnout lepší výsledné integrity povrchu. Z experimentálních dat také vyplývá, že materiál zplastizovaný při frézování zůstane více či méně ovlivněn i po procesu tepelného zpracování. Dokončovací metodou může dojít k částečnému odbroušení zplastizované vrstvy, čímž může dojít ke zlepšení výsledné integrity povrchu součásti. Pokud však budou špatně zvoleny řezné podmínky dokončovací operace, může dojít k ještě většímu ovlivnění, zplastizování povrchové a podpovrchové vrstvy, čímž dojde i ke zhoršení výsledné integrity povrchu.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] MANGL, P. *Optimalizace parametrů broušení slinutých karbidů diamantovými koutouči*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 55 s., 4 s. příloh. Vedoucí práce doc. Ing. Anton Humár, CSc.
- [2] BUMBÁLEK, B. *Integrita povrchu a její význam pro posouzení vhodnosti dané plochy pro její funkci*, VUT Brno.
- [3] KŘÍŽ, A. *Integrita povrchu v oblasti tepelného zpracování*. Dostupné z: [http://www.ateam.zcu.cz/download/Integrita\\_prednaskaTZ.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/download/Integrita_prednaskaTZ.pdf) [cit. 2018-02-13]
- [4] SCHMIDOVÁ, L. *Hodnocení parametrů integrity povrchu a využití poznatků pro zefektivnění obrábění ozubených kol*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2014. 116 s.
- [5] NOVÁK, M. F., HOLEŠOVSKÝ. *Studium integrity obrobeného povrchu*. Dostupné z: <http://web.tuke.sk/fvtpo/journal/pdf08/2-str-11-13.pdf> [cit. 2018-02-13]
- [6] LÁNC, Kryštof. *Problematika tryskání*. Brno, 2017. 36s, 1 příloha, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce Ing. Eva Peterková, Ph.D.
- [7] DÖMÉNY, T. *Analýza vlivu parametrů procesu broušení na integritu obrobené plochy se zaměřením na zbytková napětí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 65 s, příloh. 2. Vedoucí diplomové práce: Ing. Ildikó Putzová, Ph.D.
- [8] BLAŽÍČEK, Dominik. *Strukturní vlastnosti podpovrchových vrstev broušených ozubených kol a jejich vazba na parametry z analýzy Barkhausenova šumu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 56 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zina Pavloušková, Ph.D.
- [9] KŘÍŽ, M. *Vliv povrchu na užití vlastnosti povrchu*. Dostupné z: [http://www.ateam.zcu.cz/download/kriz\\_prispevek\\_technologie\\_2011.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/download/kriz_prispevek_technologie_2011.pdf) [cit. 2018-02-28]
- [10] ROSSINI, N. S., DASSISTI, M., BENYOUNIS, K. Y., & Olabi, A. G. (2012). *Methods of measuring residual stresses in components*. *Materials & Design*, 35, 572-588.
- [11] KOBR, J. *Barevná metalografie železných kovů*. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra dopravních prostředků a diagnostiky, 2012. 51 s.

- [12] ZEMČÍK, Oskar. Změna vlastností oběžných drah valivých ložisek po aplikaci válečkování. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2002. 35 s. Školitel Prof. Ing. Karel Kocman, DrSc.
- [13] Stresscraft. *Stresscraft*. [online]. England : Dr. Phil Whitehead, [cit. 2018-02-28]. Oddíl, Residual stress determination. Dostupné na: [http://www.stresscraft.co.uk/residual\\_stress\\_determination.htm](http://www.stresscraft.co.uk/residual_stress_determination.htm) .
- [14] M. Steinzig and E. Ponslet, *Residual Stress Measurement using the hole drilling method and laser speckle interferometry, Parts I-IV*, Experimental Techniques, Vol.27, Issues 3,4,5,&6, 2003
- [15] G. S. Schajer and M. Steinzig, *Full-Field Calculation of Hole-Drilling Residual Stresses from ESPI Data*, Experimental Mechanics, Vol.45, No.6, pp.526-532, 2005
- [16] Database. In: Stresstech [online]. [cit. 2018-03-20]. Obrázek ve formátu JPG. Dostupné z: <http://www.stresstech.com/en-fi/products/espi-hole-drilling-equipment/prism-equipment/#>.
- [17] FITZPATRICK, M.E., A.T. FRY, P. HOLDWAY, F.A. KANDIL, J. SHACKLETON a L. SUOMINEN Determination of residual stresses by X-ray diffraction.. In: Measurement Good Practice Guide No. 52 [online]. Teddington, 2005, s. 77 [cit. 2018-03-20]. ISSN 1368-6550.
- [18] GANEV, Nikolaj. *Difrakční analýza mechanických napětí*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické, 1995. ISBN 80-010-1366-9.
- [19] MALEC, Jiří. *Metoda analýzy Barkhausenova šumu. Materiál pro školení uživatelů zařízení pro aplikaci metody BNA*. Žďár nad Sázavou: PCS spol. s r. o., 2012. 18 s.
- [20] MALEC, Jiří. *Aplikace Barkhausenova šumu a mobilních difraktometrů. Texty k semináři*. Žďár nad Sázavou: PCS spol. s r. o., 2000. 36 s.
- [21] MALEC, Jiří. *Integrita povrchu, brusné spáleniny a přístrojové možnosti hodnocení*. Žďár nad Sázavou: PCS spol. s r. o., 2010. 4 s.
- [22] GRIFFITHS, David J. *Introduction to electrodynamics*. 3rd. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall, 1999. ISBN 0-13-805326-X.
- [23] BOZORTH, R. M. *Ferromagnetism*. Van Nostrand Company Inc. 1951
- [24] VARGA, Rastislav. *Doménové steny a ich dynamika*. Košice, 2014. ISBN 978-80-8152-173-7.
- [25] Petr Kulhánek: *Statistická fyzika*, učební text pro doktorské studium, FEL ČVUT, 2002

- [26] Institute of Mathematics. *Czech Digital Mathematics Library*. [online]. Praha : Czech Digital Mathematics Library, poslední aktualizace 9. 9. 2015 [cit. 2018-03-25]. Oddíl, Bitstream. Část, Pokroky matematiky, fyziky a astronomie. Dostupné na: <[http://www.dml.cz/bitstream/handle/10338.dmlcz/137313/Po-krokyMFA\\_02-1957-4\\_11.pdf](http://www.dml.cz/bitstream/handle/10338.dmlcz/137313/Po-krokyMFA_02-1957-4_11.pdf)>.
- [27] *Magnetické materiály*, Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava – dostupné z: [http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/ETMAT/animace%20SWF/4\\_Magneticke\\_materialy.swf](http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/ETMAT/animace%20SWF/4_Magneticke_materialy.swf) [cit. 2018-04-03]
- [28] JILES, D. C. *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials*. Champan and Hall, 1991
- [29] ŠUMPELOVÁ, J. *Magnetostrikční vibrační generátor*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 68 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.
- [30] 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
- [31] UMI FS ČVUT. *Ústav materiálového inženýrství*. [online]. Praha : Ústav materiálového inženýrství, poslední aktualizace 22. 3. 2018 [cit. 2018-04-12]. Oddíl, Výuka, Bakalářské studium. Část, Nauka o materiálu II: heslo „Struktura a vlastnosti materiálu a jejich zkoušení“ Dostupné na: <[http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/3\\_2\\_\\_struktura-a-vlastnosti-materialu-a-jejich-zkouseni.pdf](http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/3_2__struktura-a-vlastnosti-materialu-a-jejich-zkouseni.pdf)>.
- [32] *Stresstech* [online]. [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: <https://www.stresstech.com/en-fi/products/barkhausen-noise-equipment/barkhausen-noise-analysis/>
- [33] Hodnocení nepříznivých parametrů obrobeného povrchu a technologie metodou analýzy Barkhausenova šumu. *Interní zpráva*, Praha 2007
- [34] MALEC, J. Některé nepříliš známé pojmy. *Strojírenská technologie*, ročník XI, 3/2006, s. 4-5. ISSN 1211-4162.
- [35] WILLCOX, Mark., MYSAK Todd. *An Introduction to Barkhausen Noise and its Applications*. Insight NDT Equipment Limited, 2000 – 2004. Článek dostupný >  
<<http://insightndt.com/papers/technical/t013.pdf>.
- [36] Stresstech. *Stresstech*. [online]. Finland : Stresstech, [cit. 2018-04-15]. Dostupné na: < <https://www.stresstech.com/en-fi/>> .
- [37] MALEC, Jiří. BLAŽÍČEK, Dominik, ČERVINKA, Filip. *Using Barkhausen Noise Analysis for evaluation of capability of different grinding machines*. Žďár nad Sázavou, Brno: PCS spol. s r. o., Vysoké učení technické v Brně, 2015. 7 s.

- [38] MALEC, J., F. ČERVINKA, D. BLAŽÍČEK a J. SUOKNUUTI. The Attempt of New Approach to Evaluate Surface Integrity. In: 12th Conference on Local Mechanical Properties 2015 [online]. Liberec: Trans Tech Publications, 2015, s. 4. ISBN 978-3-03835-720-9. ISSN 1662-9507

## Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol	Rozměr	Veličina
B	[T]	Magnetická indukce
B <sub>r</sub>	[T]	Zbytková indukce
d	[nm]	Mezirovinná vzdálenost
E	[Pa]	Youngův modul pružnosti
f	[Hz]	Frekvence
H	[A/m]	Intenzita magnetického pole
H <sub>c</sub>	[A/m]	Koercitivní síla
HB	[-]	Tvrдость podle Brinella
MP	[-]	Magnetoelastický parametr
n	[-]	Řád reflexe
R <sub>m</sub>	[Pa]	Mez pevnosti
SMZ	[-]	Specializované měřící zařízení
TZ	[-]	Tepelné zpracování
μ	[H/m]	Permeabilita
μ <sub>0</sub>	[H/m]	Permeabilita vakua
μ <sub>r</sub>	[-]	Relativní permeabilita
σ	[Pa]	Napětí
λ	[nm]	Vlnová délka záření
θ	[-]	Braggův úhel

## Seznam použitých obrázků a tabulek

Obrázek 1 Tlakové pnutí [6].....	14
Obrázek 2 Graf závislosti vnitřního pnutí na hloubce pod povrchem [6].....	15
Obrázek 3 Závislost velikosti zbytkových napětí na mezi únavy v ohybu [2] .....	15
Obrázek 4 Rozložení teploty při broušení [7] .....	17
Obrázek 5 Hloubkový profil napětí během obrábění [7] .....	17
Obrázek 6 Znázornění makroskopických ( $\sigma^I$ ), mikroskopických ( $\sigma^{II}$ ) a submikroskopických ( $\sigma^{III}$ ) zbytkových napětí [4] .....	19
Obrázek 7 Hloubkový profil zbytkového napětí - Typ 1 [7] .....	19
Obrázek 8 Hloubkový profil zbytkového napětí - Typ 2 [7] .....	20
Obrázek 9 Hloubkový profil zbytkového napětí - Typ 3 [7] .....	20
Obrázek 10 Hloubka průniku a prostorové rozlišení jednotlivých metod hodnocení zbytkových napětí. Destruktivní a semidestruktivní metody jsou označeny šedou barvou. [4].....	22
Obrázek 11 Nalepovací přípravek s tenzometry pro měření deformace vyvrtané díry [13].....	24
Obrázek 12 Odvrtávací metoda - deformace měřena ESPI [14].....	24
Obrázek 13 Interferogram [15].....	25
Obrázek 14 Zařízení pro odvrtávací metodu Stresstech Prism [16] .....	25
Obrázek 15 Změna Braggova úhlu při zatížení krystalické mřížky silou F [18] .....	26
Obrázek 16 Rentgenový difraktometr Stresstech G3 [16].....	26
Obrázek 17 Původní Barkhausenův experiment [20] .....	27
Obrázek 18 Schematicky znázorněná doménová struktura feromagnetického materiálu, bez působení vnějšího magnetického pole [23] .....	29
Obrázek 19 Schéma orientace magnetických domén při působení vnějšího magnetického pole [4] .....	29
Obrázek 20 Skoky na hysterezní křivce [19] .....	30
Obrázek 21 Různé tvary hysterezních křivek pro magneticky měkké a tvrdé materiály [28].....	31
Obrázek 22 Změna doménové struktury vlivem napětí [20].....	32
Obrázek 23 Vliv napětí na amplitudu Barkhausenova šumu [30] .....	33
Obrázek 24 Vliv tvrdosti na amplitudu Barkhausenova šumu [30] .....	34
Obrázek 25 Závislost MP na integritě povrchu [32] .....	34
Obrázek 26 Rollscan 350.....	35
Obrázek 27 Napěťový přeběh.....	36
Obrázek 28 Frekvenční přeběh .....	36
Obrázek 29 Typický hloubkový profil zbytkových napětí v materiálu [33].....	37
Obrázek 30 Schéma zapojení uvnitř snímače [34].....	38
Obrázek 31 Univerzální snímač.....	39
Obrázek 32 Zubový snímač .....	39
Obrázek 33 Interface softwaru ViewScan.....	40
Obrázek 34 Interface softwaru MicroScan [36].....	40

Obrázek 35 Stresstech CamScan 300 [36] .....	41
Obrázek 36 Stresstech CrankScan 300 [36] .....	41
Obrázek 37 Stresstech GearScan 500 [36].....	42
Obrázek 38 Interface softwaru EasyGear .....	42
Obrázek 39 Stresstech RoboScan 500 [36] .....	43
Obrázek 40 Náčrt ozubeného kola .....	44
Obrázek 41 Fotografie ozubeného kola.....	44
Obrázek 42 Dráhy měření ukázané v softwaru EasyGear.....	45
Obrázek 43 Frekvenční přeběh na kole po TZ .....	46
Obrázek 44 Frekvenční přeběh na kole po broušení .....	46
Obrázek 45 Napěťový přeběh na kole po TZ .....	47
Obrázek 46 Napěťový přeběh na kole po broušení.....	47
Obrázek 47 Napěťový přeběh na kole po TZ pro robotické měření .....	48
Obrázek 48 Napěťový přeběh na kole po broušení pro robotické měření.....	48
Obrázek 49 Záznam MP pro ruční měření všech zubů .....	49
Obrázek 50 Záznam MP ručního měření kola D192-04 po TZ (frézováno technologií A) .....	50
Obrázek 51 Záznam MP ručního měření kola D192-29 po TZ (frézováno technologií B) .....	50
Obrázek 52 Záznam MP ručního měření kola D192-12 po broušení (frézováno technologií A).....	50
Obrázek 53 Záznam MP ručního měření kola D192-15 po broušení (frézováno technologií B).....	50
Obrázek 54 Záznam MP z robotického měření kola D192-06 po TZ (frézováno technologií A).....	52
Obrázek 55 Záznam MP z robotického měření kola D192-14 po TZ (frézováno technologií B).....	52
Obrázek 56 Záznam MP z robotického měření kola D192-12 po broušení (frézováno technologií A).....	52
Obrázek 57 Záznam MP z robotického měření kola D192-28 po broušení (frézováno technologií B).....	52
Tabulka 1 Chemické složení ozubených kol.....	44
Tabulka 2 Tabulka hodnot MP ručního měření kol frézovaných technologií A.....	51
Tabulka 3 Tabulka hodnot MP ručního měření kol frézovaných technologií B.....	51
Tabulka 4 Tabulka hodnot MP robotického měření kol frézovaných technologií A .....	53
Tabulka 5 Tabulka hodnot MP robotického měření kol frézovaných technologií B .....	53
Tabulka 6 Porovnávací tabulka hodnot MP ručního a robotického měření kol .....	54
Tabulka 7 Porovnávací tabulka hodnot MP ručního a robotického měření kol .....	54
Tabulka 8 Porovnávací tabulka ručního měření .....	55
Tabulka 9 Porovnávací tabulka robotického měření .....	56