



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

STRUKTURNÍ VLASTNOSTI PODPOVR- CHOVÝCH VRSTEV BROUŠENÝCH OZU- BENÝCH KOL A JEJICH VAZBA NA PARA- METRY Z ANALÝZY BARKHAUSENOVA ŠUMU

STRUCTURAL PROPERTIES OF THE SUBSURFACE GROUNDGEARS AND THEIR
RELATION TO THE PARAMETERS OF THE BARKHAUSENNOISE ANALYSIS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Dominik Blažíček

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Zina Pavloušková, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav materiálových věd a inženýrství
Student:	Dominik Blažíček
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Zina Pavloušková, Ph.D.
Akademický rok:	2015/16

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 bakalářské práce:

Strukturní vlastnosti podpovrchových vrstev broušených ozubených kol a jejich vazba na parametry z analýzy Barkhausenova šumu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při finálním broušení dochází ke změně podpovrchových partií tvrdého ocelového dílu. Cílem práce je srovnat parametry integrity povrchu získané nedestruktivní metodou analýzy Barkhausenova šumu s charakteristikami metalografickými a zvládnutí odpovídající přístrojové techniky.

Cíle bakalářské práce:

Porovnat parametry integrity povrchu získané nedestruktivní metodou analýzy Barkhausenova šumu s výsledky odpovídající metalografické analýzy.

Seznam literatury:

Clark, R. J. H., Hester, R. E.: Spectroscopy for Surface Science. Advances in Spectroscopy Volume 26. John Willey & Sons Ltd., 1998. 339 s.

Brandon, D., Kaplan, W. D.: Microstructural Charakterization of Materials. John Willey & Sons Ltd., 1999. 409 s.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

ředitel ústavu

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

Abstrakt:

Bakalářská práce se zabývá nedestruktivním hodnocením integrity povrchu analýzou Barkhausenova šumu v závislosti na mikrostruktuře materiálu, sledovanou za pomoci metalografické analýzy. Vzájemná souvislost je posuzována na velmi namáhaných ozubených kolech, u kterých je nutná vysoká životnost. Tato kola byly vyrobena odvalovacím broušením, které má na výslednou integritu zásadní vliv. První část bakalářské práce se zabývá samotnou výrobou ozubených kol. Ve druhé části jsou detailně popsány obě dvě zmiňované zkoušky. Poslední část je zaměřena na praktické provedení těchto zkoušek na ozubených kolech

Klíčová slova:

Metoda analýzy Barkhausenova šumu, metalografická zkouška, integrita povrchu, výroba ozubení

Abstract:

Batchelo thesis deals with non-destructive evaluation of surface integrity, which uses analysis of Barkhausen noise in dependence on microstructure of material, tested by metallographic analysis. Their correlation is assessed on heavily loaded gears, which need to have high life time period. These gears were produced by continuous gear grinding, which influences the final integrity. The first part deals with the production of gears. The second part describes in details both experiments. Last part is devote to practical performance of these tests on produced gears.

Key words:

Barkhausen noise analysis, metallographic test, surface integrity, manufacture of gears

Bibliografická citace

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.

Prohlášení

*Já, Dominik Blažíček prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Strukturní vlastnosti podpovrchových vrstev broušených ozubených kol a jejich vazba na parametry z analýzy Barkhausenova šumu* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na konci práce.*

V Brně dne: 22. 5. 2016

Podpis:

Dominik Blažíček

Poděkování

Děkuji tím to Ing. Zině Pavlouškové, PhD. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce. Dále děkuji Ing. Jaroslavu Novákovi ze Žďas a.s. za pomost a poskytnutí laboratoře pro metalografickou zkoušku a firmě PCS spol. s.r.o. za poskytnutí měřicího přístroje Rollscan a potřebných snímačů.

Obsah

1. Úvod	10
2. Výroba ozubených kol	11
2.1. Frézování	11
2.1.1. Frézování dělicím způsobem tvarovými kotouči	11
2.1.2. Frézování odvalovacím způsobem	12
2.2. Broušení	12
2.2.1. Broušení dělicím způsobem tvarovými kotouči	12
2.2.2. Broušení odvalovacím způsobem	13
2.2.3. Brusné materiály	14
3. Zkoušky měření integrity povrchu a zbytkového napětí	15
3.1. Definice pojmu integrita povrchu	15
3.2. Definice pojmu zbytkové napětí	15
3.3. Způsoby dělení zkoušek	17
3.4. Zkoušky na měření zbytkového napětí	18
3.4.1. Mechanická	18
3.4.2. Difraktometrická	18
3.4.3. Metalografická	18
3.4.4. Magnetická	18
3.4.5. Ultrazvuková	18
3.4.6. Chemické leptání	18
4. Barkhausenova zkouška	20
4.1. Historie	20
4.2. Podstata	21
4.2.1. Magnetizační frekvence	25
4.2.2. Hodnoty měření	26
4.3. Vhodnost užití na ozubená kola	28
4.4. Měřicí přístroj – Rollscan	29
4.5. Snímače	31
4.5.1. Univerzální snímač	32
4.5.2. Zubový snímač	33
5. Metalografická zkouška	34
5.1. Příprava vzorku	34
5.1.1. Volba vzorku a jejich úprava	35
5.1.2. Preparace vzorku	35

5.1.3.	Broušení	37
5.1.4.	Leštění	38
5.1.5.	Vyvolání struktury	40
5.2.	Hodnocení vzorků	42
5.2.1.	V neleptaném stavu	43
5.2.2.	V naleptaném stavu	45
6.	Praktická část	46
6.1.	Použité přístroje	46
6.2.	Měření analýzou Barkhausenova šumu	47
6.2.1.	Stanovení optimálního nastavení přístroje	47
6.2.2.	Výběr vzorku	48
6.2.3.	Měření jednotlivých zubů	49
6.3.	Výsledky z metalografické zkoušky	51
7.	Závěr.....	53
	Seznam použitých zdrojů	54
	Seznam použitých symbolů.....	57
	Seznam použitých obrázků a tabulek.....	58

1. Úvod

Broušení je dokončovací metoda při výrobě ozubených kol. U těchto výrobků je velmi důležitá výsledná integrita povrchu pracovních ploch. Tato bakalářská práce byla vypracována souběžně s projektem na výběr brusky ozubení a optimalizaci brusných podmínek, do kterého jsem byl zapojen. Jedním z kritérií byla výsledná integrita povrchu. Naším úkolem bylo měřit zbytková napětí na vzorcích, broušených za stejných brusných podmínek na různých bruskách. Měření probíhalo metodou analýzy Barkhausenova šumu, která bude v této práci podrobněji vysvětlena. Do této práce byly vybrány charakteristické vzorky, na kterých po Barkhausenovském měření byla provedena metalografická zkouška. Princip a způsob provedení této zkoušky je v práci také podrobně rozebrán. V samotném závěru práce se budu zabývat vyhodnocením těchto experimentů a porovnání závislosti integrity povrchu a strukturních změn v materiálu.

2. Výroba ozubených kol

Výroba ozubení je velmi složitý technologický proces, ovšem ozubená kola jsou ve strojírenství nenahraditelná. Ozubená kola jsou základem každé převodovky, diferenciálu a mnoha dalších zařízení, které každý den využíváme. Složitost výroby ozubení spočívá v tom, že je nutno splnit poznatky z teoremu odvalu, což vyžaduje velkou geometrickou i rozměrovou přesnost. Při nedostatečné přesnosti tvar boku zubu neodpovídá evolventě, což způsobí, že kola, resp. jejich zuby, se po sobě neodvalují, ale navzájem se třou. Toto tření způsobuje velký otěr zubu a dochází ke znehodnocení kola. [1,2]

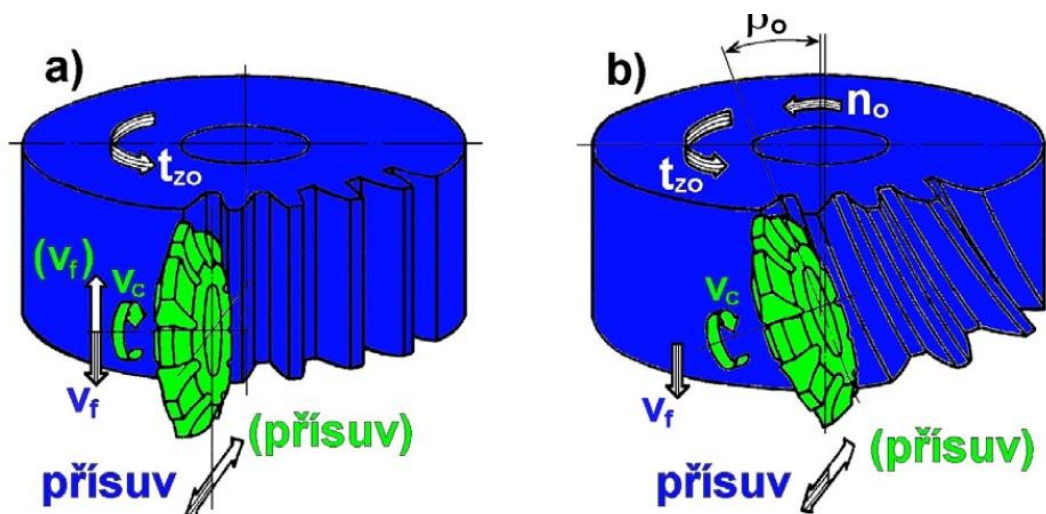
Typů ozubení je několik, mezi nepoužívanější patří ozubení s čelními přímými/šikmými/šípovými zuby, dále jsou to ozubení šneková a kuželová. Výroba ozubených kol se provádí frézováním, obrážením nebo protahováním. Jako dokončovací metody se používá ševingování nebo broušení. Ozubená kola, která byla použita pro praktickou část, byla frézována a následně broušena, proto si tyto metody stručně vysvětlíme. [1]

2.1. Frézování

Při frézování dochází k obrábění polotovaru tzv. „nahrubo“. Vyfrézují se přibližné tvary zubu s přídávkem na broušení. Požadovaná přesnost je oproti broušení výrazně nižší. Po vyfrézování obrobku velmi často dochází k povrchovým a tepelně chemickým operacím, např. cementování, nitridování, kalení atd. Frézování ozubených kol se provádí dvěma způsoby [1]:

2.1.1. Frézování dělicím způsobem tvarovými kotouči

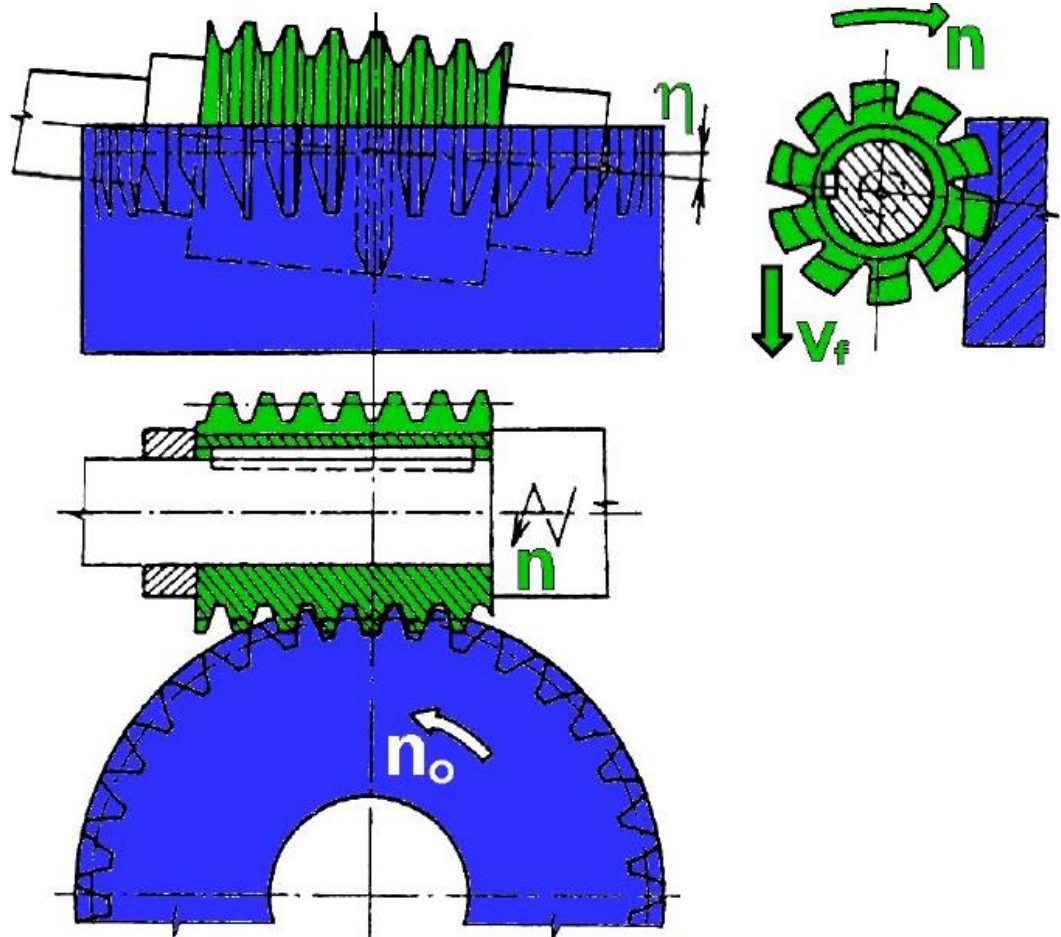
Při frézování dělicím způsobem se obrobí jedna zubová mezera, poté se obrobek pootočí o jednu zubovou rozteč a operace se opakuje. Tento způsob se používá zejména při kusové a malosériové výrobě. Hlavní výhody této metody jsou jednoduchost, nízká cena nástroje, rychlost seřízení stroje a nevýhody nižší přesnost a menší výrobnost. Profil frézy odpovídá profilu zubu a používá se kotoučová nebo stopkové modulová fréza.



Obrázek 1 Schéma frézování dělicím způsobem [1]

2.1.2. Frézování odvalovacím způsobem

Frézování odvalovacím způsobem je založeno na principu záběru nástroje do obrobku. Nástrojem je odvalovací fréza, která má tvar evolventního šneku. Řezný pohyb je způsoben vzájemnou rotací nástroje a obrobku. Platí, že za jednu otáčku frézy se obrobek potočí o jednu zubovou rozteč.



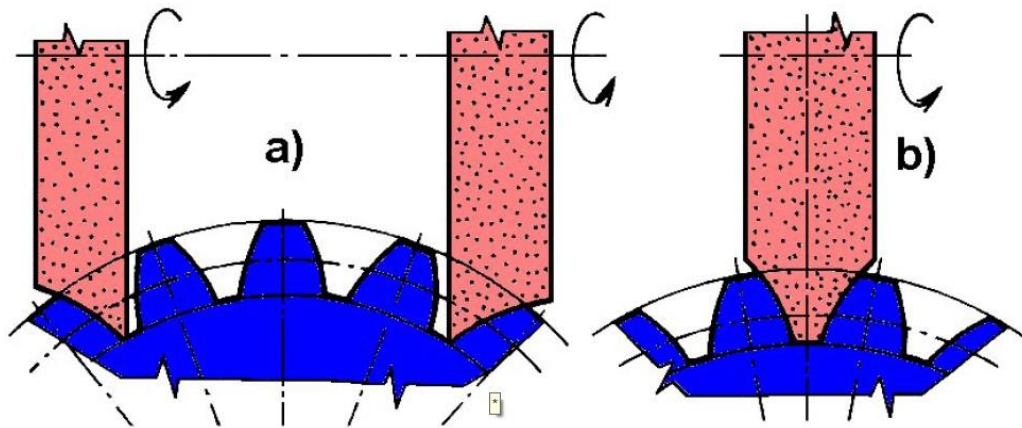
Obrázek 2 Schéma frézování odvalovacím způsobem [1]

2.2. Broušení

Broušení ozubených kol je dokončovací operace, která následuje po frézování a chemicko-tepelném zpracování. Jedná se o třískové obrábění s geometricky nedefinovaným břitkem. Broušení se vyznačuje velkými reznými rychlostmi a malou velikostí třísek. Hlavní pracovní pohyb je rotační pohyb nástroje a vedlejší pohyby je pohyb obrobku. [1,3]

2.2.1. Broušení dělicím způsobem tvarovými kotouči

Broušení ozubených kol dělicím způsobem je obdoba frézování dělicím způsobem. Dochází k broušení boku zubu tvarovým kotoučem. Tento způsob broušení dělíme na broušení dvěma tvarovými kotouči, kde jeden má tvar pravého boku zubu a druhý tvar levého boku zubu (obr. 3a). Druhý způsob broušení je broušení jedním tvarovým kotoučem, který má tvar zubové mezery a současně dochází k broušení protilehlých boků sousedních zubů (obr. 3b). [1,3]



Obrázek 3 Schéma broušení dělicím způsobem[1]

2.2.2. Broušení odvalovacím způsobem

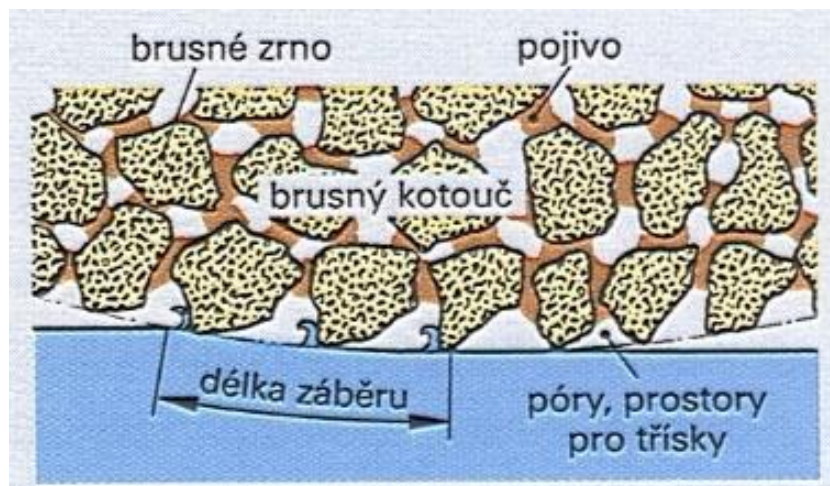
System Reishauer, jak se také broušení odvalovacím způsobem nazývá, je obdoba frézování odvalovacím způsobem. Odvalovací fréza je nahrazena brusným kotoučem, který má tvar jednochodého nebo dvouchodého šneku. Tento systém je nejvýkonnější, ovšem je náročnější na seřízení. Proto se používá u větších sérií a zejména na broušení menších modulů. [1,3]



Obrázek 4 Broušení odvalovacím způsobem [4]

2.2.3. Brusné materiály

Brusné kotouče jsou tvořeny brusivem a pojivem, dále mohou obsahovat póry. Jako brusiva se používají materiály přírodní (granát, smirek, pazourek), nebo materiály umělé (umělý korund, karbid křemíku, umělý diamant atd.). Podle velikosti brusných zrn rozdělujeme kotouče do čtyř tříd (hrubá, střední, jemná, velmi jemná). Druhou hlavní složkou kotouče je pojivo. Pojivo slouží k zajištění zrn brusiva. V praxi se používá velké množství pojiv, například keramická, kovová, pryžová a mnohá další. Při broušení dochází k otupování zrn brusiva. Když toto otupení překoná kritickou mez, na zrno působí příliš velké síly, dojde k vyloupení zrna z pojiva a broušení se provádí pomocí dalšího zrna. Díky tomuto principu se brusné kotouče nemusí brousit, provádí se pouze jejich tvarové zarovnání. Síla potřebná k vylomení zrna brusiva je další vlastnost, která kotouč charakterizuje a nazývá se tvrdost kotouče. [3,5]



Obrázek 5 Složení brusného kotouče [5]

3. Zkoušky měření integrity povrchu a zbytkového napětí

3.1. Definice pojmu integrity povrchu

Integritou povrchu rozumíme soubor všech vlastností a charakteristik povrchu strojní součásti vzniklého výrobním procesem. Nejdůležitější faktory, které charakterizují integritu povrchu po obrábění, jsou [6,7]:

- mikrogeometrie obrobeného povrchu;
- stupeň a hloubka zpevněné vrstvy;
- strukturní, fázové a chemické změny v povrchové vrstvě;
- smysl, velikost a gradient zbytkových napětí.

Ovšem v průmyslové praxi jsou nejčastěji hodnoceny především tyto složky [8]:

- drsnost povrchu Ra;
- geometrické přesnost;
- změny tvrdosti a struktury v povrchové vrstvě;
- tepelné změny – opaly;
- trhlinky;
- zbytková napětí.

Integritu povrchu ovlivňuje nespočet faktorů, které dělíme na vlivy vnější a vlivy vnitřní. Vlivy vnější dělíme na mechanické, chemické, tepelné, elektrické, a nebo kombinace těchto vlivů, např. elektrochemická koroze. Do vlivů vnitřních řadíme zbytkové napětí, drsnost povrchu, mechanické vlastnosti materiálu a přítomnost povrchových a podpovrchových vad. [7,8,9]

3.2. Definice pojmu zbytkové napětí

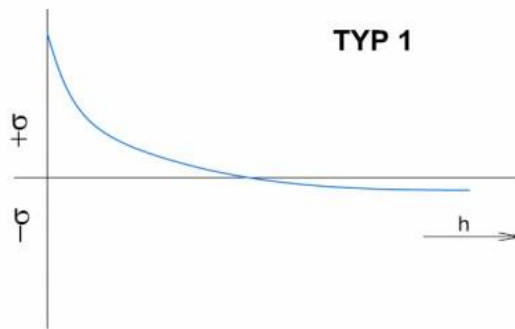
Metoda analýzy Barkhausenova šumu primárně zkoumá míru poškození povrchu, neboli hodnotu zbytkového napětí, proto si tento pojem detailněji rozebereme. Zbytková napětí jsou taková napětí, která zůstávají v pevném materiálu po odstranění příčiny vzniku a za předpokladu plastické deformace povrchové vrstvy [7]. Mezi hlavní příčiny vzniku zbytkového napětí řadíme [2]:

- nerovnoměrná plastická deformace;
- nerovnoměrný ohřev či ochlazení;
- nerovnoměrné strukturní změny;
- chemické procesy.

Zbytková napětí mohou mít kladný i záporný vliv na mechanické vlastnosti materiálu. Např. při pracovním procesu kuličkování se do povrchové vrstvy vnáší tlaková zbytková napětí. Díky tomuto napětí dojde k prodloužení životnosti součásti. Ovšem v povrchové vrstvě se mohou objevovat i tahová zbytková napětí, které jsou pro součást nepříznivá. Vznikají chemicko-tepelným zpracováním a broušením nesprávnými brusnými rychlostmi a posuvy. Tato napětí mohou způsobit vznik trhlin či snížení meze únavy [2,10].

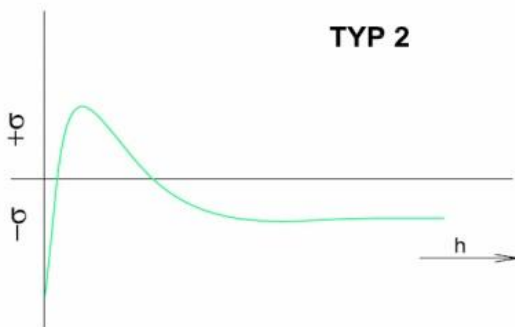
Způsob, který zapříčinil vznik zbytkového napětí v materiálu, má zásadní vliv na jeho velikost, ale i na tvar hloubkového profilu napětí. V praxi se vyskytují tři základní typy [2]:

- **Typ I** je charakteristický pro zbytková napětí, která v materiálu vznikla vlivem tepelného účinku. Napětí v povrchové i podpovrchové vrstvě materiálu je kladné, což znamená, že napětí jsou tahová (obr. 6). Důsledkem tohoto napětí může být vznik mikrotrhlin a jejich následné šíření.



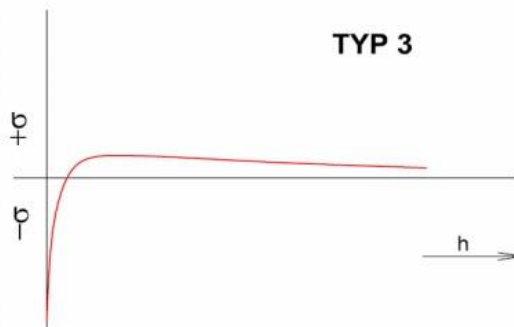
Obrázek 6 Hloubkový profil zbytkového napětí - Typ I [2]

- **Typ II** znázorňuje hloubkový profil zbytkového napětí, vyvolaného kombinací tepelného a mechanického (brusného) účinku. Maximální hodnota zbytkového napětí je ve vrstvě, která je těsně pod povrchem materiálu (v řádech desítek mikrometrů). Jeho velikost může dosahovat kladných (obr. 7) i záporných hodnot. Záleží, jakým podílem přispěla složka mechanická a jakým složka tepelná. Pokud jsou tato napětí tahová, hrozí vznik trhlin a jejich šíření směrem k povrchu materiálu.



Obrázek 7 Hloubkový profil zbytkového napětí - Typ II [2]

- **Typ III** charakterizuje průběh hloubkového profilu zbytkového napětí po operaci broušení, kde zásadní vliv na vznik tohoto napětí měli špatné řezné podmínky broušení (obr. 8).



Obrázek 8 Hloubkový profil zbytkového napětí - Typ III [2]

Podle rozsahu objemu, na kterém se zbytkové napětí projevuje, můžeme zbytková napětí rozdělit na [7,9]:

- **Zbytková napětí I. druhu – tzv. makroskopická**
Tato napětí mají konstantní směr i velikost po celém objemu vzorku. Při porušení silové a momentové rovnováhy dochází ke změně makroskopických rozměrů tělesa.
- **Zbytková napětí II. druhu – tzv. mikroskopická**
Jsou homogenní na oblasti několika zrn, u vícefázových soustav mohou mít jednotlivá zrna i opačné napětí
- **Zbytková napětí III. druhu – tzv. submikroskopická**
Tato napětí se projevují se v objemu několika meziatomových vzdáleností.

3.3. Způsoby dělení zkoušek

Zkoušky můžeme také rozdělovat z hlediska porušení vzorku [7]:

- **Nedestruktivní**
Nedochází k porušení vzorku, díky čemuž jsou tyto metody velmi využívané. Metody využívají závislost mezi fyzikálními nebo krystalografickými vlastnostmi materiálu a zbytkovým napětím.
- **Semidestruktivní**
U těchto metod dochází pouze k částečnému porušení a vzorek lze dál používat. Mezi semidestruktivní metody patří metoda odvrtávání.
- **Destruktivní**
Při zkoušce dojde uvolnění zbytkového napětí a porušení celistvosti vzorku. Měří se jeho deformace. Do této skupiny patří hlavně metody mechanické.

3.4. Zkoušky na měření zbytkového napětí

3.4.1. Mechanická

Princip spočívá v mechanickém uvolnění napětí, které způsobí deformaci vzorku po odstranění povrchové vrstvy. Mezi mechanické metody patří například metoda odvrtávací. Hlavní nevýhodou je, že mechanické metody jsou destruktivní nebo semidestruktivní, výhodou naopak je, že se jimi dají měřit téměř všechny materiály. [7]

3.4.2. Difraktometrická

Difraktometrická metoda měří změny vzdálenosti meziatomových rovin. Na základě těchto změn jsou určeny hodnoty zbytkových napětí. Do této skupiny patří metody rentgenové a metoda neutronové difrakce. Mezi největší výhody těchto zkoušek patří využití pro veliké množství materiálů. Naopak nevýhodou je, že měření musí probíhat v laboratoři, a pouze na malých vzorcích. Další nevýhodou je pořizovací cena difraktometru. [7,8]

3.4.3. Metalografická

Metoda je popsána v kapitole 5.

3.4.4. Magnetická

Využívají souvislost mezi magnetickým stavem a strukturně mechanickým stavem materiálu. Mezi tyto metody řadíme i analýzu Barkhausenova šumu, která je popsána v kapitole 4. [7]

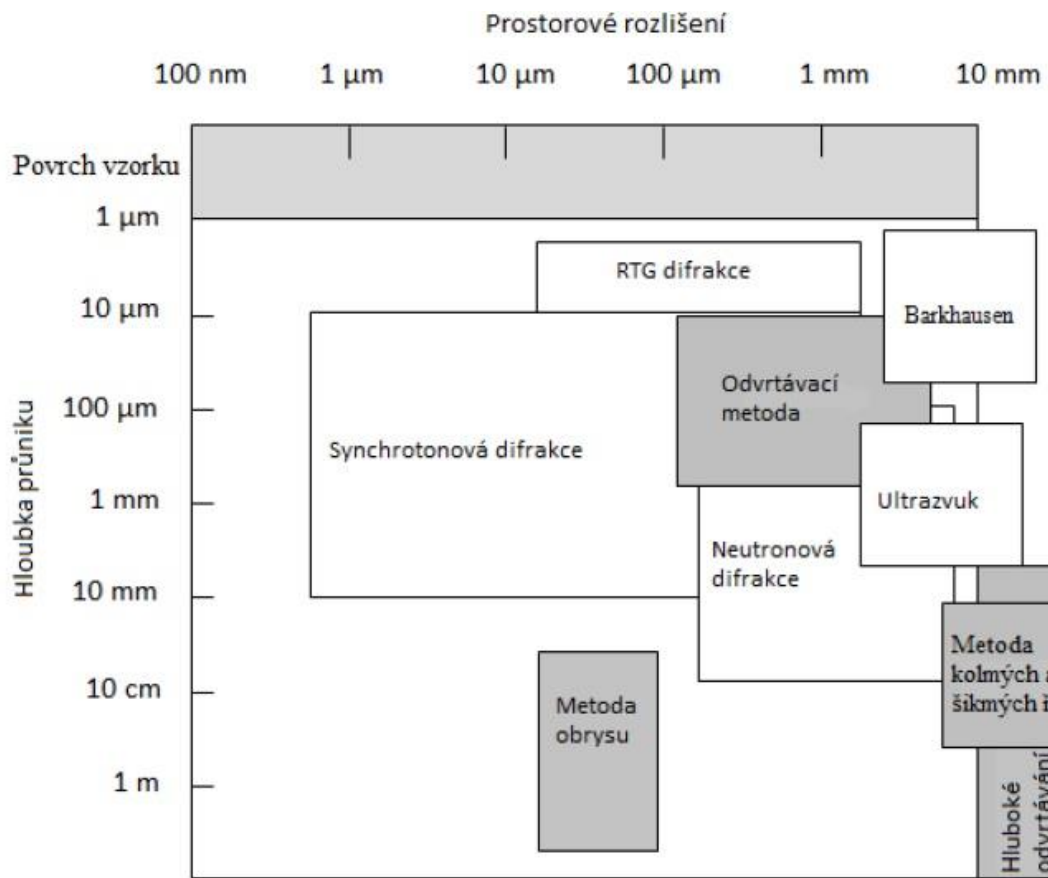
3.4.5. Ultrazvuková

Stav napjatosti materiálu ovlivňuje také rychlost šíření ultrazvukové vlny, čehož využívají tyto metody. Tato zkouška je velmi rychlá a levná, ovšem dá se měřit pouze přes celý objem. [7]

3.4.6. Chemické leptání

Při chemické zkoušce je povrch materiálu leptán nitrem (2% roztok HNO_3 v etanolu), jedná se tedy o zkoušku destruktivní. Hodnocení struktury povrchu se provádí pod mikroskopem. Další nevýhody této metody jsou, že může dojít k nerovnoměrnému naleptání povrchu a také že se pracuje s kyselinou. Naopak výhodou této metody je, že jsme schopni dělat hloubkové profily. [11]

Každá zkouška měří hodnotu povrchového napětí v jiné hloubce pod povrchem a má jiné prostorové rozlišení. Tyto charakteristiky jednotlivých zkoušek jsou vidět na obrázku 9.



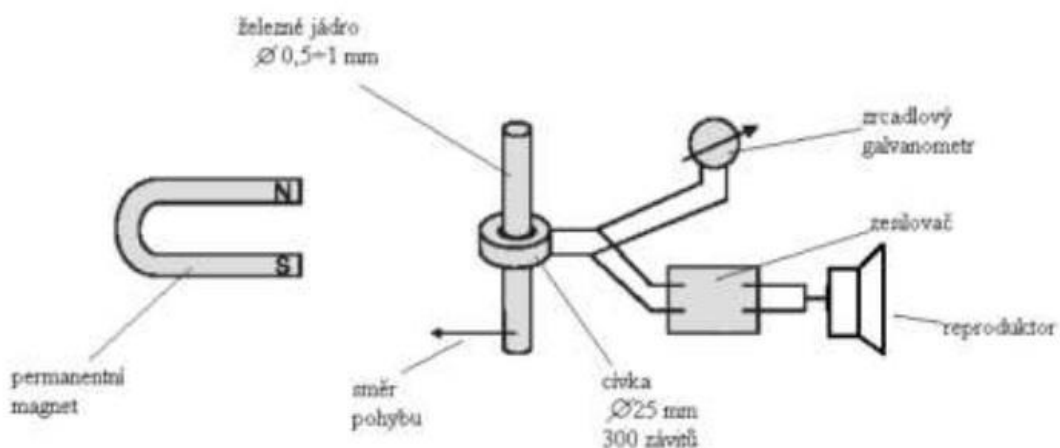
Obrázek 9 Hloubka průniku a prostorové rozlišení jednotlivých metod hodnocení zbytkových napětí. Destruktivní metody jsou označeny šedou barvou. [7]

4. Barkhausenova zkouška

Barkhausenova zkouška je nepříliš rozšířený způsob měření integrity povrchu. Jedná se o nedestructivní metodu, kterou řadíme mezi metody magnetické. Výsledkem měření je hodnota magnetoelastického parametru, který je přímo závislý na míře poškození povrchu. Měření integrity povrchu Barkhausenovsky má oproti ostatním zkouškám velké výhody. Největší z nich je, že se jedná o zkoušku nedestructivní, díky čemuž můžeme kontrolovat výrobky malých sérií bez zbytečných nákladů na výrobu zkušební vzorku. Další velkou výhodou je rychlost zkoušky. Potřebný čas na průběh zkoušky je poměrně malý a záleží především na zručnosti obsluhy. Oproti těmto výhodám má Barkhausenova zkouška také nevýhody. Mezi největší patří to, že se dají měřit pouze feromagnetické materiály a dále že tato zkouška je porovnávací. [7,12,13]

4.1. Historie

Metoda Barkhausenova šumu je známa od roku 1919, kdy tento jev objevil německý profesor Heinrich George Barkhausen, po němž je i celá metoda pojmenována. Metoda je také známá pod názvy Magnetoelastická metoda nebo Mikromagnetická metoda. Schéma původního Barkhausenova experimentu je zobrazeno na Obrázku 10.

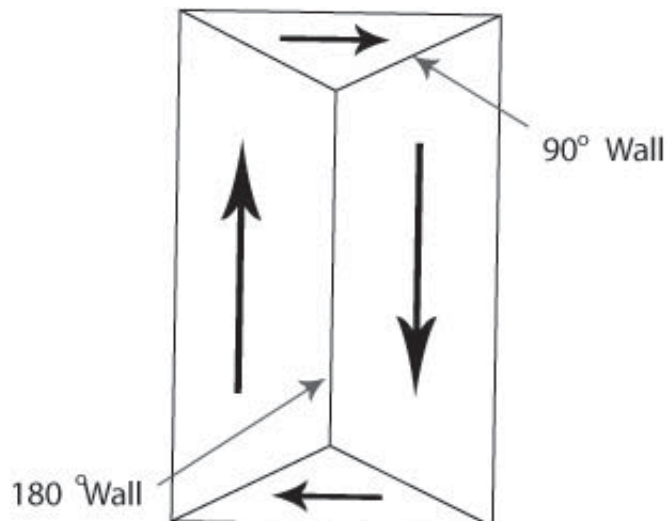


Obrázek 10 Schéma původního Barkhausenova experimentu [14]

Experiment spočíval v oddalování nebo přibližování permanentního magnetu od železného jádra. Při tomto pohybu je v reproduktoru slyšet praskání či chrastění. Tento jev popisuje kvantová fyzika jako nespojitost během procesu magnetizace feromagnetického materiálu. [14]

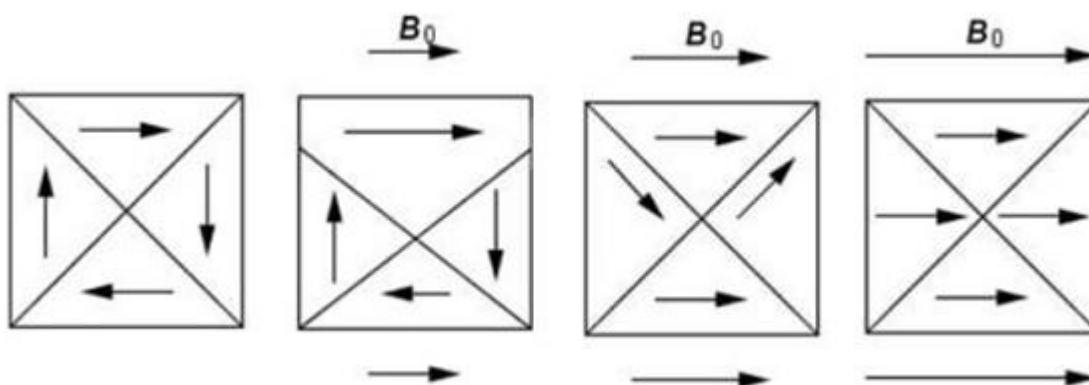
4.2. Podstata

Při měření metodou Barkhausenova šumu je feromagnetický materiál lokálně magnetizován. Feromagnetický materiál obsahuje malé oblasti připomínající jednotlivé tyčové magnety, tyto oblasti se nazývají domény. Domény jsou od sebe navzájem odděleny hranicemi známými jako doménové stěny (obr. 11).



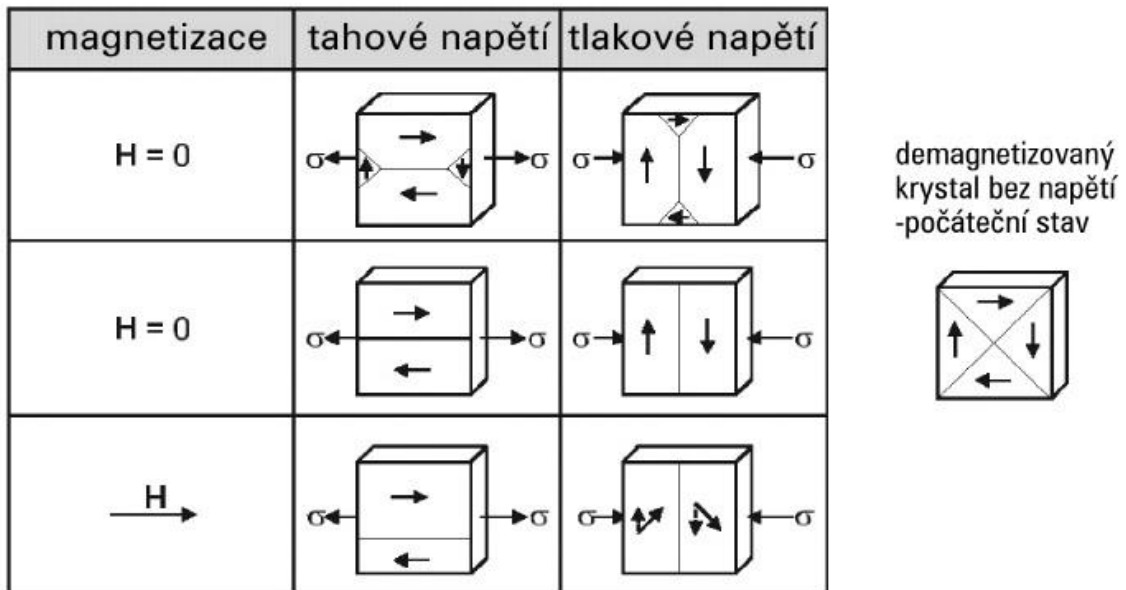
Obrázek 11 Magnetické domény ve feromagnetickém materiálu. [14]

Každá doména je magnetizována podél určitého krystalografického směru snadné magnetizace. Střídavé magnetické pole způsobuje pohyb doménových stěn tam a zpět. V daném okamžiku se doména, která má souhlasný směr se směrem magnetizace, zvětšuje a doména s opačným směrem se zmenšuje. Výsledkem je změna celkové magnetizace vzorku, jak je vidět na obrázku 12. [7, 12]



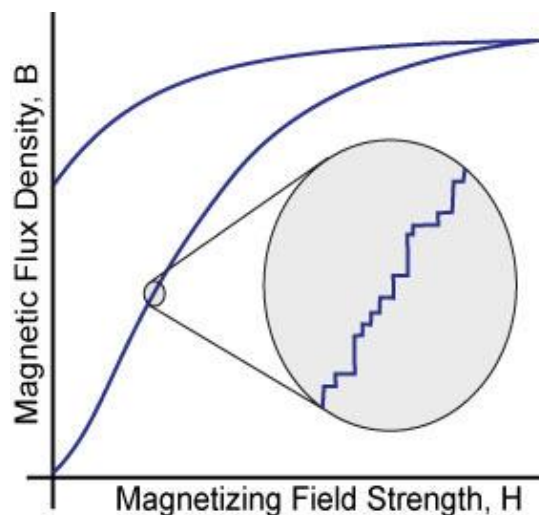
Obrázek 12 Orientace magnetických domén za působení vnějšího magnetického pole [7]

Doménové stěny se nehýbou pouze v závislosti na magnetickém poli, ale jejich tvar ovlivňuje také vnější silové zatížení součásti, což je zobrazeno na obrázku 13. [13]



Obrázek 13 Změna domén v závislosti na vnějším napětí [13]

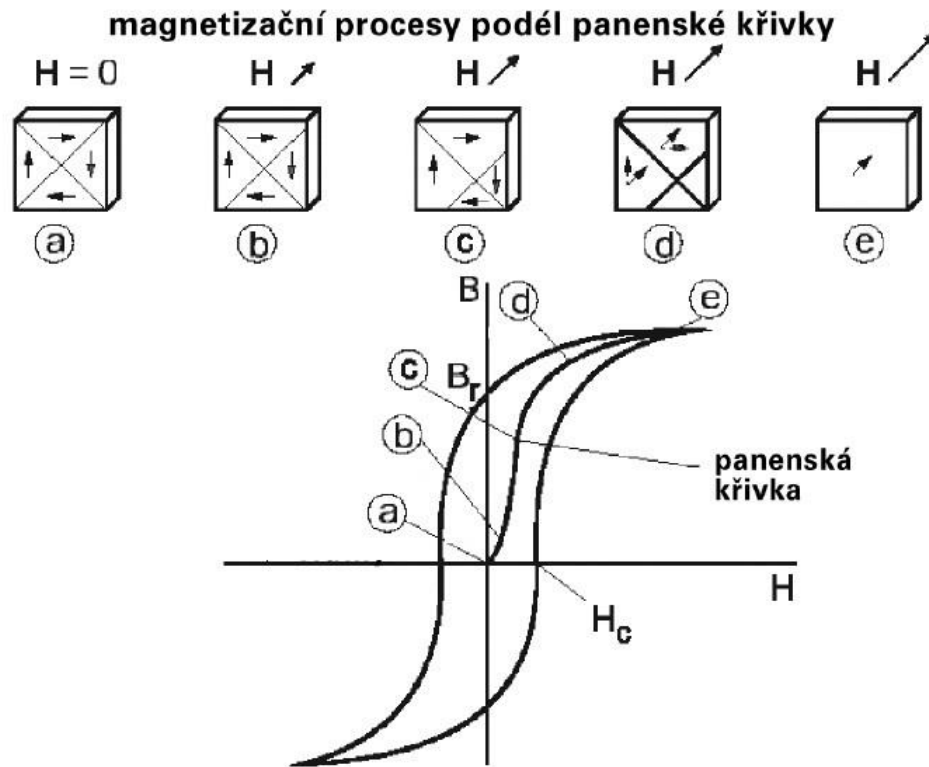
Pokud se během magnetizace v blízkosti vzorku nachází cívka z vodivého drátu, změna výsledné magnetizace způsobí indukci elektrického impulzu na cívce. Pohyb doménových stěn byl poprvé elektricky pozorován v roce 1919 profesorem Heinrichem Barkhausenem. Právě on dokázal, že magnetický proces charakterizovaný hysterezní křivkou, která ve skutečnosti není spojitá, ale je tvořena malými skoky (obr. 14). Ten skok vznikne při pohybu doménové stěny v aplikovaném magnetickém poli. Když elektrické pulzy produkované všemi doménami sečteme dohromady, výsledkem je signál nazývaný Barkhausenův šum. [7,14]



Obrázek 14 Skoky na hysterezní křivce [12]

Hysterezní křivkou (obr. 16) rozumíme uzavřenou křivku, která u magnetického materiálu vyjadřuje závislost magnetické indukce B [T] na intenzitě magnetického pole H [A/m].

Hysterezní křivka se získá provedením jednoho cyklu magnetování, vyjma prvotního magnetování. Při první magnetizaci vzorku vzniká tzv. panenská křivka, která je detailněji popsána na obrázku 15. Na obrázku je také zobrazeno chování domén v průběhu prvotní magnetizace. [7, 13]



Obrázek 15 Panenská hysterezní křivka [13]

Celková magnetická indukce je popsána vztahem [7]:

$$B = H \cdot \mu, \quad (4.1)$$

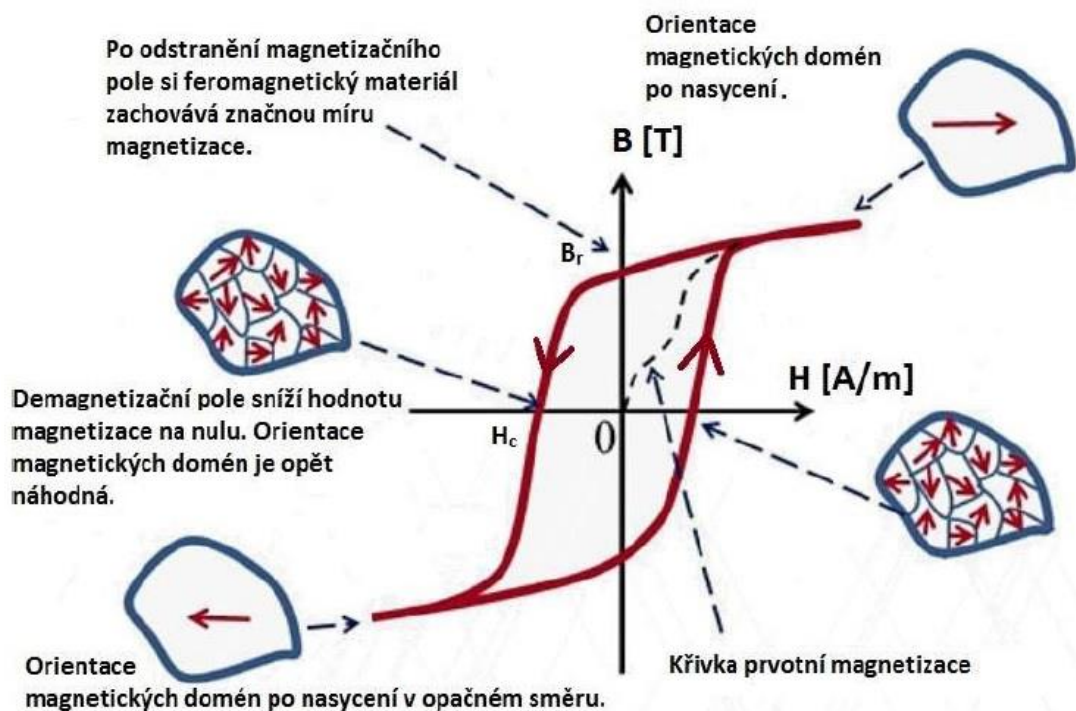
kde μ je permeabilita [Hm^{-1}]. Pro permeabilitu platí vzorec [7]:

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r, \quad (4.2)$$

kde μ_0 je permeabilita vakua, která má hodnotu $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$ a μ_r je relativní permeabilita, která je závislá na materiálu. [7]

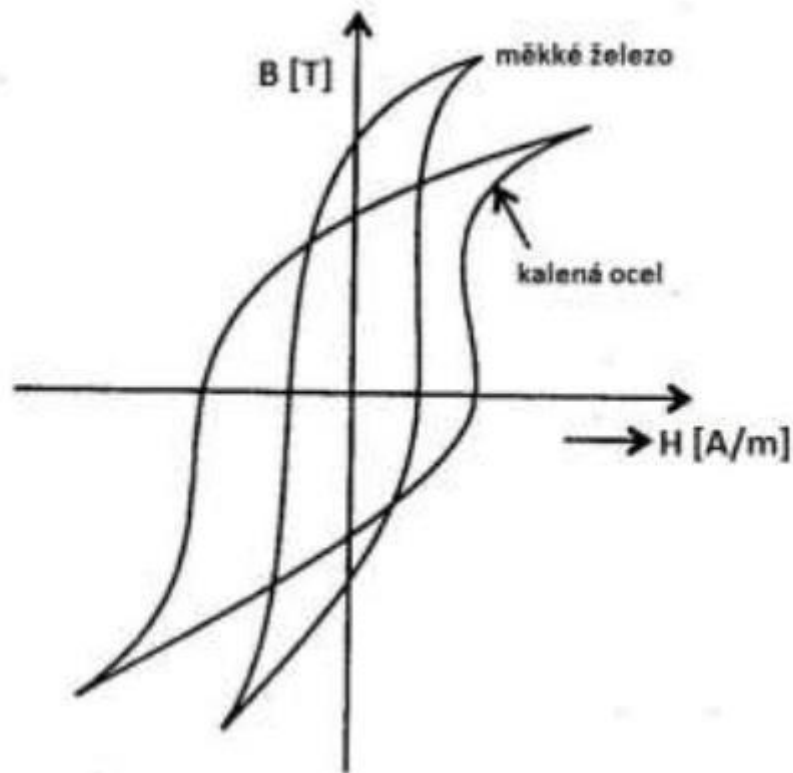
Podrobný popis hysterezní křivky (obr. 16) [7]:

- **Remanentní (zbytková) indukce B_r**
Je taková indukce, která v materiálu zůstává i po snížení intenzity magnetického pole na nulu (po tom, co materiál přestaneme magnetovat).
- **Koercitivní síla H_c**
Je potřebná k odmagnetování materiálu (zrušení B_r). Čím je koercitivita větší, tím je materiál tzv. magneticky tvrdší.
- **Saturace**
Dochází k magnetickému nasycení materiálu. Pokud zvýšíme intenzitu magnetického pole nad tuto hodnotu, magnetická indukce se již nezvýší.



Obrázek 16 Hysterezní křivka [7]

Hysterezní křivka může mít různé tvary (obr. 17). Tvar křivky ovlivňuje především chemické složení, krystalická mřížka, technologické zpracování, magnetické vlastnosti atd. Feromagnetické materiály můžeme rozdělit na magneticky měkké a magneticky tvrdé materiály. Magneticky měkké materiály jsou ty, které po odstranění vnějšího magnetického pole nezůstávají zmagnetizované. Jejich hysterezní křivka je užší oproti magneticky tvrdým látkám. Tyto látky naopak po odstranění vnějšího magnetického pole zmagnetizované zůstávají, chovají se jako magnety a hysterezní křivka je širší. [7]



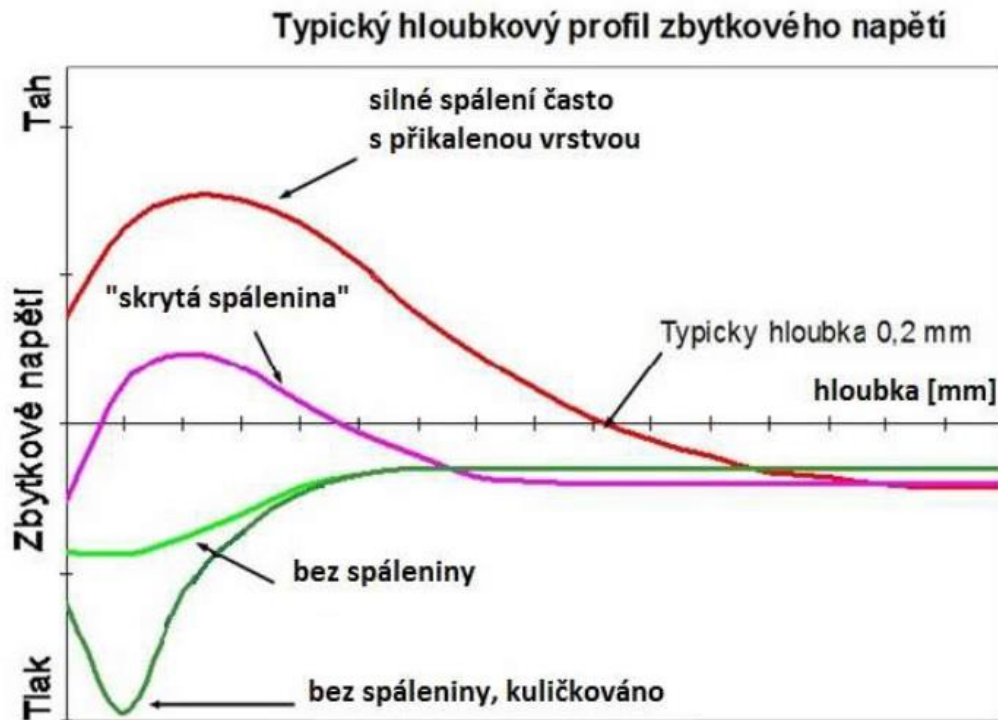
Obrázek 17 Rozdílný tvar hysterezní křivky [7]

4.2.1. Magnetizační frekvence

Magnetizační frekvence, kterou je materiál magnetizován při měření Barkhausenova šumu se pohybuje v rozmezí 5 Hz až 1000 Hz. Ale pokud mám magnetické pole o frekvenci, která nespadá do tohoto intervalu, neznamená to, že se doménové stěny nepohybují a tím se Barkhausenův šum nedá měřit. Tento interval je pouze rozsah frekvencí se kterými pracuje přístroj na měření Barkhausenova šumu (Rollscan – viz. kapitola 4.4). Pro většinu materiálů platí, že Barkhausenův šum se dá měřit magnetickým polem s frekvencí do 2 MHz. Magnetizační frekvence má vliv na prostupnost pod povrch materiálu. Jedná se o exponenciální závislost mezi hloubkou vniku pod povrch materiálu a mírou utlumení signálu. Tlumení signálu je způsobeno vířivými proudy, které vznikají při pohybu doménových stěn. Rozsah tlumení určuje hloubku, ve které lze měřit. Hlavní faktory, které ovlivňují tuto hloubku:

- Frekvence, resp. kmitočet magnetického pole
- Vodivost a permeabilita měřeného materiálu

Obvyklá hloubka měření je mezi 0,01 mm a 1,5 mm a charakteristické hloubkové profily napětí jsou zobrazeny na obrázku 18. [7,12,15]



Obrázek 18 Typický hloubkový profil zbytkových napětí v materiálu [7]

4.2.2. Hodnoty měření

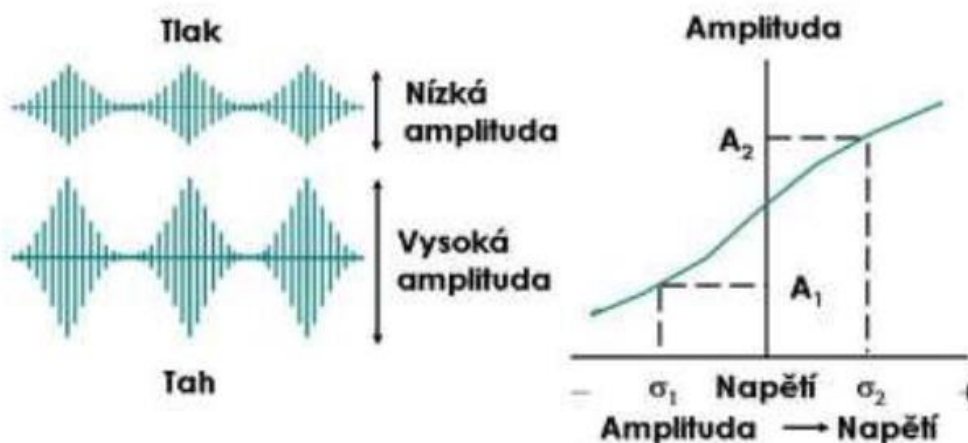
Jak už bylo řečeno, výsledkem Barkhausenovy zkoušky je hodnota magnetoelastického parametru (MP). Tuho hodnotu ovlivňuje celá řada faktorů, jako např. [14]:

- velikost zbytkového napětí;
- metalografická struktura;
- tvrdost materiálu;
- chemické složení;
- tepelné a chemické zpracování;
- mikrostruktura;
- nastavení Rollscanu.

Proto nemůžeme říct, že určitá hodnota magnetoelastického parametru je kritická. V praxi se to řeší experimentálním způsobem. U velké série určitého výrobku se provede měření na několika vzorcích, naměřené hodnoty se zprůměrují. Tento průměr je hodnota, kolem které by se měly všechny výrobky pohybovat, samozřejmě v určitém rozmezí. Osobně jsem tohoto experimentální měření prováděl ve firmě, která se zabývá výrobou ozubených kol a hřídelí s ozubením. U malosériových a kusových zakázek měření provádí odborníci ze specializovaných firem, kteří z tvaru a hustoty Barkhausenova šumu poznají, zda je kus dobrý nebo zda hodnota magnetoelastického parametru je příliš vysoká.

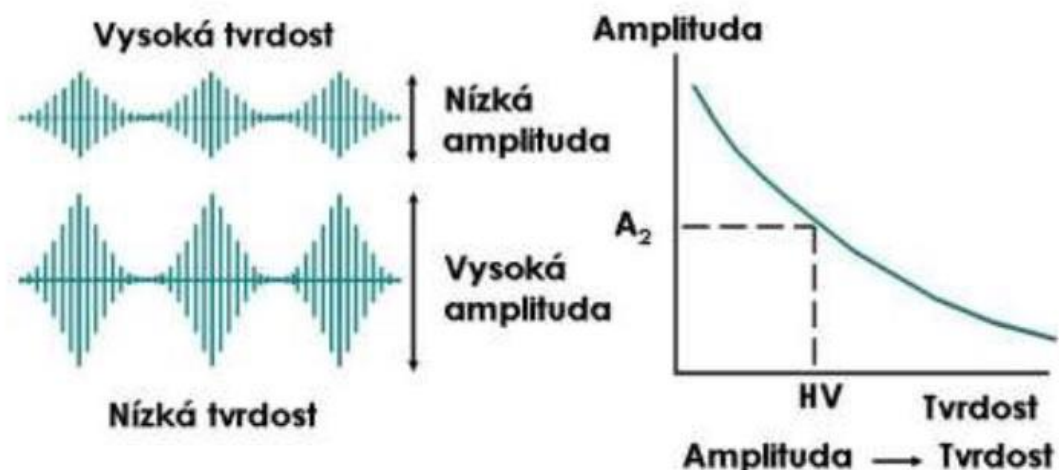
Pro správné pochopení následujícího odstavce si musíme objasnit význam pojmu magnetostrikce. Magnetostrikce je fyzikální jev, který se v oblasti snímací techniky uplatňuje od 70. let minulého století. Princip spočívá v tom, že těleso vyrobené z feromagnetického materiálu změní své rozměry vlivem působení magnetického pole. Magnetostrikce může být pozitivní nebo negativní. Při pozitivní magnetostrikci materiál v magnetickém poli zvětšuje svůj objem. Takto se chová železo i většina ocelí. Méně časté chování materiálu je, že při vložení do magnetického pole svůj objem zmenší, takzvaná negativní magnetostrikce (např. SmFe_2). [16], [17]

Primárně je metoda Barkhausenova šumu určena ke zjištění velikosti zbytkového napětí. Jakékoliv napětí v materiálu ovlivňuje pohyb doménových stěn do polohy snadné orientace ve směru magnetizace. Tento jev, při kterém napětí ovlivňuje doménovou strukturu a magnetické vlastnosti, nazýváme magnetoelastická interakce. Důsledkem této interakce u materiálů s kladnou magnetostrikcí je snižování intenzity Barkhausenova šumu, pokud je v materiálu tlakové (záporné) napětí. Naopak, intenzita Barkhausenova šumu se zvětší, pokud je v materiálu napětí tahové (kladné) (obr. 15). [7]



Obrázek 19 Vliv napětí na amplitudě Barkhausenova šumu. [7]

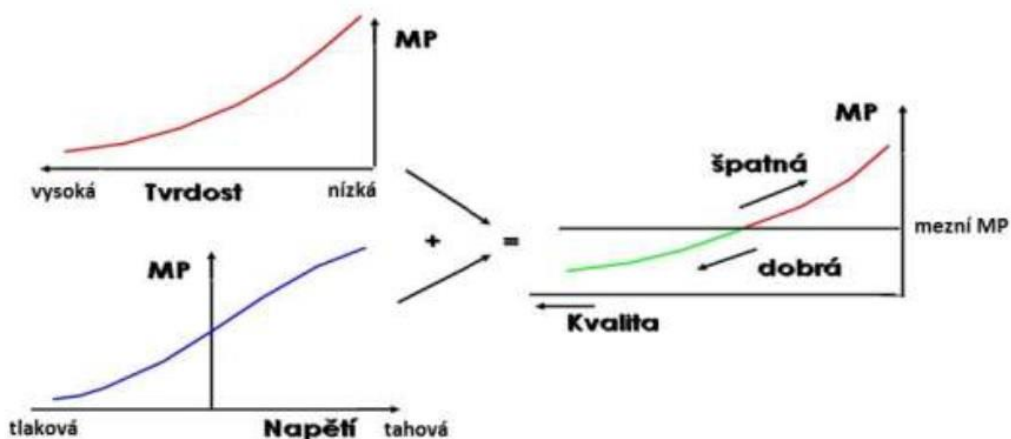
Dalším významným faktorem, který ovlivňuje hodnotu magnetoelastického parametru, je struktura materiálu. Přesnou strukturu materiálu podrobně zkoumá metalografická zkouška (viz kapitola 5). Faktorů, které souvisí se strukturou a ovlivňují velikost Barkhausenova šumu, je několik. Asi největší vliv na hodnotu magnetoelastického parametru má tvrdost. Tvrdost je definována jako odpor, který klade materiál proti vnikání cizího tělesa. Hodnoty tvrdosti se uvádějí bezrozměrné, nebo s jednotkou N/mm^2 . Mezi tvrdostí a velikostí Barkhausenova šumu platí nepřímá úměra. Tedy s rostoucí tvrdostí intenzita signálu spojitě klesá (obr. 20). Tento pokles je zapříčiněn zabráněním ohybu doménových stěn na mřížkové úrovni. [7,14]



Obrázek 20 Vliv tvrdosti na amplitudu Barkhausenova šumu [7]

4.3. Vhodnost užití na ozubená kola

Z předchozí kapitoly plyne, že Barkhausenova zkouška je zcela vhodná k změření stavu integrity povrchu na straně zubu ozubeného kola. V závislosti na předchozím měření jsme schopni velice rychle určit, zda výrobek odpovídá požadované kvalitě. Výrobky, které obsahují nějakou vadu (brusnou spáleninu, oduhličené oblasti, probroušení vrstvy chemicko-tepelného zpracování atd.), lze touto metodou velice snadno a rychle detekovat. Ze souvislostí, které byly popsány v předchozí kapitole, vyplývá, že pokud má dobře obrobený povrch ozubeného kola vysokou tvrdost a tlakové zbytkové napětí, hodnota Barkhausenova šumu je nízká. Pokud dojde k poklesu tvrdosti nebo nárůstu zbytkového napětí, projeví se to nárůstem amplitudy Barkhausenova šumu. Na obrázku (obr. 21) je v závislosti na těchto charakteristikách zobrazen magnetoelastický parametr (MP). [7]



Obrázek 21 Závislost magnetoelastického parametru na integritě povrchu [7]

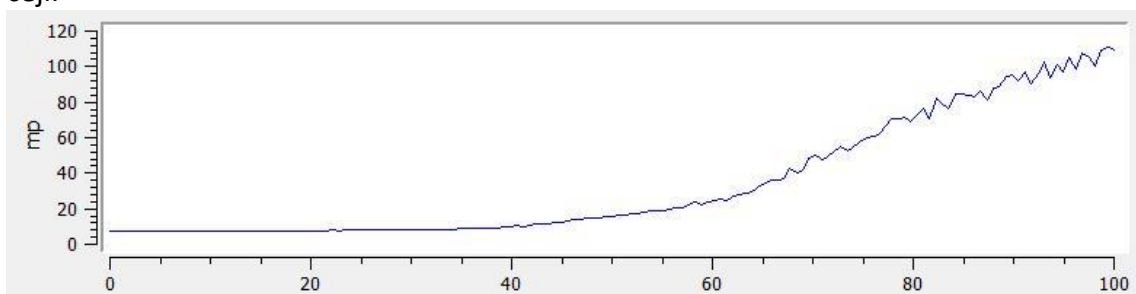
4.4. Měřicí přístroj – Rollscan

Přístroj měřící stav integrity povrchu pomocí metody Barkhausenova šumu se nazývá Rollscan. Výrobcem je finská firma Stresstech. Rollscanu v současné době je již několik generací. Vývoj je především v oblastech jednoduchosti a většího rozsahu nastavení, propojení s počítačem, různých možností spouštění měření, výdrži baterie atd. Veškeré výsledky v experimentální části byly měřeny na Rollscanu 300, ovšem nyní už je na trhu Rollscan 350 (obr. 22). V minulosti se ještě prodávaly Rollscan 200 a Rollscan 250 které neměly možnost propojení s počítačem a nastavení měřících parametrů bylo mechanické.



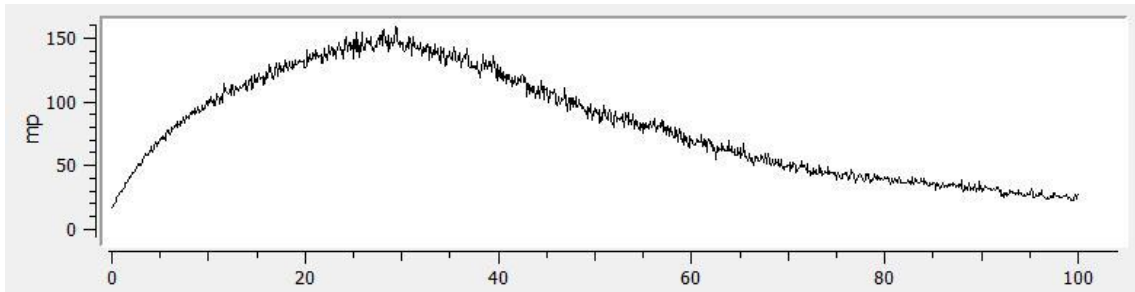
Obrázek 22 Rollscan 350

Jak již bylo řečeno, výsledky zkoušky Barkhausenem ovlivňuje nastavení Rollscanu. Nastavením Rollscanu rozumíme především hodnotu magnetizačního napětí a magnetizační frekvence. Rollscan 300 umožňuje napětí měnit v rozsahu 0-16 V s krokem 0,1V. Frekvenci můžeme měnit od 1 Hz do 1000 Hz s krokem 1 Hz. Ke správnému nastavení slouží funkce napěťový přeběh a frekvenční přeběh. Při magnetizačním přeběhu Rollscan mění magnetizační napětí ve zvoleném rozsahu, při stálé frekvenci. Měření se může zopakovat pro různé frekvence. Výsledná křivka je zobrazena na obrázku 23. a nejvhodnější hodnota magnetizačního napětí je v místech, kde tyto křivky stoupají nejprudčeji.



Obrázek 23 Napěťový přeběh cementační oceli, rozsah osy x: 0-16 V

Pro zjištění správné hodnoty magnetizační frekvence se postupuje obdobně. Rozdílem je, že se při konstantním napětí automaticky mění frekvence. Výsledná křivka, zobrazená na obrázku 24, znázorňuje průběh magnetoelastického parametru v závislosti na frekvenci. Správná hodnota frekvence pro měření je v bodě maxima křivky.

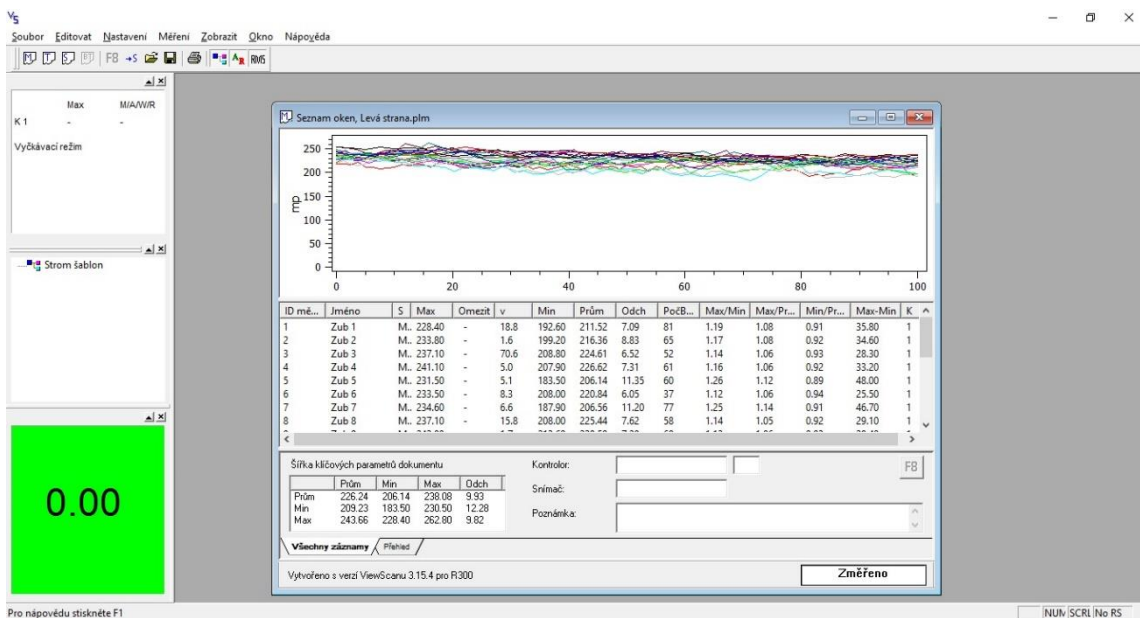


Obrázek 24 Frekvenční přeběh cementační oceli, rozsah osy x: 50-550 Hz

Vlastní nastavení se provádí pomocí Tlačítek a kolečka.

Měřicí přístroje jsou vybaveny baterií, což umožňuje lepší manipulaci během měření. Dále k Rollscanu můžeme připojit různé spínače (např. nožní spínač), kterými spouštíme a zastavujeme měření v případě, že obě ruce potřebujeme k vlastnímu měření.

Velice důležitou a užitečnou věcí je propojení Rollscanu s počítačem. Toto spojení se provádí pomocí překříženého síťového kabelu. Počítačový program, který slouží ke komunikaci s Rollscanem s nazývá Viewscan. Pomocí Viewscanu jsme schopni nastavit Rollscan, spustit a ukončit samotné měření, naměřená data filtrovat a ukládat. Ukázka pracovního prostředí Viewscanu je na obrázku 25.

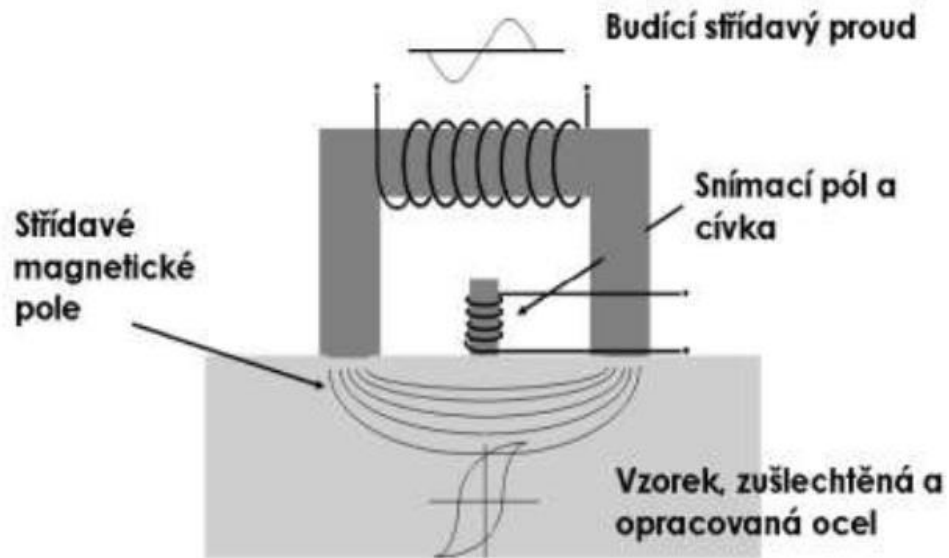


Obrázek 25 Ukázka pracovního prostoru Viewscanu

Měření integrity povrchu pomocí Rollscanu se může provádět na téměř jakémkoliv výrobku z feromagnetického materiálu. Velmi často měřené produkty jsou ozubená kola, kroužky ložisek, válcové a jiné hřídele. Aby měření těchto produktů bylo rychlejší a snadnější, existuje několik nadstaveb na Rollscan (např. GearScan, CamScan, BearingScan atd. [18]).

4.5. Snímače

Samotné měření zbytkového napětí na vzorku se provádí pomocí snímače. Typů snímačů je celá řada, ovšem princip je u všech stejný. Každý snímač má tři póly. Dva z nich, tzv. magnetizační póly, jsou připojeny na magnetizační cívku, která budí střídavé elektromagnetické pole. Díky tomuto poli je materiál lokálně magnetizován. Tato magnetizace má za důsledek periodický pohyb doménových stěn. Třetím pólem je pól snímací. Tento pól je připojen na snímací cívku, která společně s vyhodnocovací elektronikou snímá změnu magnetizace, která souvisí s Barkhausenovým šumem. Pro lepší představu je tento princip zobrazen na obrázku 26 a ukázka pólů na obrázku 28. [7,15]



Obrázek 26 Princip zapojení uvnitř snímače [7]

Jak již bylo řečeno, snímačů existuje celá řada. Některé z nich se vyrábí opakovaně (univerzální snímač, zubový snímač) ovšem celá řada z nich je vyráběna firmou Stress-tech na zakázku. Nejzajímavějším typem, se kterým jsem se setkal, byl snímač na měření zbytkového napětí uvnitř hlavní poloautomatických zbraní. Spojení snímače a Rollscanu je realizováno pomocí konektoru vyobrazeném na obrázku 27. Často užívané snímače jsou popsány v dalších kapitolách.



Obrázek 27 Konektor snímače na Rollscan 300/350

4.5.1. Univerzální snímač

Jak už název napovídá, univerzální snímač se využívá pro měření různých součástí. Vyznačuje se tím, že snímací kontakt nebývá pevný, ale odpružený. Kontakty jsou vyrobeny z uhlíku. Toto provedení snímače je v praxi velmi oblíbené, i proto že nedochází k oděru vzorku ale kontaktů, které jsou velmi lehce vyměnitelné. Typové označení snímače je S1-18-12-01.



Obrázek 28 Univerzální snímač S6248



Obrázek 29 Ukázka kontaktů na univerzálním snímači

4.5.2. Zubový snímač

Tento snímač slouží k měření hodnoty zbytkového napětí na zubech ozubených kol. Vyrábí se v různých velikostech podle modulu zubu měřeného kola. Kontakty tohoto snímače jsou pevné a nevyměnitelné, což zaručuje větší přesnost výsledků. Kontakty jsou odděleny korundovými proužky, které zabraňují oděru snímače, ovšem může dojít k poškrábání měřené plochy. Typové označení snímače je S1-18-12-02.



Obrázek 30 Zubový snímač

5. Metalografická zkouška

Metalografická zkouška se používá pro posouzení struktury materiálu. Tato zkouška nám dává nejen informace o struktuře materiálu, slouží také pro kontrolu výrobních operací (např. tepelné zpracování), lze ji využít k hodnocení čistoty materiálu, stavu povrchových vrstev materiálu, korozního napadení materiálu atd. Metalografickou zkouška zkoumá materiál ze dvou základních hledisek, makroskopického a mikroskopického. [19]

Při makroskopické zkoušce je vzorek pozorován ve skutečné velikosti nebo při malém zvětšení a je možno vyhodnocovat [20,21]:

- chemickou nestejnorodost;
- vady materiálu – trhliny, dutiny, pórovitost, necelistvost;
- kontrola svarů;
- sledování krystalizace;
- stanovení průběhu vláken materiálu;
- stanovení hloubky prokalení, cementační vrstvy.

Při mikroskopické zkoušce se správně připravený vzorek s vyvolanou mikrostrukturou pozoruje pod různým zvětšením. Světelné mikroskopy jsou v dnešní době schopny dosáhnout až dvoutisícinásobného užitečného zvětšení. V tomto ohledu jsou na tom ještě lépe mikroskopy elektronové, které dokáží obraz zvětšit až sto tisíckrát. V praxi se běžně používá přibližně pětisetnásobné zvětšení a vyhodnocují se následující vlastnosti [20]:

- struktura materiálu;
- přibližné chemické složení;
- množství a způsob vyloučení nekovových vměstků;
- velikost, tvar a způsob rozložení strukturních součástí;
- velikost odměšování různých prvků;
- vhodnost materiálu pro určité použití;
- jakost tepelného zpracování;
- příčiny porušení materiálu.

Metalografická zkouška je velice rozsáhlá, výše uvedené oblasti zkoumání jsou pouze příklady, které se v praxi používají naprosto běžně. Metalografická zkouška je zkouška destruktivní, což je její největší nevýhoda. Velmi často se používá u havarovaných součástí, abychom zjistili příčinu havárie.

5.1. Příprava vzorku

Jak již bylo řečeno, metalografická zkouška je zkouška destruktivní a vyžaduje připravení vzorku. Správná příprava vzorku je možná důležitější, než se na první pohled může zdát. Pokud je vzorek připravený špatně (rýhy po broušení, špatné naleptání atd.), tak na mikroskopu nejsme schopni rozeznat jednotlivé struktury a výsledek zkoušky je neplatný. Metalografický vzorek, jehož jedna plocha je připravena k metalografické analýze, se nazývá výbrus. Příprava vzorku se provádí v několika krocích, které si přiblížíme. [19]

5.1.1. Volba vzorku a jejich úprava

Volba místa na součásti, ze které vzorek odebereme, je velmi důležitá. Vzorek musí mít stejné charakteristické vlastnosti jako zkoumaný materiál. Proto je před odebráním vzorku potřeba vzít do úvahy účel pozorování, výrobní postup, rozměry a tvar součásti a podmínky, ve kterých se součást provozuje. Není-li součást strukturně homogenní, je nutno odebrat více vzorků z více míst. Poté co všechny aspekty pečlivě zvážíme, přistoupíme k samotnému odebrání. Vzorek se ze základního materiálu nejčastěji vyřezává metalografickou pilou (obr. 31). Při řezání je vzorek velmi intenzivně ochlazován, aby nedošlo ke změně struktury vlivem teploty. Správně musí být nastaveny také posuvy, abychom zabránili změně struktury vlivem deformací. [19,22]



Obrázek 31 Metalografická pila Struers [23]

Po vyříznutí se vzorek náležitě označí, aby nedošlo k jejich záměně. Značení se provádí pomocí razidla, popisovače nebo zalitím značky do dentacrylu.

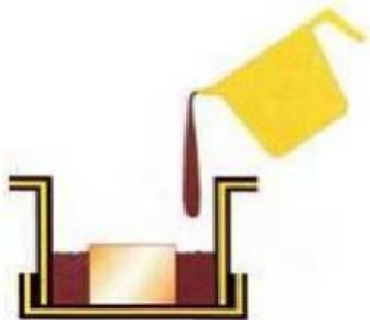
5.1.2. Preparace vzorku

Preparování vzorků má usnadnit a urychlit jejich přípravu a provádí se hlavně z těchto dvou důvodů:

- malé rozměry vzorku, díky kterým není možno vzorek správně uchytit při broušení;
- k dodržení ostrosti hran, což je nezbytné při studiu okrajových vrstev (např. cementační vrstvy).

V minulosti se preparace vzorku prováděla pomocí svěrek a držáků. Dnes se vzorky preparují výhradně zaléváním nebo zapékáním do umělých hmot.

Zalévání se provádí za studena. Uříznutý vzorek se položí na dno formy plochou, kterou chceme dále zkoumat (obr. 32). Formy se dělí na jednorázové, které mohou být hliníkové nebo skleněné, a formy pro opakované použití, které jsou vyrobeny ze silikonu



Obrázek 32 Schéma zalévání za studena [22]

nebo polypropylenu. Následně je vzorek zalit zalévací směsí a nechá se vytvrdnout. Doba vytvrzování závisí na typu zalévací směsi a pohybuje se od řádů jednotek minut až po desítky hodin. Nejčastěji používané zalévací směsi jsou tekutá epoxidová pryskyřice, prášková akrylátová pryskyřice a polyesterová pryskyřice. Zalévání vzorků se může provádět ve vakuu, čímž se zamezí přítomnosti vzduchových bublin v zalévací hmotě. [19,22]

Dalším způsobem preparace vzorku je tak zvané zapékání vzorku. Vzorek je do lisu (obr. 33b), který je vybaven elektrickou pískou, umístěn stejným způsobem jak u zalévání za studena (obr. 33a). Vzorek je zasypán práškem dentacrylu a zatížen tlakem, který vyvolává síla 30 až 50 kN. Současně je vzorek ohříván na teplotu 100 °C až 180 °C. Největší výhodou je rychlost přípravy, samotné zapékání trvá přibližně 10 minut. [19,22]

Dalším důvodem preparace vzorku je, že proces broušení a leštění může být poloautomatický. Proto je třeba, abych všechny vzorky měly stejný tvar, což nám zalití do dentacrylu umožní. Vzorek připravený na broušení je zobrazen na obrázku 34. [22]



Obrázek 34 Lis na metalografické vzorky Struers (b) a ukázka uložení vzorku před zapékáním (a).



Obrázek 33 Vzorek po vyndání ze zapékacího lisu.

5.1.3. Broušení

Dalším krokem v přípravě vzorku je broušení. Provádí se za účelem minimalizace povrchových nerovností vzorku. Broušení se může provádět ručně nebo mechanizovaně, princip je ovšem u obojího stejný. Brusné papíry, kterými se vzorek postupně brousí, se postupně zjemňují. Při přípravě našich vzorků, které byly měřeny pro experimentální část, byla řada hrubosti brusných papírů 60, 120, 240 a 400 dle normy FEPA. Při přechodu na jemnější brusný papír je potřeba vzorek pečlivě opláchnout, aby nedošlo k znehodnocení brusného papíru. U ručního broušení (obr. 35) je potřeba střídat orientaci vzorku tak, že při změně hrubosti brusného papíru vzorek pootočíme o 90°. [19,22]



Obrázek 35 Metallografická bruska ATM pro ruční broušení [23]

Mechanizované broušení se provádí na poloautomatických (obr. 36a) nebo automatických (obr. 37b) metallografických bruskách. Vzorek je uchycen ve vodorovném rotujícím kotouči brusky, který jej přitlačuje na brusný papír. Běžné rychlosti otáčení jsou 30 až 150 otáček za minutu. [22,23]



a)



b)

Obrázek 36 Poloautomatická (a) a automatická (b) metallografická bruska Struers. [23]

Broušení metalografických vzorků se nemusí provádět pouze pomocí brusných papírů nebo speciálních podložek. Další alternativou je broušení volným brusivem, tzv. lapování. Jako brusivo se obvykle používá SiC, Al₂O₃, Si₃N₄, diamant atd. [19,22]

Jak vypadá vzorek po broušení, je ukázáno na obrázku 37.



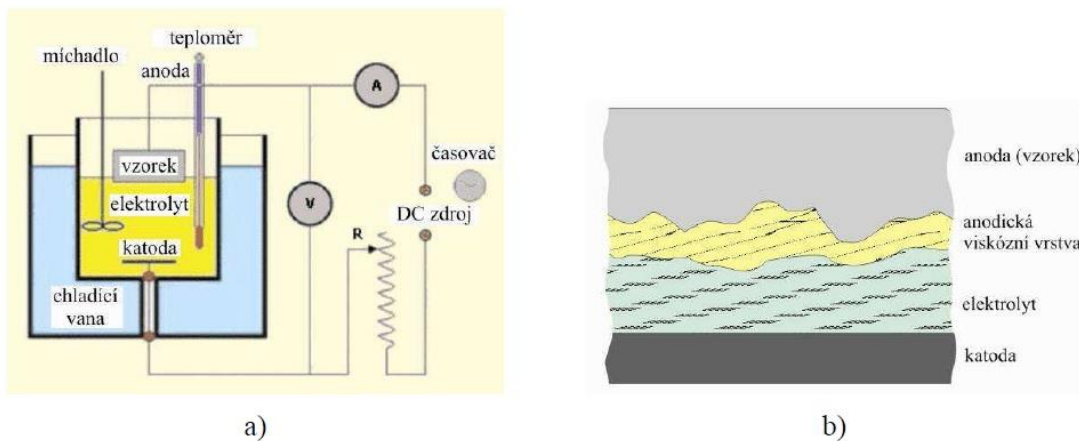
Obrázek 37 Vzorek po broušení

5.1.4. Leštění

Leštění se používá pro odstranění zbylých rýh po broušení. Na rozdíl od broušení, materiál z povrchu není odebírán. Princip leštění spočívá v deformaci vrcholů povrchové drsnosti. Leštění metalografických vzorků se provádí mechanicky, chemicky, elektrolyticky, nebo kombinací těchto metod.

Princip mechanického leštění je téměř totožný s broušením. Provádí se přitlačením vzorku na rotující leštící kotouč, který je potažen sametem, saténem, nebo jinou textilií. Před počátkem leštění se na kotouč nanese leštící medium, které je ve formě prášku, pasty nebo suspenze. Při samotném leštění se vzorkem pohybuje proti směru pohybu leštícího kotouče, dokud se nedosáhne zrcadlového lesku. Po skončení operace vzorek opláchneme lihem a osušíme. [19,22]

Leštění elektrolytické je principiálně zcela odlišné od mechanického a používá se pro leštění velmi tvárných nebo houževnatých materiálů. Princip je zobrazen na obrázku 38a. Vzorek je ponořen do elektrolytu a je zapojen jako anoda. Do elektrolytu je ponořena také nerezová destička, která slouží jako katoda. Obvodem se nechá procházet stejnosměrný proud, jehož působením se na anodě (vzorku) vytvoří tzv. anodický film. Jeho tloušťka není konstantní, v místě prohlubní je film nejsilnější (obr. 38b). Díky tomuto principu dojde k vyleštění vzorku.



Obrázek 38 Schéma zapojení při elektrolytickém leštění (a) a detail vzorku v průběhu leštění (b). [22]

Hlavní výhodou elektrolytického leštění oproti leštění mechanickému je to, že vzorek není mechanicky namáhán, tudíž nemůže dojít ke strukturním změnám. Nevýhodou tohoto typu leštění je nežádoucí naleptání struktury vzorku. [22]

Leštění chemické je v podstatě určitým druhem leštění elektrolytického, s tím rozdílem, že do soustavy není přiveden proud. Při vhodném chemickém složení elektrolytu vznikají na povrchu vzorku elementární elektrochemické články, které mají stejný účinek jako přiváděný proud. [22]

Účinek leštění je dobře vidět na obrázku 39, kde je zobrazen vzorek před a po leštění.



Obrázek 39 Porovnání vzorků před a po leštění.

5.1.5. Vyvolání struktury

Pozorování struktury po leštění je možné pouze v některých případech, a to u vzorků leštěných chemicky nebo elektrolyticky. U vzorku leštěných mechanicky je třeba odstranit ovlivněnou vrstvu. Vyvolání struktury se provádí těmito způsoby [19]:

- chemické leptání;
- elektrolytické leptání;
- tepelné leptání;
- vyvolání struktury pomocí magnetické suspence;
- reliéfní leštění a popouštění.

Nejčastěji, stejně tak u našich vzorků, se k vyvolání struktury používá metoda chemického leptání. Proto ji v následujících odstavcích popíši podrobněji. Ostatní způsoby vyvolání struktury se používají pouze ve speciálních případech.

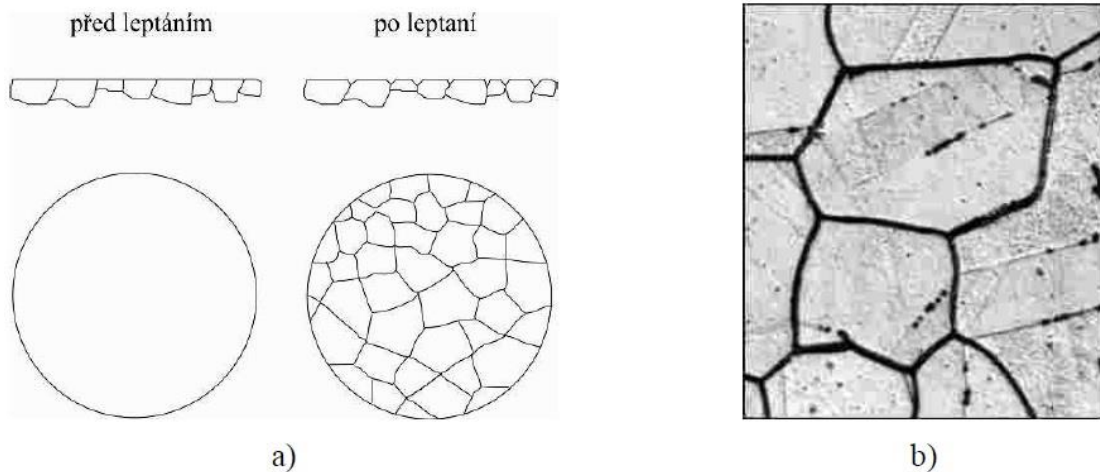
Chemickým leptáním se rozumí působení chemických činidel na vyleštěný povrch vzorku. Díky rozdílné rozpouštěcí schopnosti jednotlivých složek struktury se na povrchu vzorku reliéf, čímž dojde k zviditelnění struktury.

Před samotným leptáním se musí povrch vzorku důkladně odmastit, které se provádí ponořením vzorku do alkoholu. Pokud by povrch byl odmaštěn nekvalitně, mohlo by dojít k nerovnému naleptání. Odmaštěný vzorek se ponoří do leptadla, přičemž je potřeba s ním pohybovat, aby se zabránilo případnému usazování plynových bublinek na povrchu vzorku a tím nerovnoměrnému naleptání. Doba naleptání se vzorek od vzorku liší a správné naleptání záleží na zkušenosti obsluhy. Pokud je vzorek naleptán málo, musí se leptání opakovat. Pokud se vzorek naleptá příliš, opakuje se operace leštění, případně i broušení, a leptat se musí s větší opatrností. Při správné míře naleptání se vzorek opláchně, osuší a je připraven k pozorování.

Chemické leptání se provádí různými chemikáliemi, proto i výsledná naleptaná plocha bude jiná, v závislosti na použité chemikálii. Což umožňuje pro různé zkoumané vlastnosti provést různý způsob naleptání. Nejčastěji se používá [22]:

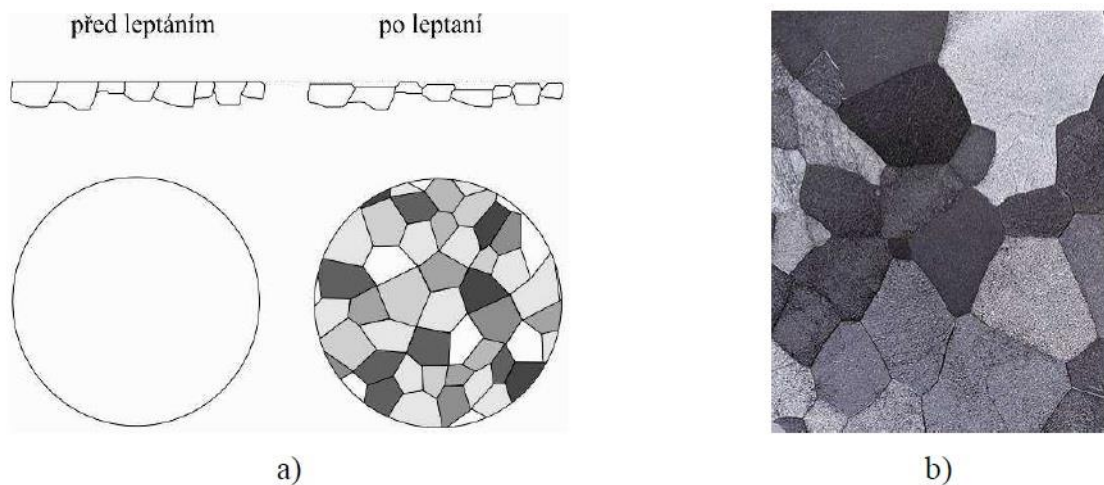
- leptání na hranice zrn;
- plošné leptání;
- selektivní leptání.

Leptání na hranice zrn se používá téměř u všech materiálů, ale hlavně u tuhých roztoků. K naleptání materiálu dochází primárně na hranici zrn (obr. 40a). Důvodem odtržení právě těchto atomů je fakt, že mají větší volnou energii než atomy na ploše krystalů. Výsledkem tohoto typu leptání je zviditelnění jednotlivých zrn, což nám umožňuje studovat jejich tvar a velikost (obr. 40b).



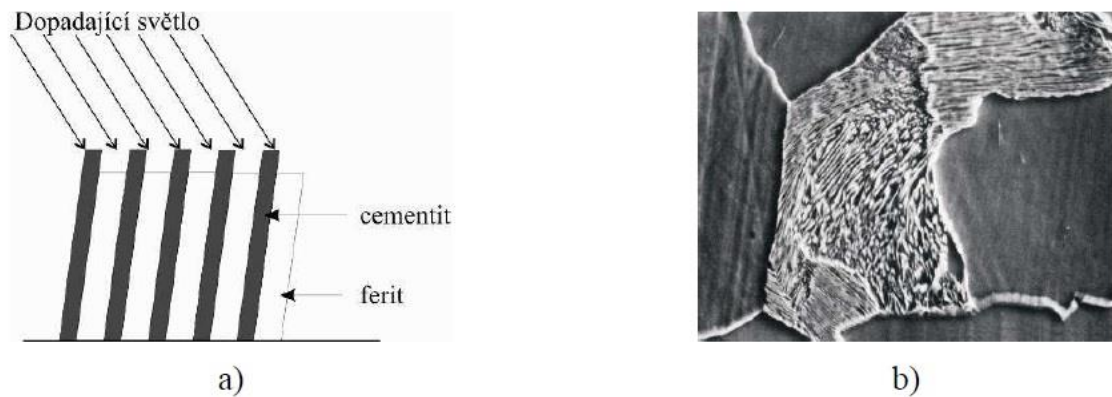
Obrázek 40 Schéma leptání na hranice zrn (a) a snímek z mikroskopu (b). [22]

Plošné leptání využívá rozdílné leptavosti odlišně krystalograficky orientovaných zrn. Různě orientovaná zrna jsou naleptána do různé hloubky (obr. 41a) z důvodu rozdílné energie každé krystalografické roviny. Na vzorku dochází k vytvoření reliéfu. Světelné paprsky dopadající na tento reliéf se do objektivu odráží s různou intenzitou. Proto při pohledu do mikroskopu vidíme jednotlivá zrna v různých odstínech šedi (obr. 41b).



Obrázek 41 Schématické zobrazení plošného leptání (a) a snímek z mikroskopu po plošném leptání (b). [22]

Selektivní leptání je aplikace plošného leptání na vzorcích z heterogenních slitin. Povrchový reliéf je vytvořen na základě rozdílné odolnosti jednotlivých strukturních součástí vůči leptadlu. Jednotlivé fáze jsou naleptány do různých hloubek, proto při mikroskopickém pozorování je každá složka jinak zbarvena. Častým případem selektivního leptání je leptání vzorků z perlitické oceli. Perlit je směs perlitu a cementitu. Při leptání dochází k odleptání feritické složky, kdežto cementitická složka zůstává neporušena (obr. 42).



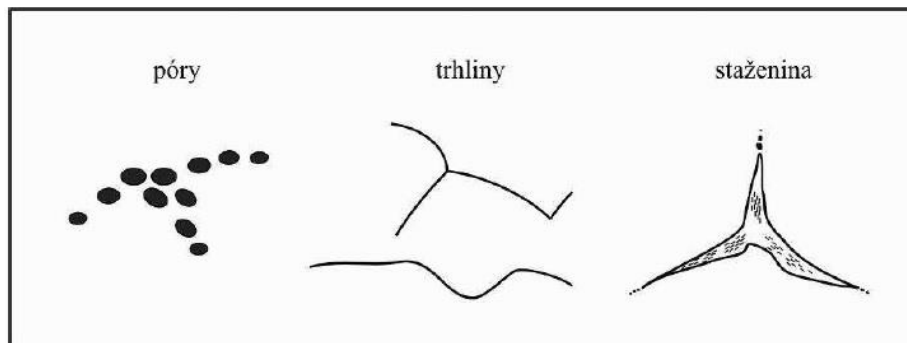
Obrázek 42 Schéma selektivního leptání perlitické oceli (a) a snímek z mikroskopu (b). [22]

5.2. Hodnocení vzorků

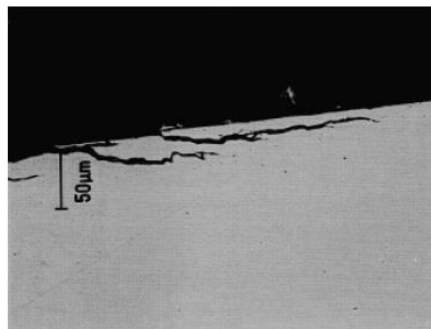
Jak již bylo řečeno, metalografické vzorky může pozorovat makroskopicky nebo mikroskopicky, a to v naleptaném nebo neleptaném stavu. Fotky z mikroskopů je možné dále zpracovávat pomocí počítačových programů. Software pro analýzu obrazu umožňuje rychlé a kvalitní hodnocení mikrostruktury, např. určení počtu, velikosti a rozložení částic. Dále také určení vzdálenosti částic a jejich podíl v základní matici. Velmi často používaný software pro tuto obrazovou analýzu je QuickPhoto Industrial. [22]

5.2.1. V neleptaném stavu

V neleptaném stavu se na vzorku detekují póry, trhliny, praskliny, mezidendritické staženiny (obr. 43 a obr. 44) a nekovové fáze materiálu.

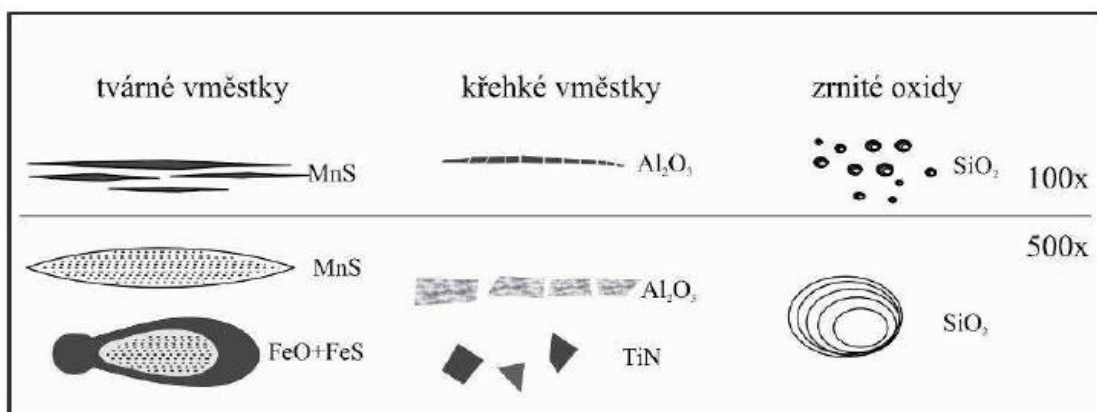


Obrázek 44 Schématické zobrazení nečistot na vzorku po leštění [22]

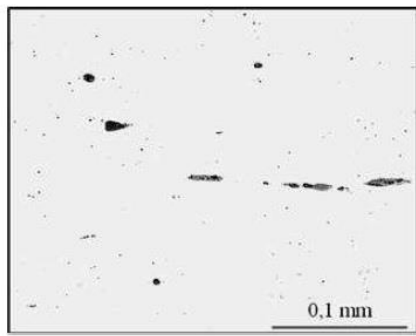


Obrázek 43 Ukázka vzorku s trhlinou [22]

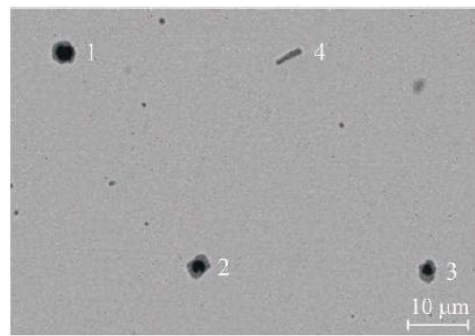
Nekovovými fázemi u ocelí se myslí oxidické vměstky, sulfity nebo silikáty. Tyto nedokonalosti materiálu jsou schématicky znázorněny na obrázku 45 a reálná fotografie z mikroskopu je na obrázku 46. [22]



Obrázek 45 Schématické znázornění nekovových vměstků [22]



a)



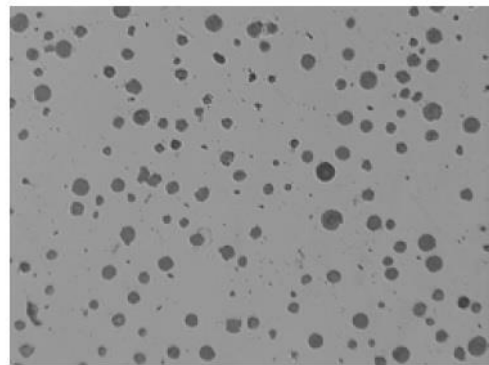
b)

Obrázek 46 Ukázky nekovových vměstků v oceli: a) oxidické vměstky, b) duplexní vměstky oxid-sulfid [22]

U vzorků z litiny se v neleptaném stavu pozoruje množství vyloučeného grafitu, jeho velikost a tvar (obr. 47)



a)

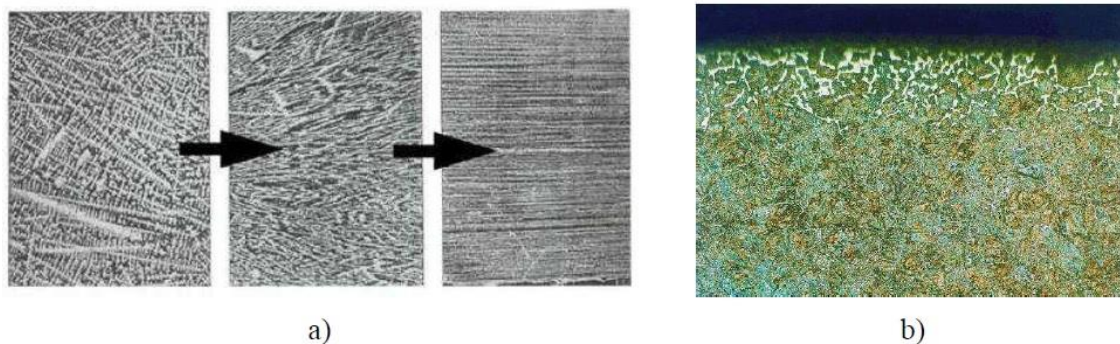


b)

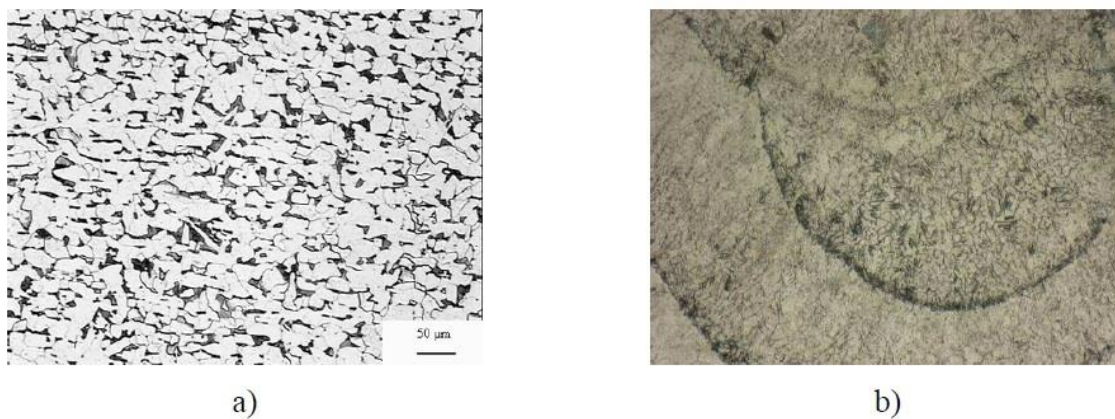
Obrázek 47 Vzorek litiny s a) lupínkovým, b) zrnitým grafitem [22]

5.2.2. V naleptaném stavu

Leptání, jak již bylo řečeno, slouží k zviditelnění struktury. V tomto stavu je možno pozorovat detaily struktury. Např. velikost, tvar a rozložení jednotlivých strukturních součástí (obr. 48a), sledování krystalizace, zkoumání svarů (obr. 48b), stanovení směru a míry deformace zrn tvářené struktury (obr. 49a), určení tloušťky nauhličené nebo oduhličené vrstvy (obr. 49b) nebo míry prokalení, stanovení jakosti tepelného nebo chemicko-tepelného zpracování atd. [22]



Obrázek 48 Přeměna dendritické struktury na vláknitou při kování (a) a síť karbidů na povrchu nauhličené oceli (b). [22]



Obrázek 49 Přeměna dendritické struktury na vláknitou při kování (a) a síť karbidů na povrchu nauhličené oceli (b). [22]

6. Praktická část

Jak již bylo řečeno v úvodu, experimentální část této práce byla vypracována na základě projektu na výběr brusky ozubení. Jedno z kol (kolo O) bylo obrobena u výroce A na odvalovací brusce od renomovaného výrobce. Zbylá tři kola (kolo A, kolo B a kolo C) byla obrobena firmou B, za různých brusných podmínek. Konkrétní informace o brusných podmínkách bohužel nemám k dispozici, jediné co vím je, že na všech kolech byl stejný přídavek na obrábění. A samotné broušení probíhalo takto:

- Kolo A: otáčky 3000 ot/min, broušeno na 7 třísek
- Kolo B: otáčky 3000 ot/min, broušeno na 5 třísek
- Kolo C: otáčky 1900 ot/min, broušeno na 7 třísek

V rámci tohoto projektu byla měřena výsledná integrita povrchu po broušení, která byla jeden z parametrů pro výběr nové brusky. Jedná se o ozubená kola vyrobená z cementační oceli 21MnCr5, na která jsou kladeny velké požadavky na životnost. Pro ověření čistoty materiálu byla provedena kontrolní zkouška pomocí optického emisního spektrometru. Výsledek této zkoušky, v hmotnostních procentech, je zobrazen v tabulce 1.

C	Mn	Si	P	S	Ni	Mo	Al	Cu	Co	Ti	Sn
0,2	1,3	0,26	0,011	0,013	1,32	0,01	0,029	0,03	0,002	0,001	0,002

Tabulka 1 Výsledky zkoušky z optického emisního spektrometru [23]

Porovnáním tohoto výsledku s materiálovým listem zmiňované oceli jsme potvrdili shodu, a to ve vysoké jakosti.

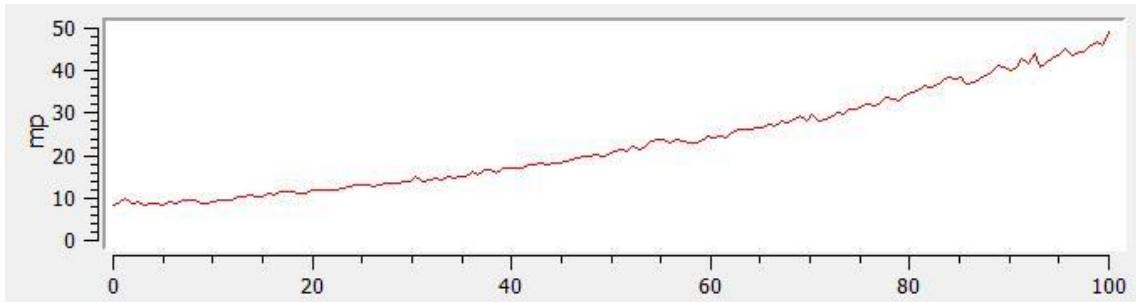
6.1. Použité přístroje

Měření zbytkového napětí metodou analýzy Barhausenova šumu bylo provedeno přístrojem Rollscan 300, vlastněným firmou PCS s.r.o. Od stejné firmy jsem měl k dispozici zubové snímače S1-18-12-01 a S1-18-12-02. Metalografická zkouška byla provedena v metalografické laboratoři podniku Žďas a.s.

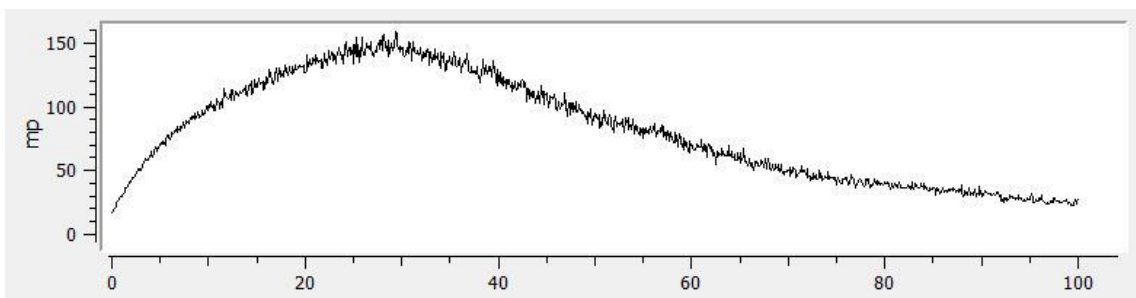
6.2. Měření analýzou Barkhausenova šumu

6.2.1. Stanovení optimálního nastavení přístroje

Pro stanovení optimálních hodnot magnetizační frekvence a magnetizačního napětí bylo potřeba provést průběhy těchto veličin. Z těchto průběhů, zobrazených na obrázcích 50 a 51, jsme určili magnetizační frekvenci 125 Hz a magnetizační napětí 6,6 V.



Obrázek 50 Napěťový průběh. Rozsah osy x: 0-10V



Obrázek 51 Frekvenční průběh pro magnetizační napětí 6,6 V. Rozsah osy x: 50-550 Hz.

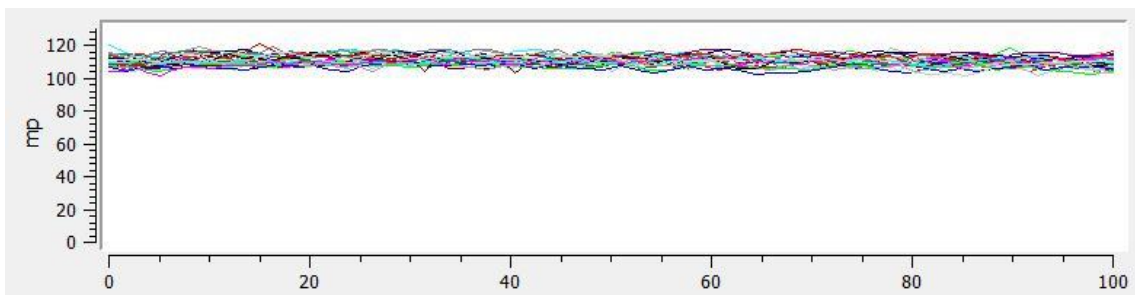
Ostatní nastavení Rollscanu:

- 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.

6.2.2. Výběr vzorku

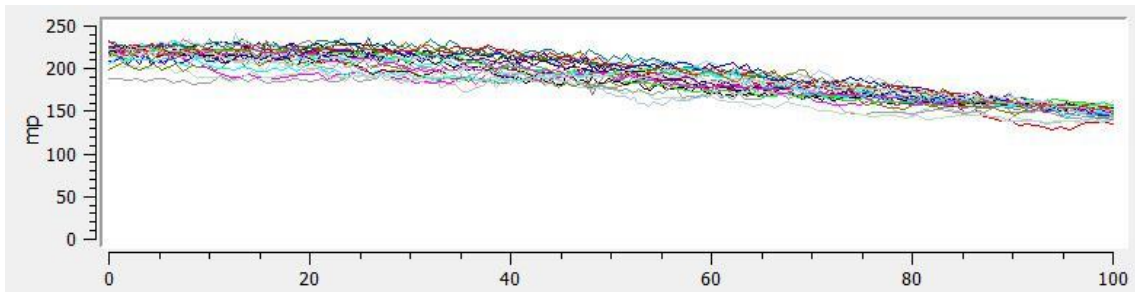
Jelikož se jedná o kola s 25 zuby, bylo by provedení metalografické analýzy všech zubů zdlouhavé a ekonomicky neúnosné. Proto všechny zuby všech kol byly co celé své délce změřeny metodou analýzy Barkhausenova šumu. Z naměřených výsledků byl z každého kola vybrán charakteristický zub, na kterém se následně provedla metalografická zkouška. Měření probíhalo snímačem S1-18-12-02.

- Na obrázku 52 je zobrazen výsledek měření levé strany zubů kola O, ze kterého můžeme vidět, že na všech pracovních plochách ozubeného kola je přibližně stejná hodnota magnetoelastického parametru. Proto nezáleží na výběru zubu pro další zkoumání (zub 13).



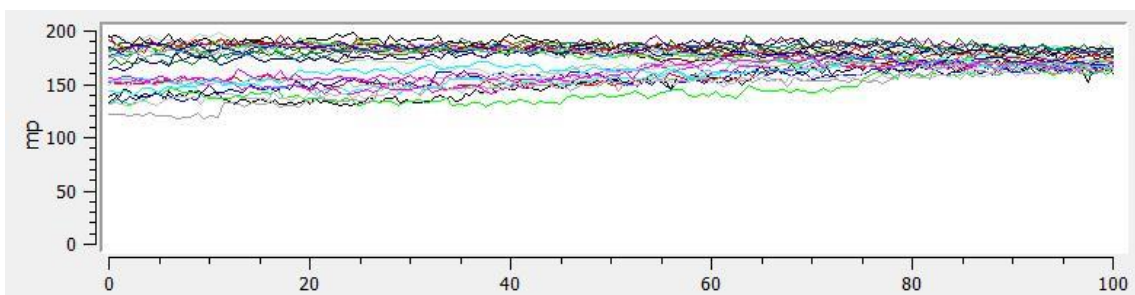
Obrázek 52 Výsledky Barkhausenovy zkoušky na levé straně zubů kola O

- Na kole A jsou hodnoty magnetoelastického parametru vyšší než na kole O a je viditelný pokles těchto hodnot po délce zubu (obr. 53). Všechny zuby mají stejný charakter, proto také nezáleží na výběru zubu (zub 13).



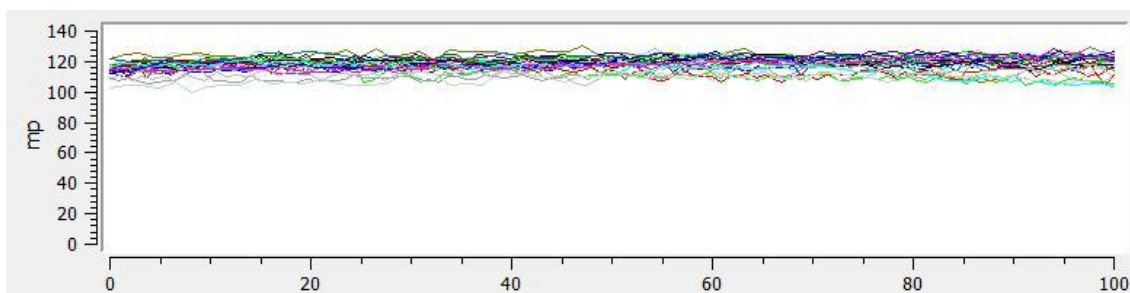
Obrázek 53 Výsledky Barkhausenovy zkoušky na levé straně zubů kola A

- U kola B je viditelný rozdíl průběhu magnetoelastického u jednotlivých zubů (obr. 54), proto pro výsledné hodnocení byli vybrány dva zuby (zub 5 a zub 13).



Obrázek 54 Výsledky Barkhausenovy zkoušky na levé straně zubů kola B

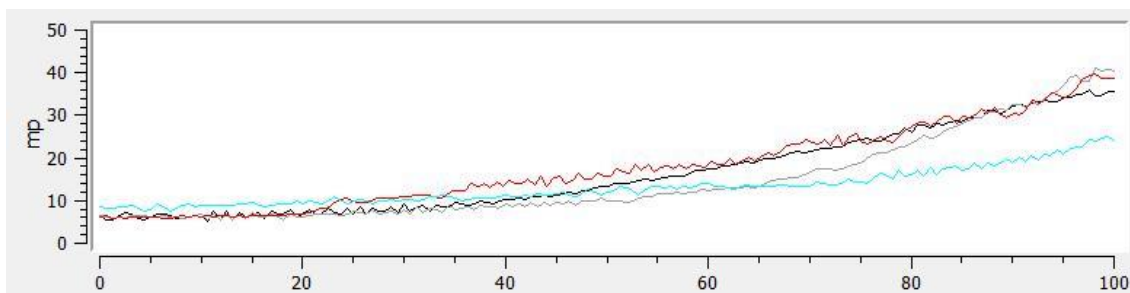
- Průběh magnetoelastického parametru na kole C (obr. 55) je podobný tomu na kole O, pouze nepatrně vyšší. Shodnost s kolem O je také v tom, že nezáleží na vybraném zubu (zub 13).



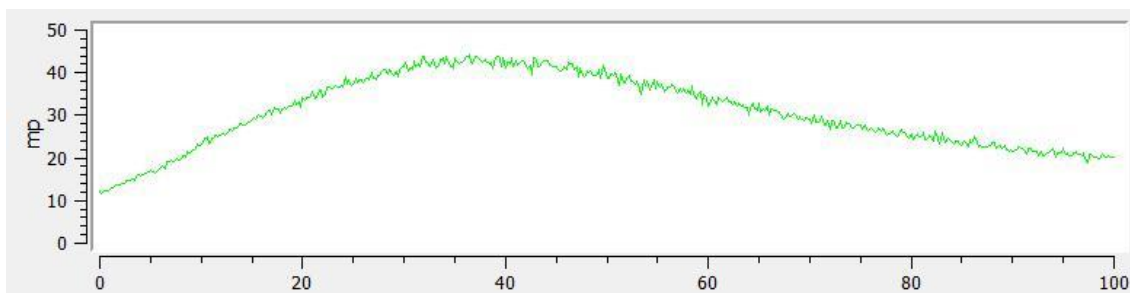
Obrázek 55 Výsledky Barkhausenovy zkoušky na levé straně zubů kola C

6.2.3. Měření jednotlivých zubů

Po vyříznutích vybraných zubů na metalografické brusce bylo provedeno bodové měření ve středu každého zubu. Z důvodu požití jiného snímače (S1-18-12-01) bylo třeba znovu provést nastavení Rollscanu, jmenovitě nastavení magnetizační frekvence a napětí. Pro nastavení těchto dvou parametrů bylo potřeba znovu provést frekvenční přeběh (obr. 56) a napěťový přeběh (obr. 57).



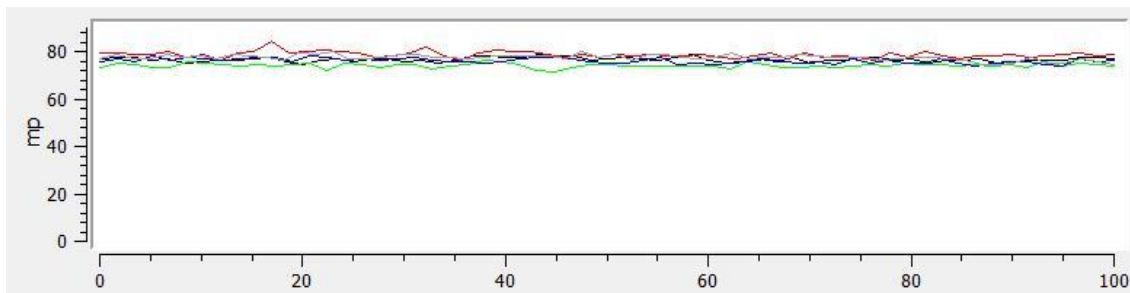
Obrázek 57 Napěťový přeběh pro frekvence 125,225, 325,425 Hz. Rozsah osy x: 0-16V



Obrázek 56 Frekvenční přeběh pro magnetizační napětí 15 V. Rozsah osy x: 50-550Hz.

Z těchto charakteristik jsme zvolili magnetizační napětí 15V a magnetizační frekvenci 225 Hz.

Jak již bylo řečeno, na kolech bylo provedeno bodové měření. Bodovým měřením rozumíme, že snímač se během měření nepohybuje. Dobu měření jsme zvolili na tři vteřiny. U bodového měření záznam magnetoelastického parametru mění pouze v malém intervalu, který je daný přesnosti měření. Grafy z těchto měření nejsou tak důležité, proto uvádím pouze jeden pro ilustraci (obr. 58). U tohoto typu měření je směrodatná samotná hodnota magnetoelastického parametru. Proto jsem výsledky z těchto měření shrnul do tabulky 2.



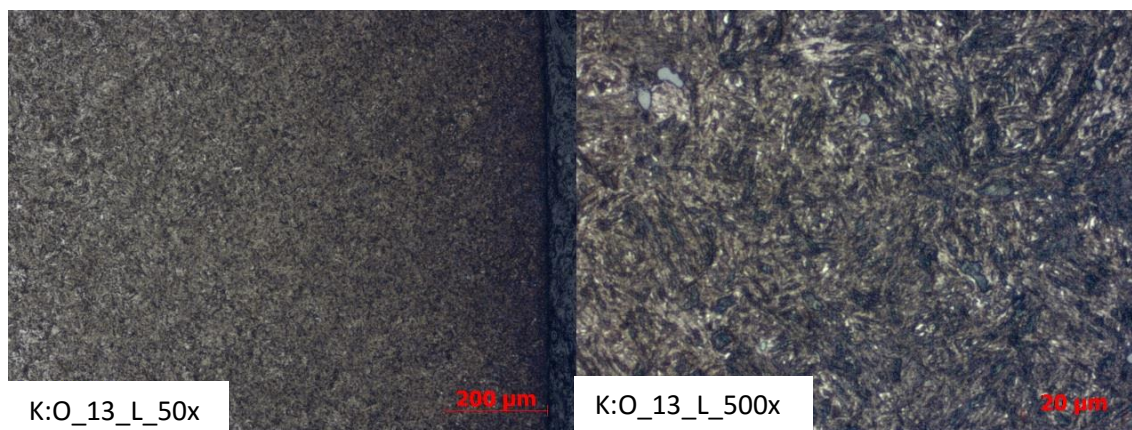
Obrázek 58 Ukázka výsledku bodového měření

Označení kola	Kolo O		Kolo A		Kolo B		Kolo B		Kolo C	
	Zub 13		Zub 13		Zub 5		Zub 12		Zub 13	
Strana zubu	Levá	Pravá	Levá	Pravá	Levá	Pravá	Levá	Pravá	Levá	Pravá
Průměr maximálních hodnot MP	79,72	72,94	224,17	83,90	118,10	100,24	142,82	159,92	82,04	92,28
Průměr minimálních hodnot MP	74,14	67,48	204,53	77,62	110,32	89,50	127,18	141,76	75,72	83,68
Průměr průměrných hodnot MP	76,70	70,27	214,44	80,88	114,00	95,32	135,72	151,57	79,44	88,72

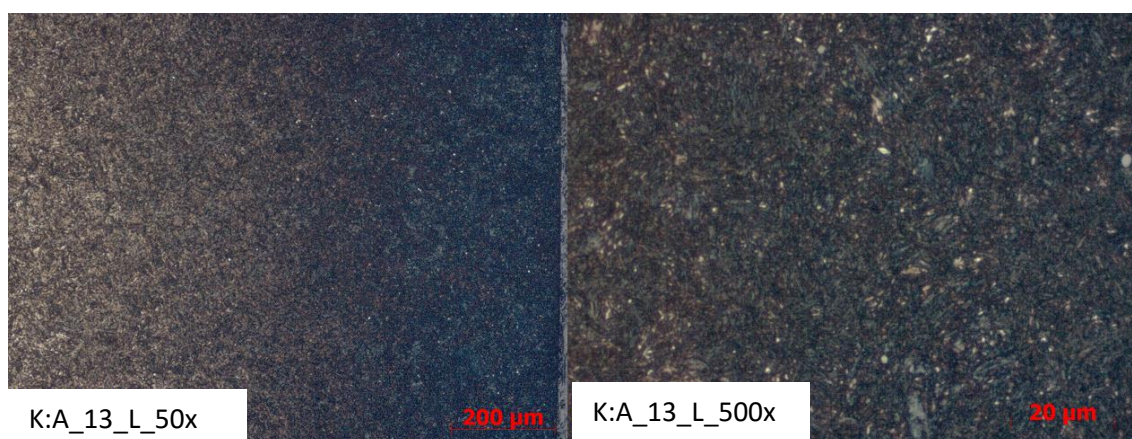
Tabulka 2 Výsledky bodových měření analýzy Barkhausenova šumu

6.3. Výsledky z metalografické zkoušky

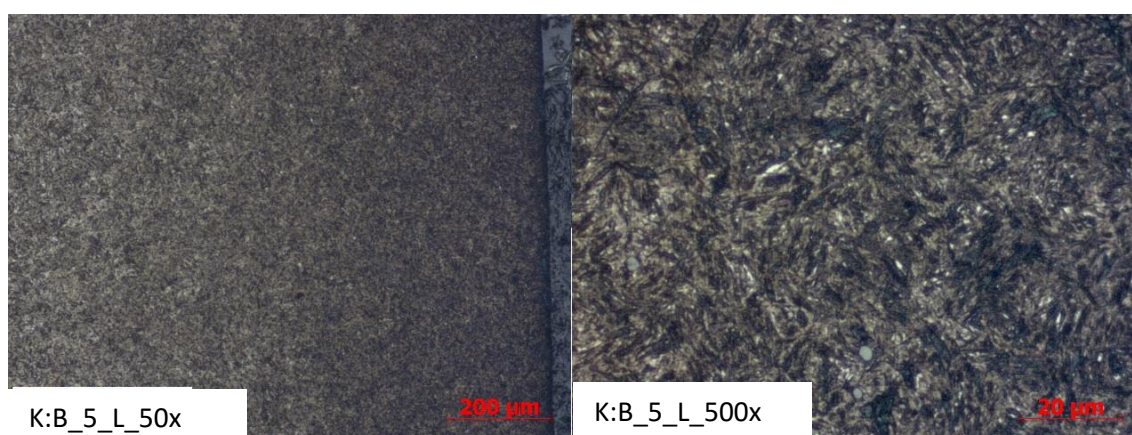
Při metalografické zkoušce byly provedeny všechny potřebné kroky k vyvolání struktury, popsané v kapitole 5. Vzorky byly pozorovány mikroskopem při padesáti a pětisetnásobném zvětšení. Pořízené fotografie struktur jednotlivých kol jsou na obrázcích 59 až 62.



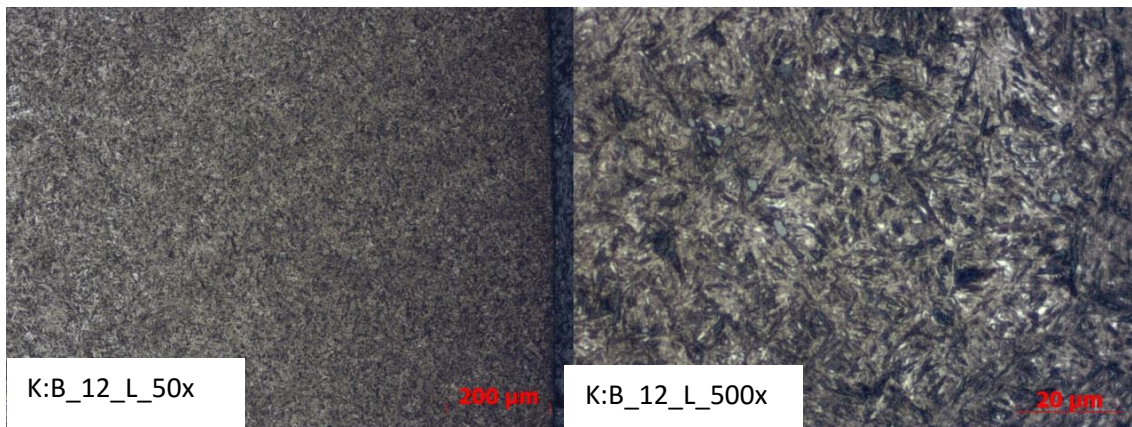
Obrázek 59 Struktura kola O- levá strana zubu 13



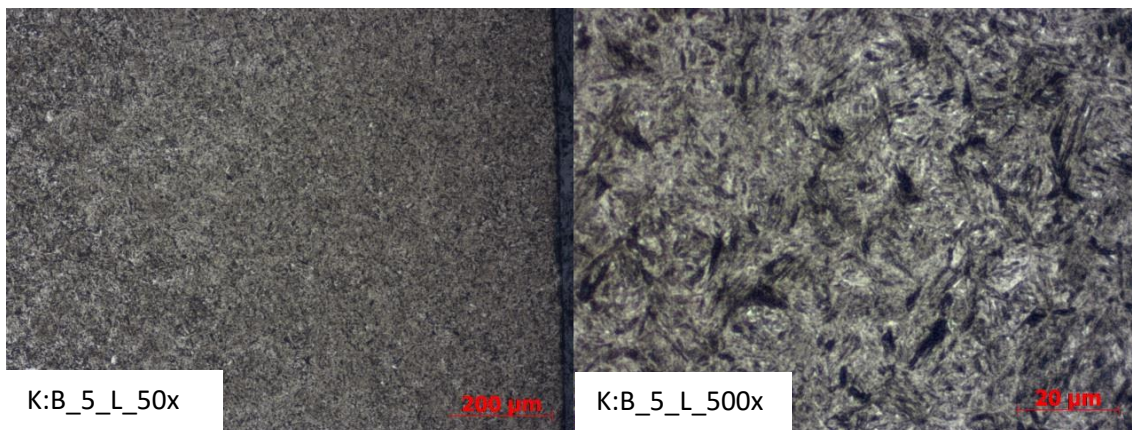
Obrázek 61 Struktura kola A- levá strana zubu 13



Obrázek 60 Struktura kola B- levá strana zubu 4



Obrázek 62 Struktura kola B- levá strana zubu 12



Obrázek 63 Struktura kola C- levá strana zubu 13

7. Závěr

Předkládaná bakalářská práce se zabývá hodnocením integrity povrchu na velmi namáhaných ozubených kolech. Hodnocení integrity povrchu bylo provedeno především sledováním hodnot magnetoelastického parametru získaných metodou analýzy Barkhausenova šumu. Tato naměřená data byla porovnána se strukturou jednotlivých kol, kterou jsem získal pomocí metalografické zkoušky. Zkoumaná ozubená kola byla vyrobena z cementační oceli 21MnCr5. Jednotlivá kola byla broušena na různých odvalovacích bruskách s různými brusnými podmínkami.

Z naměřených hodnot magnetoelastického parametru na jednotlivých kolech je vidět, že výsledky jsou velmi rozdílné (v rozmezí 70 až 220 MP). Ovšem na snímcích struktury jednotlivých kol není vidět žádný rozdíl. Struktura podpovrchových vrstev všech kol je tvořena jemným jehlicovitým martenzitem a malým množstvím zbytkového austenitu. Ovlivnění materiálu broušením není tak velké, aby došlo ke strukturním změnám. Přesto brusné podmínky a s tím související výsledná integrita povrchu mají zásadní vliv na výslednou životnost ozubených kol. Správnost měření magnetoelastického parametru, a tím potvrzení, že jednotlivá kola byla různě ovlivněna, byla provedena difraktometrickou metodou. Jednotlivá kola byla současně měřena rentgenovým difraktometrem a výsledky těchto dvou metod poměrně přesně korelují. Shrnutí těchto výsledků a jejich vzájemnou korelaci jsme publikovali v článcích Using Barkhausen Noise Analysis for evaluation of capability different grinding machines [25] a The Attempt of New Approach to Evaluate Surface Integrity [26]. Z těchto poznatků můžeme usoudit, že analýza Barkhausenova šumu je vhodná k stanovení optimálních brusných podmínek při výrobě ozubení.

Seznam požitých zdrojů

- [1] HUMÁR, A. *Technologie I. Technologie obrábění – 2. část*. Brno : Vysoké učení technické v brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, 2004. 95 s.
- [2] 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.
- [3] NIKL, M. *Moderní metody dokončování ozubení*. Brno : Vysoké učení technické v brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, 2009. 47 s.
- [4] Swisstool Export-Gruppe. Swisstool Export-Gruppe. [online]. Maďarsko : Swisstool Export-Gruppe., poslední aktualizace 8. 7. 2005 [cit. 26. 4. 2005]. Heslo „Gear Grinding Machine.jpg“ v části „Reishauer“. Dostupné na: <<http://invitel.hu/gytibo/regi%20gytibo/>>, < <http://invitel.hu/gytibo/regi%20gytibo/Reishauer.html> >.
- [5] Olomoucký kraj. ELUC. [online]. Olomouc : Railsformers s. r. o., [cit. 26. 4. 2005]. Heslo „Broušení“ v části „Učebnice; Řemesla; Zpracování kovů a opravárenství; Třískové obrábění“. Dostupné na: < <https://eluc.kr-olomoucky.cz/>>, < <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1825> >.
- [6] BUMBÁLEK, B. *Integrita povrchu a její význam pro posuzování vhodnosti dané plochy pro její funkci*, Brno : Vysoké učení technické v brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie
- [7] 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.
- [8] KŘÍŽ, M. *Integrita povrchu v oblasti tepelného zpracování*. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/download/Integrita_prednaskaTZ.pdf [cit. 28.12. 2015]
- [9] KŘÍŽ, M. *Vliv povrchu na užitě vlastnosti povrchu*. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/download/kriz_prispevek_techologie_2011.pdf [cit. 28.12. 2015]
- [10] Wheelabrator Shaping Industry. Wheelabrator Shaping Industry. [online]. Příbram : Wheelabrator Shaping Industry, poslední aktualizace 2. 5. 2016 [cit. 26. 4. 2005]. Heslo „Co je to kuličkování?“ v části „O nás“. Dostupné na: < http://www.wheelabratorgroup.com/cz/sites/wheelabrator/content/wheelabrator_home.aspx>, <http://www.wheelabratorgroup.com/cz/sites/wheelabrator/content/about_us/about_wheelabrator/what_is_shot_peening.aspx>.

- [11] KOBR, J. *Barevná metalografie železných kovů*. Pardubice : Univerzita Pardubice, Doprávní fakulta Jana Pernera, Katedra dopravních prostředků a diagnostiky, 2012. 51 s.
- [12] 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.
- [13] MALEC, Jiří. *Aplikace Barkhausenova šumu a mobilních difraktometrů. Texty k semináři*. Žďár nad Sázavou : PCS spol. s r. o., 2000. 36 s.
- [14] MALEC, Jiří. *Integrita povrchu, brusné spáleniny a přístrojové možnosti hodnocení*. Žďár nad Sázavou : PCS spol. s r. o., 2010. 4 s.
- [15] 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>.
- [16] Alpha International s r. o. *Alpha International s r. o.* [online]. Kaplice : Aira GROUP s.r.o. - outsourcing IT, poslední aktualizace červenec 2015 [cit. 2. 2. 2016]. Heslo „Princip magnetostrikce“ v části „Víte, co je to...?“. Dostupné na: <<http://www.alphaint.cz/>>, <<http://www.alphaint.cz/slovník/princip-magnetostrikce/>>.
- [17] HUSÁK, Miroslav. *Mikroaktuátory s magnetickými principy*. Praha. Dostupné na: <<http://www.micro.feld.cvut.cz/home/X348MS/prednasky/11%20Magnetické%20mikroaktu%20tory.pdf>>.
- [18] Stresstech Group. *Stresstech Group. Global partner for process and quality control*. [online]. Vaajakoski, Finland : Stresstech Group [cit. 1. 4. 2016]. Heslo „Barkhausen Noise grinding burn and heat treat defect testing equipment“ v části „Products“. Dostupné na: <<http://www.stresstechgroup.com/content/en/2/1008/Home.html>>,<<http://www.stresstechgroup.com/content/en/1034/1050/Barkhausen%20Noise%20grinding%20burn%20and%20heat%20treat%20defect%20testing%20equipment.html>>.
- [19] PÍŠEK, František. *Nauka o materiálu II*. 1.vyd. Praha : Československá akademie věd, 1959, 672 s.
- [20] Fakulta strojní Západočeské univerzity v Plzni. *Oddělení povrchového inženýrství* [online]. Plzeň : Oddělení povrchového inženýrství, poslední aktualizace červenec 2015 [cit. 14. 4. 2016]. Heslo „Metalografické hodnocení“ v části „Katalog služeb“. Dostupné na: <<http://www.ateam.zcu.cz/>>, <<http://www.ateam.zcu.cz/metalografie.html>>.
- [21] TÜV NORD CZECH ...pro bezpečnější svět. *TÜV NORD CZECH ...pro bezpečnější svět* [online]. Praha : TÜV NORD CZECH ...pro bezpečnější svět, poslední aktualizace 13. 5. 2016 [cit. 14. 4. 2016]. Heslo „Metalografická laboratoř“ v části

„Naše služby; Laboratoře a zkušebny“. Dostupné na: < <https://www.tuv-nord.com/cz/cs/index.htm> >, < <https://www.tuv-nord.com/cz/cs/laboratore-a-zkusebny/metalograficka-laborator-736.htm> >.

- [22] ŠEBESTOVÁ, Hana. *Základy přípravy vzorků pro optickou metalografii*. Učební materiál dostupný <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/znm2-1.pdf> .
- [23] Metalco Testing s.r.o. *Metalco Material testing...kompletní řešení vaší metalografické laboratoře* [online]. Roztoky u Prahy : Metalco Testing s.r.o., poslední aktualizace rok 2016 [cit. 14. 4. 2016]. Heslo „Manualní“ v části „Brusky a leštíčky“. Dostupné na: < <http://www.metalco.cz/>>, < <http://www.metalco.cz/rucni-brusky-a-lesticky/>>.
- [24] Zpráva: *Závěrečná zpráva PCS Z24-2015. Z hodnocení integrity povrchu kol CZUB a Omega*. Žďár nad Sázavou : PCS spol. s r. o. 18 s.
- [25] 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.
- [26] 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

Symbol	Rozměr	Veličina
B	[T]	Magnetická indukce
B _r	[T]	Zbytková indukce
f	[Hz]	Frekvence
H	[A/m]	Intenzita magnetického pole
H _c	[A/m]	Koercitivní síla
MP	[-]	Magnetoelastický parametr
R _a	[μm]	Střední aritmetická úchylka profilu od středové čáry v rozsahu základní délky l
μ	[H/m]	Permeabilita
μ ₀	[H/m]	Permeabilita vakua
μ _r	[-]	Relativní permeabilita
σ	[Pa]	Napětí

Seznam použitých obrázků a tabulek

Obrázek 1 Schéma frézování dělicím způsobem [1]	11
Obrázek 2 Schéma frézování odvalovacím způsobem [1]	12
Obrázek 3 Schéma broušení dělicím způsobem[1]	13
Obrázek 4 Broušení odvalovacím způsobem [4]	13
Obrázek 5 Složení brusného kotouče [5]	14
Obrázek 6 Hloubkový profil zbytkového napětí - Typ I [2]	16
Obrázek 7 Hloubkový profil zbytkového napětí - Typ II [2].....	16
Obrázek 8 Hloubkový profil zbytkového napětí - Typ III [2]	17
Obrázek 9 Hloubka průniku a prostorové rozlišení jednotlivých metod hodnocení zbytkových napětí. Destruktivní metody jsou označeni šedou barvou. [7]	19
Obrázek 10 Schéma původního Barkhausenova experimentu [14].....	20
Obrázek 11 Magnetické domény ve feromagnetickém materiálu. [14]	21
Obrázek 12 Orientace magnetických domén za působení vnějšího magnetického pole [7]	21
Obrázek 13 Změna domén v závislosti na vnějším napětí [13]	22
Obrázek 14 Skoky na hysterezní křivce [12].....	22
Obrázek 15 Panenská hysterezní křivka [13]	23
Obrázek 16 Hysterezní křivka [7]	24
Obrázek 17 Rozdílný tvar hysterezní křivky [7]	25
Obrázek 18 Typický hloubkový profil zbytkových napětí v materiálu [7]	26
Obrázek 19 Vliv napětí na amplitudě Barkhausenova šumu. [7]	27
Obrázek 20 Vliv tvrdosti na amplitudu Barkhausenova šumu [7].....	28
Obrázek 21 Závislost magnetoelastického parametru na integritě povrchu [7]	28
Obrázek 22 Rollscan 350	29
Obrázek 23 Napěťový průběh cementační oceli, rozsah osy x: 0-16 V	29
Obrázek 24 Frekvenční průběh cementační oceli, rozsah osy x: 50-550 Hz	30
Obrázek 25 Ukázka pracovního prostoru Viewscanu	30
Obrázek 26 Princip zapojení uvnitř snímače [7].....	31
Obrázek 27 Konektor snímače na Rollscan 300/350	31
Obrázek 28 Univerzální snímač S6248	32
Obrázek 29 Ukázka kontaktů na univerzálním snímači.....	32
Obrázek 30 Zubový snímač	33
Obrázek 31 Metalografická pila Struers [23]	35
Obrázek 32 Schéma zalévání za studena [22]	36
Obrázek 33 Vzorek po vyndání ze zapékacího lisu.....	36
Obrázek 34 Lis na metalografické vzorky Struers (b) a ukázka uložení vzorku před zapékáním (a).	36
Obrázek 35 Metalografická bruska ATM pro ruční broušení [23].....	37
Obrázek 36 Poloautomatická (a) a automatická (b) metalografická bruska Struers. [23].....	37
Obrázek 37 Vzorek po broušení	38
Obrázek 38 Schéma zapojení při elektrolytickém leštění (a) a detail vzorku v průběhu leštění (b). [22].....	39
Obrázek 39 Porovnání vzorků před a po leštění.	39
Obrázek 40 Schéma leptání na hranice zrn (a) a snímek z mikroskopu (b). [22]	41

Obrázek 41 Schématické zobrazení plošného leptání (a) a snímek z mikroskopu po plošném leptání (b). [22].....	41
Obrázek 42 Schéma selektivního leptání perlitické oceli (a) a snímek z mikroskopu (b). [22]...	42
Obrázek 43 Ukázka vzorku s trhlinou [22]	43
Obrázek 44 Schématické zobrazení nečistot na vzorku po leštění [22].....	43
Obrázek 45 Schématické znázornění nekovových vměstků [22]	43
Obrázek 46 Ukázky nekovových vměstků v oceli: a) oxidické vměstky, b) duplexní vměstky oxid-sulfid [22]	44
Obrázek 47 Vzorek litiny s a) lupínkovým, b) zrnitým grafitem [22].....	44
Obrázek 48 Přeměna dendritické struktury na vláknitou při kování (a) a síť karbidů na povrchu nauhličené oceli (b). [22]	45
Obrázek 49 Přeměna dendritické struktury na vláknitou při kování (a) a síť karbidů na povrchu nauhličené oceli (b). [22]	45
Obrázek 50 Napěťový průběh. Rozsah osy x: 0-10V	47
Obrázek 51 Frekvenční průběh pro magnetizační napětí 6,6 V. Rozsah osy x: 50-550 Hz.	47
Obrázek 52 Výsledky Barkhausenovy zkoušky na levé straně zubů kola O	48
Obrázek 53 Výsledky Barkhausenovy zkoušky na levé straně zubů kola A.....	48
Obrázek 54 Výsledky Barkhausenovy zkoušky na levé straně zubů kola B.....	48
Obrázek 55 Výsledky Barkhausenovy zkoušky na levé straně zubů kola C.....	49
Obrázek 56 Frekvenční průběh pro magnetizační napětí 15 V. Rozsah osy x: 50-550Hz.	49
Obrázek 57 Napěťový průběh pro frekvence 125,225, 325,425 Hz. Rozsah osy x: 0-16V	49
Obrázek 58 Ukázka výsledku bodového měření	50
Obrázek 59 Struktura kola O- levá strana zubu 13	51
Obrázek 60 Struktura kola B- levá strana zubu 4.....	51
Obrázek 61 Struktura kola A- levá strana zubu13.....	51
Obrázek 62 Struktura kola B- levá strana zubu 12	52
Obrázek 63 Struktura kola C- levá strana zubu 13	52
Tabulka 1 Výsledky zkoušky z optického emisního spektrometru [23]	46
Tabulka 2 Výsledky bodových měření analýzy Barkhausenova šumu	50