



Vliv křivosti měřených ploch na hodnotu intenzity zbytkového pole magnetické skvrny

Bakalářská práce

Studijní program: B2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301R000 – Strojní inženýrství
Autor práce: **Štěpán Záček**
Vedoucí práce: doc. Ing. Břetislav Skrbek, CSc.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Štěpán Záček
Osobní číslo: S14000289
Studijní program: B2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojní inženýrství
Název tématu: Vliv křivosti měřených ploch na hodnotu intenzity zbytkového pole magnetické skvrny
Zadávací katedra: Katedra materiálu

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se s principem a využitím magnetických metod studia struktury ocelí a litin.
2. Zaměřte se na metodu magnetické skvrny - pojem demagnetizačního činitele a vztah jeho velikosti na vnější a vnitřní stavbu feromagnetických předmětů.
3. Změřte zbytkový magnetismus H_r na vzorcích s proměnlivou křivostí při použití snímače standardního a snímače s korekcí na křivost povrchu.
4. Proveďte rozbor výsledků vytvořte vhodné matematické modely vlivu křivosti na zbytkový magnetismus H_r .

Rozsah grafických prací: dle potřeby
Rozsah pracovní zprávy: 25 - 40 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

[1] SKRBEK, B. *Metoda magnetické skvrny: Teze profesorské přednášky*. Liberec: TU v Liberci. 2008. ISBN 978-80-7372-428-3.

[2] DOČEKAL, J. *Elektromagnetická strukturoskopie grafitických litin a podobně disperzních materiálů: Disertační práce*. Liberec: TUL. 2008.

[3] NETÁHLO P. *Měření metodou magnetického bodového pólu na tenkých stěnách oceli a litin*. Diplomová práce. Liberec: TU v Liberci. 2005.

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Břetislav Skrbek, CSc.
Katedra materiálu

Datum zadání bakalářské práce: 14. listopadu 2014

Termín odevzdání bakalářské práce: 15. května 2015

prof. Ing. Petr Loudil
děkan



prof. Ing. Petr Loudil
vedoucí katedry

V Liberci dne 14. listopadu 2014

Prohlášení

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

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

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

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

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Abstrakt

Výsledky měření mají posloužit pro posouzení aplikovatelnosti metody magnetické skvrny na měření zbytkového magnetismu u vydutých nebo vypuklých ploch. Teoretická část je rozdělena na dva okruhy. A to na základní fyzikální principy a na principy strukturoskopických metod, které v této práci využijeme. V experimentální části byly popsány jednotlivé vzorky a místa měření na vzorcích. Měření proběhlo na přístroji měřícím intenzitu zbytkového magnetického pole a následně získaná data byla vyhodnocena ve formě grafů. Vzorky byly dále podrobeny zkoušce tvrdosti a metalografickému hodnocení struktury.

Klíčová slova

Nedestruktivní strukturoskopie, magnetické metody, magnetická skvrna, vyduté a vypuklé plochy.

Abstract

Results of measurement should be indicator for possibility to apply method of magnetic spot to measurement rest magnetism at convex and bulging areas. Theoretical part is divide by two main topics. First is common physical principles and second on is structuroscopy methonds and their aplication. Practical part is focus on result and description of our samples. The measurement was made by machine named DOMENA B3b. It is machine for measuring intensity of magnetic field. All data were collected and written in this work.

Keywords

NDT structuroscopy, magnetic methods, magnetic spot, convex and bulging areas.

Poděkování

Toto poděkování je směřováno především vedoucímu této bakalářské práce doc. Ing. Břetislavu Skrbkovi, CSc. za cenné rady, poskytnutí odborné literatury a za množství času, které mi věnoval při konzultacích. Poděkování také patří členům Katedry materiálu za podporu při studiu.

Obsah

1	Úvod	13
2	Teoretická část	14
2.1	Základní definice a pojmy	14
2.2	Magnetické vlastnosti látek	16
2.3	Nedestruktivní metody ke zkoumání vad u ocelí a litin	21
2.4	Snímače intenzity magnetického pole H_r	25
2.5	Měření na přístrojích DOMENA	26
3	Praktická část	28
3.1	Nastavení přístroje DOMENA B3.b	29
3.2	Způsob měření remanentního magnetizmu	29
3.3	Naměřené hodnoty	31
3.4	Porovnání sondy ploché a sondy se snímačem na pružině	40
3.5	Matematické modely pro měření na plných válcích....	43
3.6	Postup vytvoření matematických modelů.....	43
3.7	Matematické modely pro měření na ohnutých pleších.	49
3.8	Zkouška tvrdosti podle Vickerse obou vzorků.....	61
3.9	Metalografický výbrus obou vzorků	63
4	Diskuze k výsledkům	66
5	Závěr.....	68
6	Seznam použité literatury	69

Seznam zkratek a symbolů

označení název jednotka

σ - sigma [-]

δ - delta [-]

γ - gama [-]

χ - susceptibilita [-]

χ_m - relativní susceptibilita [-]

μ_r - relativní permeabilita [-]

μ_0 - permeabilita vakua [H/m]

μ_{abs} - absolutní permeabilita [H/m]

μ - permeabilita [H/m]

ϕ - magnetický indukční tok [Wb]

J - polarizace [T]

B - magnetické indukce [T]

B_r - zbytková (remanentní) magnetické indukce [T]

M - magnetizace [A/m]

M_L – intenzita zbytkového magnetického pole dané tloušťky [A/m]

M_{plochy} – intenzita zbytkového magnetického pole měřená na rovné ploše [A/m]

$M_{průměru}$ – intenzita zbytkového magnetického pole měřená na průměru [A/m]

$M_{poloměru}$ – intenzita zbytkového magnetického pole měřená na poloměru [A/m]

H, H_m - intenzita magnetického pole [A/m]

H_r - remanentní intenzita magnetického pole [A/m]

HV - tvrdost podle Vickerse [-]

U_m - magnetické napětí [V]

$\frac{1}{R}$ - křivost $\left[\frac{1}{m} \right]$

K – korelační součinitel [-]

Použité zkratky

ČSN – označení normy

NDT - nedestruktivní testování

1 Úvod

Nedestruktivní testování je diagnostická metoda, která tvoří nedílnou součást kontroly jakosti předvýrobní, výrobní, tak i provozní. Bez nedestruktivního testování by nebyla zaručena bezporuchovost, spolehlivost a bezpečnost v několika průmyslových odvětvích. Zejména v leteckém a automobilovém průmyslu a v oboru jaderná energetika. Ovšem nedestruktivní testování neslouží jen pro průmysl, ale pomáhá kontrolovat stav výrobků, které jsou již v provozu, například lanové dráhy, konstrukce mostů a mnohé další.

Obecně se nedestruktivní testování dělí do mnoha skupin podle využívaných fyzikálních principů. Účelem této práce je zaměřit se na metody magnetické a to především na metodu magnetické skvrny. Magnetické metody zkoušení umožňují zkoumat strukturní změny u feromagnetických materiálů, ocelí a litin, které jsou nečastěji používané v průmyslu. Na hodnotu měřené veličiny, kterou je intenzita zbytkového magnetického pole H_r má vliv kromě struktury i geometrie měřeného objektu v nejbližším okolí snímače. Dosavadní studentské práce matematicky popsali vliv tloušťky objektu.

Cílem této práce je na válcových nebo kulatých dutých vzorcích naměřit zbytkový magnetismus a vypracovat matematickou regresí vzorce na přepočet zbytkového magnetismu pro rovinu. V této práci probíhalo měření na komerčně vyráběném přístroji, který využívá metodu magnetické skvrny DOMENA B3.b.

2 Teoretická část

Teoretická část je zaměřena na vysvětlení základních fyzikálních definic a pojmů potřebných při nedestruktivním testování magnetickými metodami, zabývá se především metodou magnetické skvrny.

2.1 Základní definice a pojmy [5] [2]

Základní definice a pojmy pomáhají chápat principy použité v měřicích přístrojích, které byly použity pro měření v této práci.

Vznik magnetického pole

Magnetické pole vzniká s výskytem pohybujícího se elektrického náboje. Magnetické pole je popsáno Maxwellovými rovnicemi. V integrálním tvaru se nám vyskytuje vektor intenzity magnetického pole H , diferenciální vzdálenost dl , elektrický proud I .

$$\oint_l H \cdot dl = \sum I \quad (2.1)$$

Magnetický tok ϕ

Magnetický tok je dán součtem elementárních toků na celou plochu průřezu S a jednotkou je weber a platí vztah. Ve vztahu je magnetická indukce B a diferenciál plochy dS .

$$\phi = \int_S B \cdot dS [Wb] \quad (2.2)$$

Je-li vektor magnetické indukce B kolmý na plochu a má stejnou velikost ve všech elementárních plochách magnetovaného tělesa, tak platí:

$$\phi = B \cdot S [Wb] \quad (2.3)$$

Lenzův zákon

Indukovaný proud má takový směr, že magnetické pole jím vzbuzené působí proti změně, která ho vyvolala.

Magnetická indukce B

Magnetická indukce je vektorová veličina, která charakterizuje magnetické pole. Projevem magnetické indukce je silový účinek na pohybující se elektrické náboje. Platí pro ni vztah s permeabilitou látky μ a intenzitou magnetického pole H a jednotkou je Tesla.

$$B = \mu \cdot H [T] \quad (2.4)$$

Intenzita magnetického pole H

Intenzita magnetického pole je vektorová veličina, která má směr a smysl, ten je dán směrem indukčních čar. Charakterizuje vztah magnetického pole vzhledem k proudu, který toto pole vytváří. Pro přímý vodič se používá podíl proudu I a obvodu siločáry.

$$H = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r} \left[\frac{A}{m} \right] \quad (2.5)$$

Magnetizace M

Magnetizace je vektorová veličina vyjadřující intenzitu pole, která je vyvolána jeho magnetickými vlastnostmi. Ve vztahu je magnetická indukce B , permeabilita vakua μ_0 a Intenzita magnetického pole H .

$$M = \frac{B}{\mu_0} - H \left[\frac{A}{m} \right] \quad (2.6)$$

Polarizace J

Polarizace je vektorová veličina vyjadřující změnu pole vyvolanou magnetickými vlastnostmi materiálu. Příčinou polarizace je orientace domén. Ve vztahu je permeabilita vakua μ_0 , magnetizace M a jednotkou je Tesla.

$$J = \mu_0 \cdot M [T] \quad (2.7)$$

2.2 Magnetické vlastnosti látek [3]

Magnetické vlastnosti látky charakterizují dvě skalární veličiny. Magnetická susceptibilita χ a magnetická permeabilita μ . Podle hodnot magnetické susceptibility a magnetické permeability jsou rozděleny látky do tří skupin:

- diamagnetické μ je nižší než 1, χ je nižší než 0,
- paramagnetické μ je vyšší než 1, χ je vyšší než 0,
- feromagnetické μ je mnohem vyšší než 1, χ je mnohem vyšší než 1.

Diamagnetické látky jsou vybuzovány magnetickým polem. Do této skupiny patří např. Cu, Ag, Au, grafit.

Paramagnetické látky jsou slabě přitahovány magnetickým polem. Do této skupiny patří např. kovy alkalických zemin, Al, Pt, vzácné zeminy a další.

Feromagnetické látky jsou závislé na permeabilitě a intenzitě magnetického pole. Do této skupiny patří např. Fe, Co, Ni a jejich slitiny, některé slitiny neferomagnetických kovů. Nejdůležitější vlastností feromagnetických látek je to, že si podržují magnetizaci, i když pole zanikne. Mohou se tedy stát trvalými magnety.

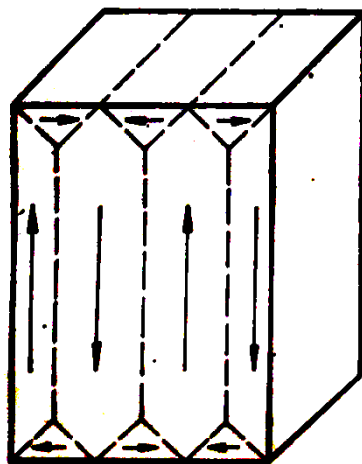
Podstata feromagnetismu

Feromagnetismus u kovů je způsoben magnetickými momenty atomů, z nichž je feromagnetická látka složena. Výsledný magnetický moment je výsledkem buď orbitálního nebo spinového momentu nebo mohou působit oba současně. Momenty, které podmiňují feromagnetický stav látky, jsou vyvolány z větší části spinem elektronů, protože orbitální moment elektronů bývá téměř vykompenzovaný. U energetických hladin, které jsou plně obsazeny elektrony, se spinové momenty vzájemně kompenzují a proto je feromagnetismus jen u takových atomů, látek, které mají vnitřní

energetickou hladinu zaplněnou jen částečně. U atomů železa, kobaltu, niklu jsou hladiny 3d.

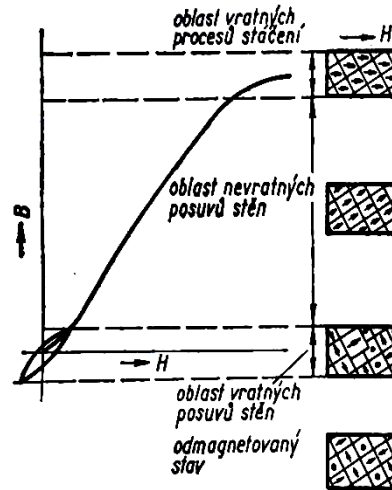
Magnetizační křivka

Každý krystal feromagnetického kovu je složen z malých oblastí, které se nazývají domény. Rozhraní mezi těmito doménami se nazývají Blochovy stěny. Uvnitř domény se k sobě řadí paralelně souhlasné skupiny elektronů a sousedních atomů. Pokud se takto děje, tak dochází k magnetizaci. Orientace domén je nahodilá, což způsobuje, že magnetické momenty se vzájemně ruší a kov navenek vystupuje jako nemagnetický (obr. 2.1). Magnetické oblasti zde tvoří uzavřený obvod.



Obr. 2.1 Doménová struktura

Na křivce prvotní magnetizace (obr. 2.2) se vynáší na svislou osu indukci B a na vodorovnou osu intenzita magnetického pole H . Můžou se pozorovat tři úseky, které odpovídají jednotlivým druhům magnetizace. V prvním úseku dochází k vratným posuvům Blochovy stěny a k růstu vhodně orientovaných domén. V druhém úseku jsou již změny nevratné. Ve třetím úseku se děje magnetizace procesem otáčení. Tyto mechanismy se vzájemně překrývají a jsou u různých feromagnetických materiálů různé.



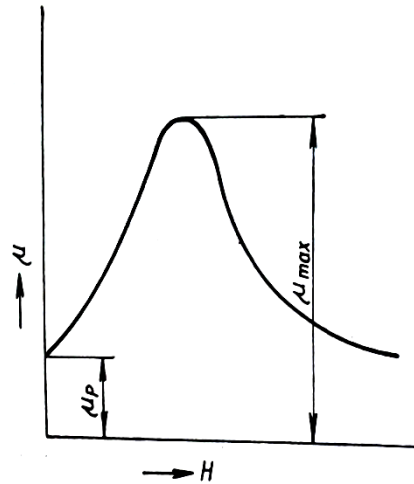
Obr. 2.2 Křivka prvotní magnetizace

Křivka permeability

Vztah pro permeabilitu je podíl magnetické indukce B a intenzity pole H .

$$\mu = \frac{B}{H} \left[\frac{H}{m} \right] \quad (2.8)$$

Charakter křivky je pro intenzitu magnetického pole $H = 0$ není permeabilita nulová, ale má hodnotu počáteční permeability μ_p . Pro vysoké hodnoty intenzity magnetického pole $H = \infty$ se křivka přibližuje hodnotě 1 (obr 2.3). Z toho vyplývá, že pro účely magnetické defektoskopie má význam permeabilita maximální, protože je největší rozdíl mezi permeabilitou zkoumané oceli a permeabilitou obklopujícího vzduchu.



Obr. 2.3 Křivka permeability

Permeabilita

Permeabilita vakua má konstantní hodnotu, která je přibližně stejná i pro vzduch a její jednotky jsou henry na metr.

$$\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7} \left[\frac{H}{m} \right] \quad (2.9)$$

Absolutní permeabilita je poměr mezi magnetickou indukcí B a intenzitou pole H.

$$\mu_{abs} = \mu_r \mu_0 = \frac{B}{H} \left[\frac{H}{m} \right] \quad (2.10)$$

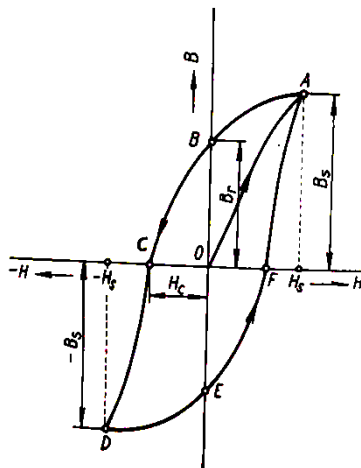
Relativní permeabilita je definována poměrem absolutní permeability a permeability vakua.

$$\mu_r = \frac{\mu_{abs}}{\mu_0} = \frac{B}{\mu_0 \cdot H} [-] \quad (2.11)$$

Relativní permeabilita udává kolikrát je větší indukce B v daném prostředí, než indukce ve vakuu při stejné intenzitě magnetického pole H. Je to bezrozměrné číslo. Je nutné udat intenzitu magnetického pole, při kterém byla stanovena.

Hysterezní smyčka

Hystereze charakterizuje feromagnetické látky. Hysterezi můžeme vyjádřit hysterezní smyčkou.



Obr. 2.4 Hysterezní smyčka

K sestrojení hysterezní smyčky se musí magnetovat materiál podél křivky prvotní magnetizace, až dosáhne bodu A, kdy se dosáhne hodnoty intenzity magnetického pole H_s je dosaženo nasycení. Potom intenzitu snižujeme po křivce ABCD. Klesne-li intenzita magnetického pole na nulu, indukce má hodnotu OB zvanou ramenní indukce B_r .

Magnetická hystereze je způsobena poruchami krystalové mřížky a lze usuzovat, že u ideální krystalové mřížky by magnetizační děje probíhaly bez hystereze.

Magnetické materiály jsou rozděleny na magneticky měkké a na magneticky tvrdé. Magneticky tvrdé materiály většinou potřebují vysoké hodnoty intenzity pole H k dosažení nasyceného stavu, potom mají širokou hysterezní smyčku. Magneticky tvrdé materiály se mohou i po zániku magnetického pole stát permanentním magnetem. Magneticky měkké materiály se nasatí při středních hodnotách. Magneticky měkké látky mají úzkou hysterezní smyčku a po zániku magnetického pole se nemůžou stát permanentními magnety.

2.3 Nedestruktivní metody ke zkoumání vad u ocelí a litin [5]

Nedestruktivní testování nám umožňuje zkoušet výrobek nebo polotovár bez porušení celistvosti a bez narušení funkce výrobku.

Obor nedestruktivní defektoskopie a strukturoskopie má vlastní strukturu norem v jednotlivých státech. Se vstupem do EU proběhlo normalizační přizpůsobení. Původní šestičíslná norma ČSN se udává pouze jako doplňková, takže většina norem má označení ČSN EN (ISO) s tří až pětímístným číslem. [4]

(Tab. 2.1 Rozdělení nedestruktivního testování) [4]

<i>Zkratka</i>	<i>Metoda</i>	<i>Hlavní uplatnění</i>
MT	magnetická prášková	povrchové vady feromagnetických výrobků
PT	kapilární	povrchové otevřené vady všech materiálů
ET	vířivých proudů	povrchové vady elektricky vodivých materiálů
LT	hledání netěsností	zkoušky propustnosti stěn
RT	radiografické	vnitřní vady objemové, RTG difrakce
VT	vizuální	stavy a vady povrchů
UT	ultrazvukem	vnitřní vady plošné i objemové
AE	akustická emise	dynamika a topografie vad, strukturních svarů

Defektoskopie je obor, který se zabývá vnitřními, povrchovými a pod povrchovými vadami.

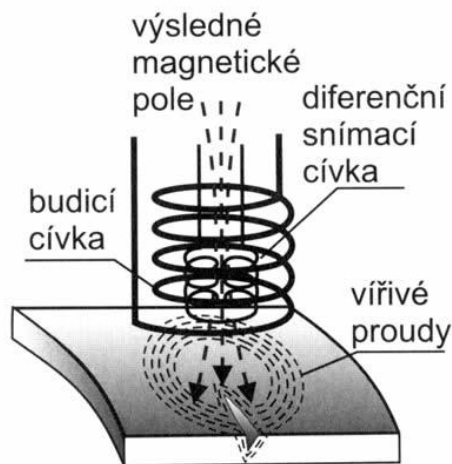
Strukturoskopie je obor, který se zabývá zjišťováním struktury a složením materiálu. Využívá metod ultrazvukových (UT), vířivých proudů (ET), magnetického zkoušení (MT) a metodu rentgenovou (RTG), která je zařazena do evropské normy (EN 15 305). V další části této práce bylo zaměřeno na metody magnetické strukturoskopie a to na metodu vířivých proudů a metodu magnetické skvrny, protože tyto metody nejvíce řeknou o struktuře materiálu.

Metoda vířivých proudů [1] [2] [3]

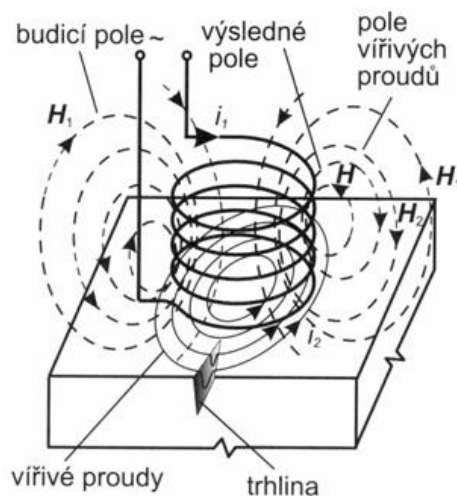
Metoda vířivých proudů je založena na zjišťování změn fyzikálních vlastností vzorku pomocí magnetického střídavého pole. V praxi to znamená, že vzorek má určitou elektrickou vodivost, permeabilitu a určité rozměry. Tento vzorek se vloží do magnetického střídavého pole, které vytváří cívka, kterou protéká střídavý proud. Takto vytvořené střídavé magnetické pole indukuje vířivé proudy, které svým magnetickým účinkem působí na pole původní, které se nazývá budící.

Princip metody vířivých proudů

Zkoušený materiál nemusí být feromagnetický, ale musí být vodivý. Materiál, který se zkouší, má různé charakteristiky (vodivost, magnetickou permeabilitu, rozměry). Pokud se zkoumaný materiál vystaví působení střídavého magnetického pole, to je vyvoláno střídavým proudem v cívce. Ve zkoumaném materiálu se indukuje proud, který vyvolá magnetické pole, které se podle Lenzova zákona brání změně budícího magnetického pole. Výsledné pole je dáno vektorovým součtem obou polí, které závisí na charakteristikách materiálu, které lze určit. Metoda se dělí na dvě základní, průchozí cívkou, která je vhodná na kulatiny a s přiloženou cívkou, která je vhodná na rovné materiály.



Obr. 2.5 Princip metody vířivých proudů na diferenčním snímači. [6]



Obr. 2.6 Princip metody vířivých proudů na absolutním snímači. [6]

Použití metody vířivých proudů

- k detekci materiálových vad (trhlin, povrchových prasklin, přeložek, poruch svaru atd.)
- měření tloušťky stěn, měření naplátovaných vrstev na kovovém i nekovovém podkladu
- kontrola povrchových vrstev kovů (cementace, nitridace)
- měření tloušťky laků
- kontrola změn materiálu
- kontrola mechanického napětí

Metoda magnetické skvrny [4] [5]

U feromagnetických materiálů vždy existuje samovolné magnetické uspořádání magnetických momentů. Je to i v případě, kdy je vzorek v demagnetizovaném stavu a navenek se žádné magnetické účinky neprojevují. Atomární momenty jsou uvnitř domén vzájemně rovnoběžné. Domény mají mikroskopické rozměry. Sousední domény jsou zmagnetovány do různých směrů a jejich působení se kompenzuje nebo uzavírá.

Princip metody magnetické skvrny

Když začne na feromagnetický materiál působit magnetické pole, dochází k růstu domén. Růst domén je způsoben posunem Blochových zón, nebo dochází ke skokové změně polarizace Barhausenovými přeskoky. Po zániku vnějšího magnetického pole H_0 se všechny domény nevrátí do původního stavu. Příčiny nevrácení domén do původního stavu jsou mřížkové poruchy, atomární pnutí, atomy feromagnetika vázané v molekulách, jež brání vratným změnám domén. Vzniká ramenní polarizace I_r . Místo, které se zmagnetuje, má vlastní magnetické pole o intenzitě H_r . Složky struktury, které obsahují karbid železitý, martenzit, dislokace, vykazují vysokou hodnotu remanentní polarizace I_r .

$$H_r = H_0 - \frac{N \cdot I_r}{\mu} \left[\frac{A}{m} \right] \quad (2.12)$$

N je demagnetizační činitel, který udává vnější i vnitřní (strukturní) geometrické poměry rozhraní feromagnetika.

Na zkoušené místo působí impulzní magnetické pole o velikosti H_0 . Tvar proudového impulsu vedený do přiložené silové cívky, případně přesně definovaný jejich sled definuje tok parazitních vířivých proudů a uspořádanost, citlivost metody.

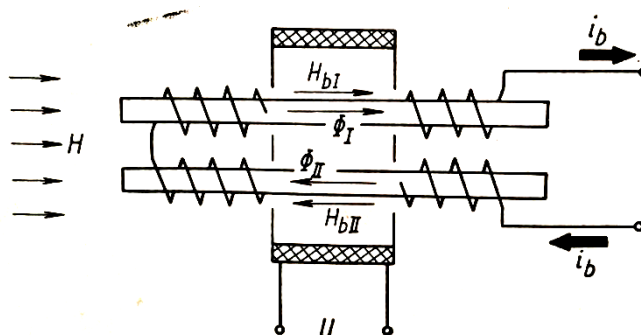
Snímačem intenzity H_r může být Hallova sonda nebo Försterova sonda. Vliv jednotlivých zrn na H_r klesá s hloubkou průniku magnetického pole. Přírůstek dH_{ri} jednotlivých zrn feromagnetika na výslednou hodnotu H_r závisí na stínícím účinku m a vzdálenosti od snímače t_i .

$$H_r = \sum m \cdot t_i \cdot dH_{ri} \left[\frac{A}{m} \right] \quad (2.13)$$

2.4 Snímače intenzity magnetického pole H_r [3]

Feromagnetická sonda (Dr. Förster)

Umožňuje měřit stejnosměrná magnetická pole o intenzitách od desetin až do stovek [$A \cdot m^{-1}$]. Feromagnetické sondy využívají k měření intenzity pole nelineární charakteristiky feromagnetických jader. Dvojitá sonda má dvě shodná jádra nejčastěji permalloyová nebo feritová s magnetizačními cívkami zapojených v sérii, tak že magnetují jádra opačnými směry. Měřicí vinutí je společné a obklopuje obě jádra. Střídavý proud I_b v magnetizačních cívkách magnetuje obě jádra. Není-li sonda ve vnějším magnetickém poli, magnetické toky mají stejnou velikost, ale opačnou fázi, což znamená, že v měřicím vnutí, se neindukuje žádné napětí. Při přítomnosti vnějšího magnetického pole se jedno jádro odmagnetuje a druhé přimagnetuje. Rovnováha magnetických toků se poruší a v měřicím vnutí, se indukuje napětí. Z něhož se obvykle vyhodnocuje druhá harmonická složka, která je úměrná velikosti magnetického pole.



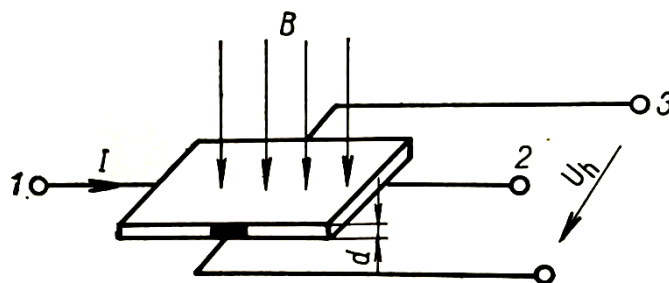
(Obr. 2.7 Princip Försterovy sondy)

Hallova sonda

V defektoskopii se používá jako indikátor magnetického pole. Její citlivost je od desítek [$A \cdot m^{-1}$]. Je určena k měření vyšších hodnot polí. Hallova sonda je obvykle plochá polovodičová destička. Působí-li kolmo k ploše magnetické pole o magnetické

indukci B a protéká článkem konstantní budící proud I , objeví se na výstupu Hallovo napětí U_h , které lze vyjádřit vzorcem, ve kterém se vyskytuje R_h což je Hallova konstanta, která je závislá na materiálu sondy a tloušťce destičky d .

$$U_h = \frac{R_h}{d} \cdot B \cdot I [V] \quad (2.14)$$



(Obr. 2.8 Schéma Hallovy sondy)

2.5 Měření na přístrojích DOMÉNA [5] [4]

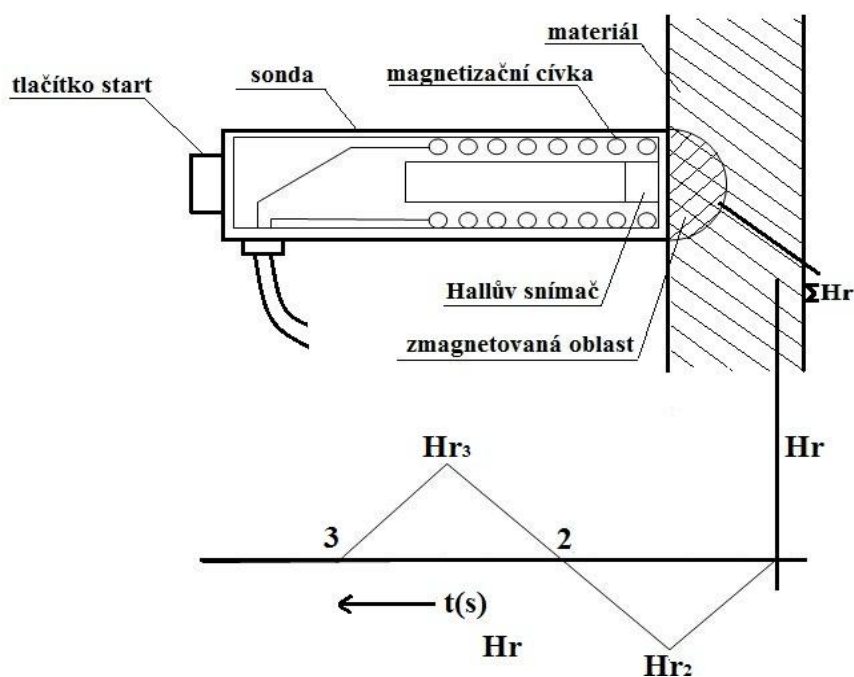
V první řadě je potřeba naměřit intenzitu magnetického pole na materiálu, který známe, nejčastěji se používá etalon. Na displeji předvolíme hodnotu M_0 etalonu, pak se spustí start. Proběhne vnitřní korekce citlivosti přístroje na tuto hodnotu M_0 zbytkového magnetického pole. Magnetizace proběhne ve třech impulzech v opačných polaritách. První impuls je demagnetizační, který téměř odstraní vliv rušivých magnetických polí a polí po opakovaném měření. Po odeznění druhého a třetího impulsu Hallův snímač změří

ramenní intenzitu M . Hodnota M je přístrojem korigovaná hodnota zbytkového magnetického pole magnetické skvrny [A/m].

Na přístroji DOMENA se objeví součet obou absolutních hodnot, tak že platí vztah.

$$H_r = |H_{r2}| + |H_{r3}| \quad (2.15)$$

Přístroj měří intenzity v absolutních hodnotách a udává pouze porovnávací hodnoty mezi vzorky. Na materiálu, který známe (etalon) a na zkoumaném materiálu se odvozují v závislosti na struktuře mechanické vlastnosti.



Obr. 2.9 Schéma sondy [5]

Pro měření konkrétní veličiny na přístroji DOMENA B3.b se musí nejprve uložit do paměti přepočtový vztah, který má obecný vzorec, kde A , B jsou konstanty, které jsou určeny aplikačním vývojem. C je požadovaná veličina a M je magnetizace.

$$C = A \cdot M + B$$

$$(2.16)$$

Technický popis DOMENY B.3B

Na přístroji je 8 stupňů intenzity magnetizačního pulzu. Na displeji se můžou ukázat i statistické hodnoty jakou jsou (průměr z měření, počet měření, směrodatná odchylka). Přístroj přenesse maximálně 100 hodnot. Pro měření jsou režimy krátký (L) kde, magnetizační pulz 3x mění polaritu před měřením a dlouhý režim (LL), kde magnetizační pulz 5x mění polaritu před měřením. Snímač s rovným čelem má průměr 21mm.

Technické parametry DOMENY B.3b

- Výstup paměti: Sériový RS 232
- Napájení: Pb akumulátor 2x12V/2 Ah
- Rozměry přístroje: 300 x 230 x 150 mm
- Hmotnost: 3,5 kg
- Maximální energie magnetizačního pulsu: 10mF 24V

3 Praktická část

Experiment modeluje nejběžnější případ aplikace přístrojů DOMENA. Měření na feritickoperlitické matrici slitin Fe-C. Měření na válcových silnostěnných výrobcích a tenkostěnných vypuklých a vydutých ploch obrobků a odlitků. Grafickým a matematickým modelem nezávislým na struktuře byly dosud popsány korekce hodnoty M při měření na tenkých rovných stěnách.

$$M_s = \frac{M_L}{81 \cdot L^{-2,91} + 1} [A/m] \quad (3.1)$$

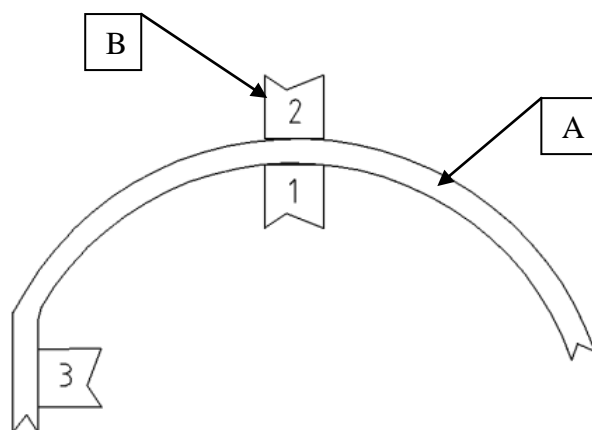
kde: M_s – hodnota naměřená na silné stěně ($L_{\min} = 12\text{mm}$), M_L – hodnota M naměřená na tenké stěně o síle L. Platí pro interval L 1 až 15mm. [1]

3.1 Nastavení přístroje DOMENA B3.b

Před každým začátkem měření na přístroji DOMENA B3.b je nutné nastavit parametry a provést kalibraci. Po zapnutí přístroje nastavíme přístroj na stav T, kdy přístroj naměří přepočtový koeficient. Po naměření přepočtového koeficientu se přepne přístroj do režimu měření krátké magnetizace. Na přístroji je označena písmenem L. Přístroj se kalibruje pomocí etalonu na hodnotu $M = 200$. Pokud se provedou předešlé kroky, může se začít měřit. Po ukončení měření se znova změří hodnota etalonu. Pokud dojde k výraznější změně citlivosti sondy, tak se z podílu původní a konečné hodnoty získá korekční součinitel.

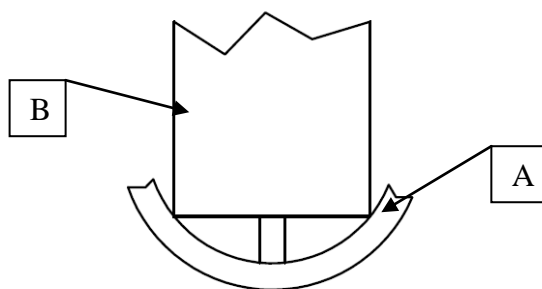
3.2 Způsob měření remanentního magnetizmu [7]

Měření přístrojem DOMENA B3.b bylo provedeno na dvou druzích vzorků, a to na kulatině o průměrech: 8mm, 15mm, 30mm, 60mm stejného materiálu, kterým byla ocel ČSN 12 060. Druhý typ vzorku je plech tloušťky 5mm ohýbaný na poloměry: R10, R15, R30, R45, R65, R100 stejného materiálu, kterým byla ocel ČSN 11 500. Měření bylo provedeno dvěma sondami, plochou sondou a sondou se snímačem na pružině. Měření na kulatině bylo provedeno na dvou místech: čelo, válcová plocha. Měření u ohýbaných plechů bylo provedeno na třech místech: vnitřní rádius, vnější rádius a na boku. Rádius v pozici 2 je o 5 mm větší než v místě 1 (obr. 3.1).



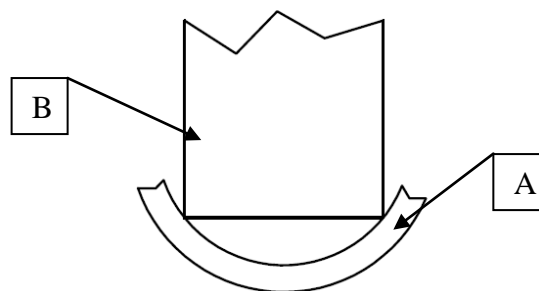
Obr. 3.1 Schéma měřených míst u ohnutého plechu.

A - plech, B - Místo měření sondou: měření v místě 1 - vnitřní rádius vyduuté plochy, měření v místě 2 - vnější rádius vypuklé plochy, měření v místě 3 - bok vzorku, který je část rovné plochy



Obr. 3.2 Schéma sondy se snímačem na pružině u malých poloměrů.

A – plech, B – sonda se snímačem na pružině



Obr. 3.3 Schéma měření malých poloměrů plochou sondou.

A – plech, B – plocha sonda

V pozici 1 je Hallův snímač o průměru 21 mm je vzdálen od ohnutého plechu: $R_{10}=8\text{mm}$, $R_{15}=4\text{mm}$, $R_{20}=3\text{mm}$, $R_{30}=1\text{mm}$, $R_{45}=0,5\text{mm}$, $R_{65}=0,3\text{mm}$, $R_{100}=0,2\text{mm}$.

3.3 Naměřené hodnoty

Naměřené hodnoty byly zpracovány do tabulek. Na každém vzorku byly naměřeny dvě hodnoty. Pro vytvoření matematických modelů se použije aritmetický průměr z těchto dvou hodnot. V průběhu měření byla vždy po určité době naměřena hodnota M u etalonu. Tato kontrola se prováděla z důvodu kontroly odchylky hodnoty M . Pokud by se hodnota lišila o více než 4%, byl by nutný přepočít. Bez tohoto přepočtu by docházelo k nepřesnostem. Během měření k takto velké odchylce nikdy nedošlo, proto nebylo nutné dělat korekční výpočet.

Naměřené hodnoty na vzorcích plochou sondou při magnetizaci 2

Tab. 3.1 Hodnoty Hr naměřené na kulatině

Průměr [mm]	8	15	30	60	Rovná plocha
Magnetizace	2				
Hr	96,9	64,9	61,6	60,6	52,6
	91,9	59,5	58,5	52,5	46,5
Průměrná hodnota	94,4	62,2	60,1	56,6	49,5
Hodnota M u kalibru na začátku měření	202				
Hodnota M u kalibru na koci měření	204				

Tab. 3.2 Hodnoty Hr naměřené na plechu s poloměrem 10

R10	1	2	3
Magnetizace	2		
Hr	13,1	105,0	88,5
	14,1	103,0	94,5
Průměrná hodnota Hr	13,6	104,0	91,5

Tab. 3.3 Hodnoty Hr naměřené na plechu s poloměrem 15

R15	1	2	3
Magnetizace	2		
Hr	30,3	105,0	90,7
	30,3	102,0	98,7
Průměrná hodnota Hr	30,3	103,5	94,7

Tab. 3.4 Hodnoty Hr naměřené na plechu s poloměrem 20

R20	1	2	3
Magnetizace	2		
Hr	40,4	94,9	93,7
	40,4	87,8	99,7
Průměrná hodnota Hr	40,4	91,4	96,7

Tab. 3.5 Hodnoty Hr naměřené na plechu s poloměrem 30

R30	1	2	3
Magnetizace	2		
Hr	57,5	89,8	95,7
	59,5	91,9	99,7
Průměrná hodnota Hr	58,5	90,85	97,7

Tab. 3.6 Hodnoty Hr naměřené na plechu s poloměrem 45

R45	1	2	3
Magnetizace	2		
Hr	71,7	89,8	100,5
	69,6	89,8	102,5
Průměrná hodnota Hr	70,7	89,8	101,5

Tab. 3.7 Hodnoty Hr naměřené na plechu s poloměrem 65

R65	1	2	3
Magnetizace	2		
Hr	80,8	82,8	90,4
	85,8	84,8	96,4
Průměrná hodnota Hr	83,3	83,8	93,4

Tab. 3.8 Hodnoty Hr naměřené na plechu s poloměrem 100

R100	1	2	3
Magnetizace	2		
Hr	80,8	81,8	104,5
	83,8	84,8	99,5
Průměrná hodnota Hr	82,3	83,3	102

Naměřené hodnoty na vzorcích plochou sondou při magnetizaci 7

Tab. 3.9 Hodnoty Hr naměřené na kulatině

Průměr [mm]	8	15	30	60	Rovná plocha
Magnetizace	7				
Hr	212,0	151,0	134,0	133,0	130,5
	220,0	149,0	130,0	129,0	131,5
Průměrná hodnota	216,0	150,0	132,0	131,0	130,8
Hodnota M u kalibru na začátku měření	198				
Hodnota M u kalibru na koci měření	201				

Tab. 3.10 Hodnoty Hr naměřené na plechu s poloměrem 10

R10	1	2	3
Magnetizace	7		
Hr	40,4	225,0	184,0
	37,3	222,0	192,0
Průměrná hodnota Hr	38,9	223,5	188,0

Tab. 3.11 Hodnoty Hr naměřené na plechu s poloměrem 15

R15	1	2	3
Magnetizace	7		
Hr	65,6	217,0	180,0
	63,6	210,0	182,0
Průměrná hodnota Hr	64,6	213,5	181,0

Tab. 3.12 Hodnoty Hr naměřené na plechu s poloměrem 20

R20	1	2	3
Magnetizace	7		
Hr	97,9	220,0	193,0
	93,9	203,0	185,0
Průměrná hodnota Hr	95,9	211,5	189,0

Tab. 3.13 Hodnoty Hr naměřené na plechu s poloměrem 30

R30	1	2	3
Magnetizace	7		
Hr	130,0	192,0	191,0
	126,0	186,0	192,0
Průměrná hodnota Hr	128,0	189,0	191,0

Tab. 3.14 Hodnoty Hr naměřené na plechu s poloměrem 45

R45	1	2	3
Magnetizace	7		
Hr	165,0	184,0	193,0
	166,0	184,0	197,0
Průměrná hodnota Hr	165,5	184,0	195,0

Tab. 3.15 Hodnoty Hr naměřené na plechu s poloměrem 65

R65	1	2	3
Magnetizace	7		
Hr	185,0	177,0	185,0
	180,0	170,0	193,0
Průměrná hodnota Hr	182,5	173,5	189,0

Tab. 3.16 Hodnoty Hr naměřené na plechu s poloměrem 100

R100	1	2	3
Magnetizace	7		
Hr	182,0	180,0	190,0
	182,0	190,0	194,0
Průměrná hodnota Hr	182,0	185,0	192,0

**Naměřené hodnoty na vzorcích sondou se snímačem
na pružině při magnetizaci 2**

Tab. 3.17 Hodnoty Hr naměřené na kulatině

Průměr [mm]	8	15	30	60	Rovná plocha
Magnetizace	2				
M	100,0	68,9	50,9	47,9	44,0
	105,0	64,8	49,3	50,6	46,0
Průměrná hodnota	102,5	66,9	50,1	49,3	45,0
Hodnota M u kalibru na začátku měření	203				

Tab. 3.18 Hodnoty Hr naměřené na plechu s poloměrem 10

R10	1	2	3
Magnetizace	2		
Hr	24,3	100,0	83,0
	27,7	99,3	93,0
Průměrná hodnota Hr	26,0	99,7	88,0

Tab. 3.19 Hodnoty Hr naměřené na plechu s poloměrem 15

R15	1	2	3
Magnetizace	2		
Hr	50,0	91,8	80,0
	46,6	93,2	86,0
Průměrná hodnota Hr	48,3	92,5	83,0

Tab. 3.20 Hodnoty Hr naměřené na plechu s poloměrem 20

R20	1	2	3
Magnetizace	2		
Hr	58,1	97,9	77,0
	60,1	72,2	73,0
Průměrná hodnota Hr	59,1	85,1	75,0

Tab. 3.21 Hodnoty Hr naměřené na plechu s poloměrem 30

R30	1	2	3
Magnetizace	2		
Hr	80,4	79,0	76,0
	76,3	70,2	70,0
Průměrná hodnota Hr	78,4	74,6	73,0

Tab. 3.22 Hodnoty Hr naměřené na plechu s poloměrem 45

R45	1	2	3
Magnetizace	2		
Hr	78,3	73,6	88,0
	74,3	72,9	78,0
Průměrná hodnota Hr	76,3	73,3	83,0

Tab. 3.23 Hodnoty Hr naměřené na plechu s poloměrem 65

R65	1	2	3
Magnetizace	2		
Hr	74,3	62,8	80,0
	66,2	91,2	84,0
Průměrná hodnota Hr	70,3	77,0	82,0

Tab. 3.24 Hodnoty Hr naměřené na plechu s poloměrem 100

R100	1	2	3
Magnetizace	2		
Hr	74,3	75,6	80,0
	71,6	72,2	66,0
Průměrná hodnota Hr	73,0	73,9	73,0

**Naměřené hodnoty na vzorcích sondou se snímačem
na pružině při magnetizaci 7**

Tab. 3.25 Hodnoty Hr naměřené na kulatině

Průměr [mm]	8	15	30	60	Rovná plocha
Magnetizace	7				
Hr	221,0	147,0	118,0	108,0	102,0
	234,0	149,0	110,0	102,0	106,0
Průměrná hodnota	227,5	148,0	114,0	105,0	104,0
Hodnota M u kalibru na začátku měření	206				

Tab. 3.26 Hodnoty Hr naměřené na plechu s poloměrem 10

R10	1	2	3
Magnetizace	7		
Hr	54,7	197,0	180,0
	54,0	193,0	175,0
Průměrná hodnota Hr	54,4	195,0	177,5

Tab. 3.27 Hodnoty Hr naměřené na plechu s poloměrem 15

R15	1	2	3
Magnetizace	7		
Hr	97,2	187,0	169,5
	100,0	195,0	189,5
Průměrná hodnota Hr	98,6	191,0	179,5

Tab. 3.28 Hodnoty Hr naměřené na plechu s poloměrem 20

R20	1	2	3
Magnetizace	7		
M	123,0	183,0	160,5
	111,0	177,0	172,5
Průměrná hodnota M	117,0	180,0	166,5

Tab. 3.29 Hodnoty Hr naměřené na plechu s poloměrem 30

R30	1	2	3
Magnetizace	7		
Hr	129,0	150,0	175,5
	139,0	147,0	159,5
Průměrná hodnota Hr	134,0	148,5	167,5

Tab. 3.30 Hodnoty Hr naměřené na plechu s poloměrem 45

R45	1	2	3
Magnetizace	7		
Hr	141,0	150,0	175,5
	135,0	164,0	165,5
Průměrná hodnota Hr	138,0	157,0	170,5

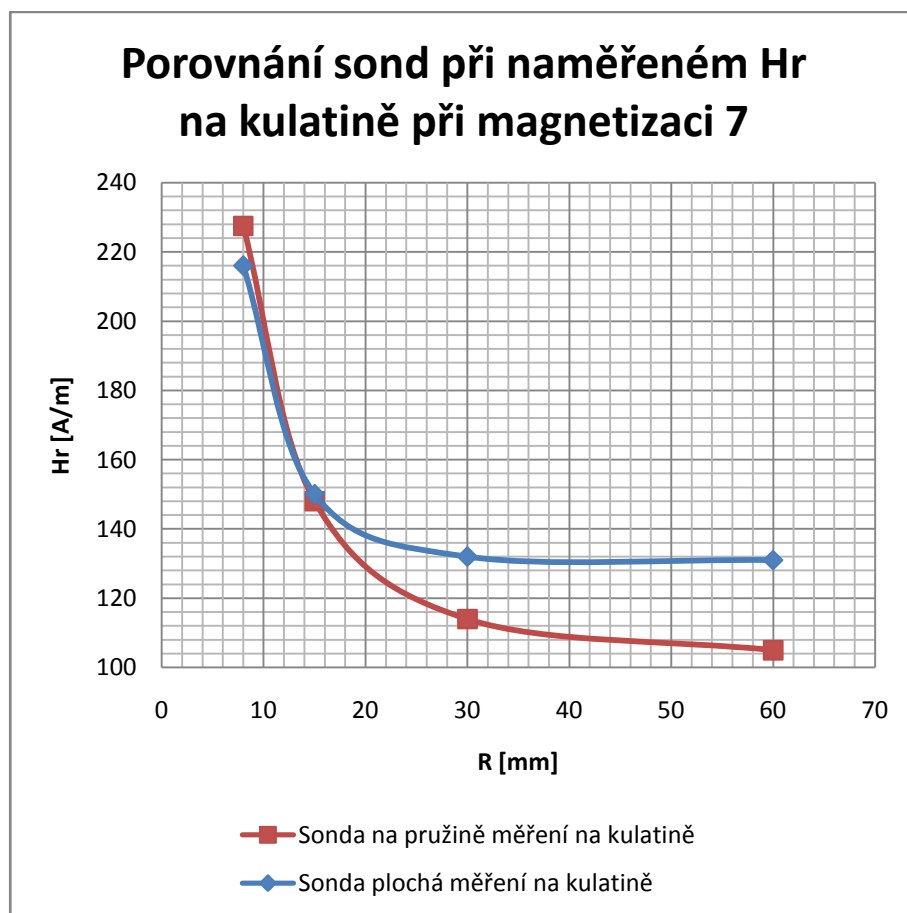
Tab. 3.31 Hodnoty Hr naměřené na plechu s poloměrem 65

R65	1	2	3
Magnetizace	7		
Hr	152,0	129,0	181,0
	158,0	135,0	195,0
Průměrná hodnota Hr	155,0	132,0	188,0

Tab. 3.32 Hodnoty Hr naměřené na plechu s poloměrem 100

R100	1	2	3
Magnetizace	7		
Hr	158,0	167,0	175,0
	140,0	155,0	191,0
Průměrná hodnota Hr	149,0	161,0	183,0

3.4 Porovnání sondy ploché a sondy se snímačem na pružině

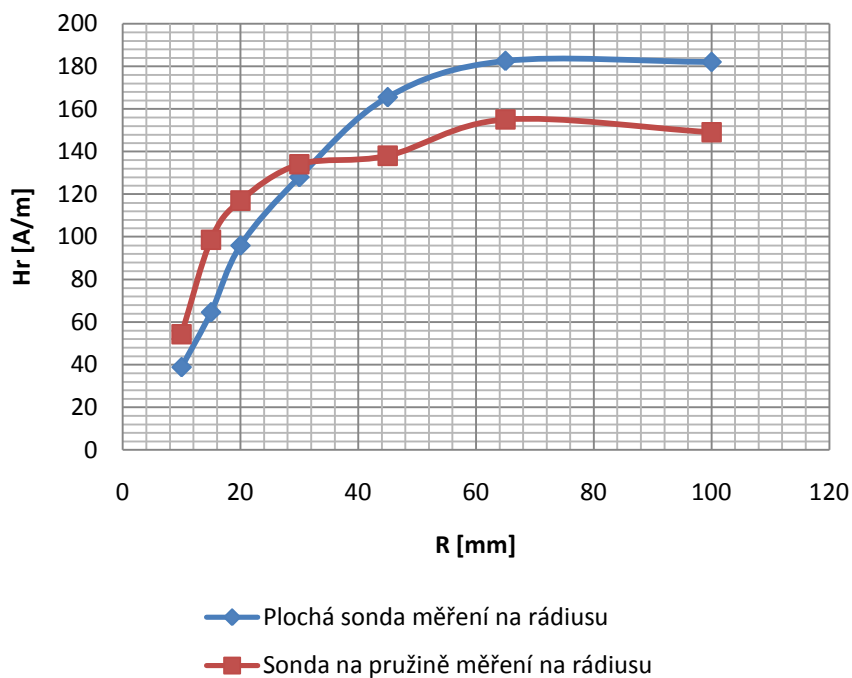


Graf 3.1 Porovnání ploché sondy a sondy se snímačem na pružině u kulatiny.

Pro porovnání sond byla zvolena magnetizace 7 z důvodu lepší přehlednosti grafu.

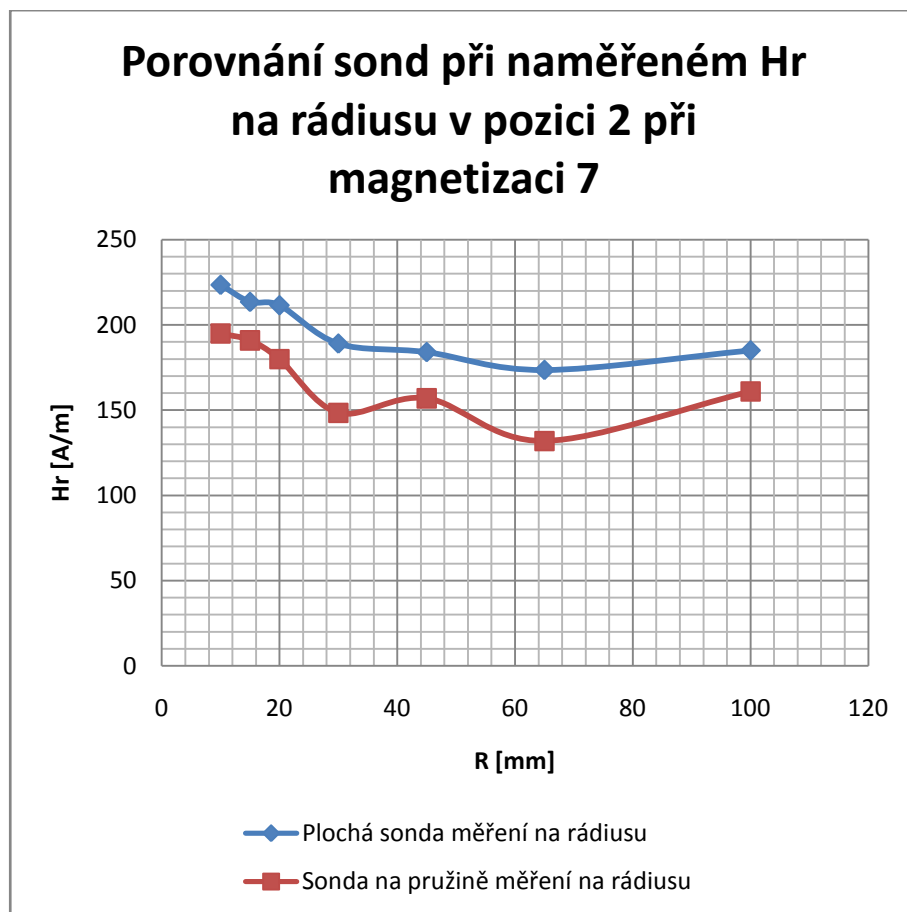
Na grafu 3.1 je vidět, že hodnoty do poloměru 15mm jsou téměř totožné pro obě použité sondy. Se zvyšující se hodnotou poloměru jsou naměřené hodnoty H_r vyšší při měření plochou sondou.

Porovnání sond při naměřeném H_r na rádiusu v pozici 1 při magnetizaci 7



Graf 3.2 Porovnání ploché sondy a sondy se snímačem na pružině u ohnutých plechů v pozici 1 (vydutá plocha).

Na grafu 3.2 je vidět, že u sondy se snímačem na pružině výše posunutě až do poloměru $R30$, kde se situace změní naopak.



Graf 3.3 Porovnání ploché sondy a sondy se snímačem na pružině u ohnutých plechů v pozici 2 (vypuklá plocha).

Na grafu 3.3 je vidět, že průběh grafu je podobný, ale sonda se snímačem na pružině měří nižší hodnoty H_r .

3.5 Matematické modely pro měření na plných válcích

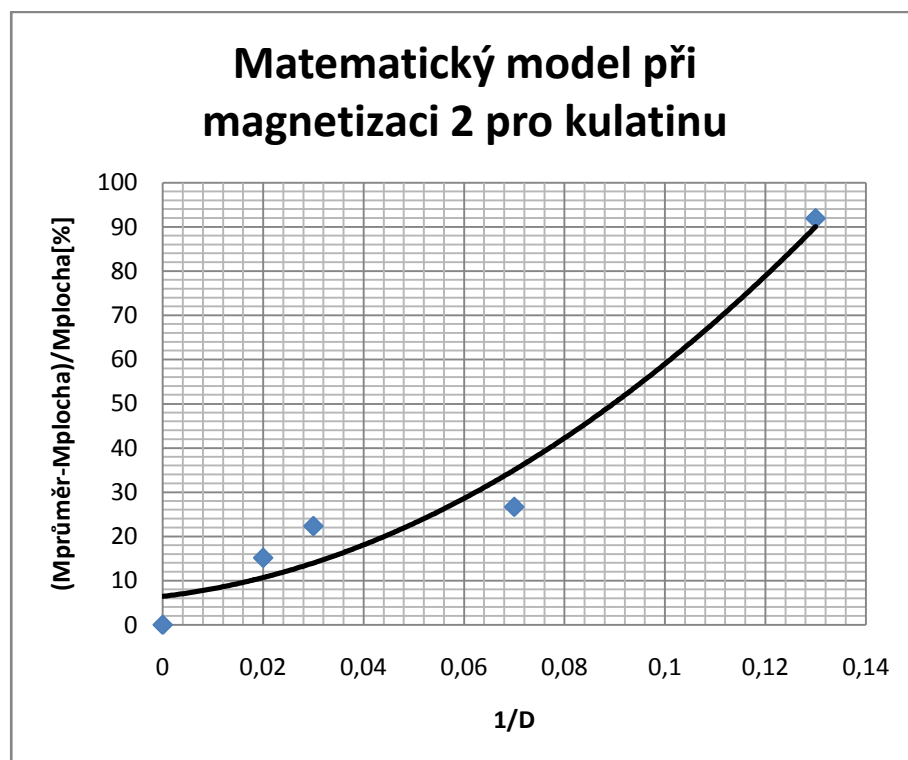
Hlavním cílem této práce bylo vytvořit matematické modely pro závislost křivosti na zbytkovém magnetismu. Tyto modely budou udávat přepočtený zbytkový magnetismus rovné plochy na zbytkový magnetismus zakřivené plochy. Pro matematické modely u vydutých a vypuklých ploch bylo nutné naměřit zbytkový magnetismus na rovné ploše, který je označen v (obr. 3.1) pozicí 3.

3.6 Postup vytvoření matematických modelů v programu

Excel

- Naměřené hodnoty byly naneseny do bodového grafu, kde na ose x je převrácená hodnota průměru a na ose y je rozdíl zbytkového magnetismu válcové plochy a rovné plochy.
- Po nanesení hodnot do grafu, se proložily křivkou. Křivka byla vybrána podle korelačního součinitele. Jde nám o to, aby byl korelační součinitel co největší. Korelační součinitel, udává přesnost vzorce.
- Za pomoci programu Excel byla získána rovnice funkce a korelační součinitel.

Matematický model při magnetizaci 2 měřen plochou sondou u kulatiny



Graf 3.4 Matematický model pro kulatinu při magnetizaci 2 měřen plochou sondou.

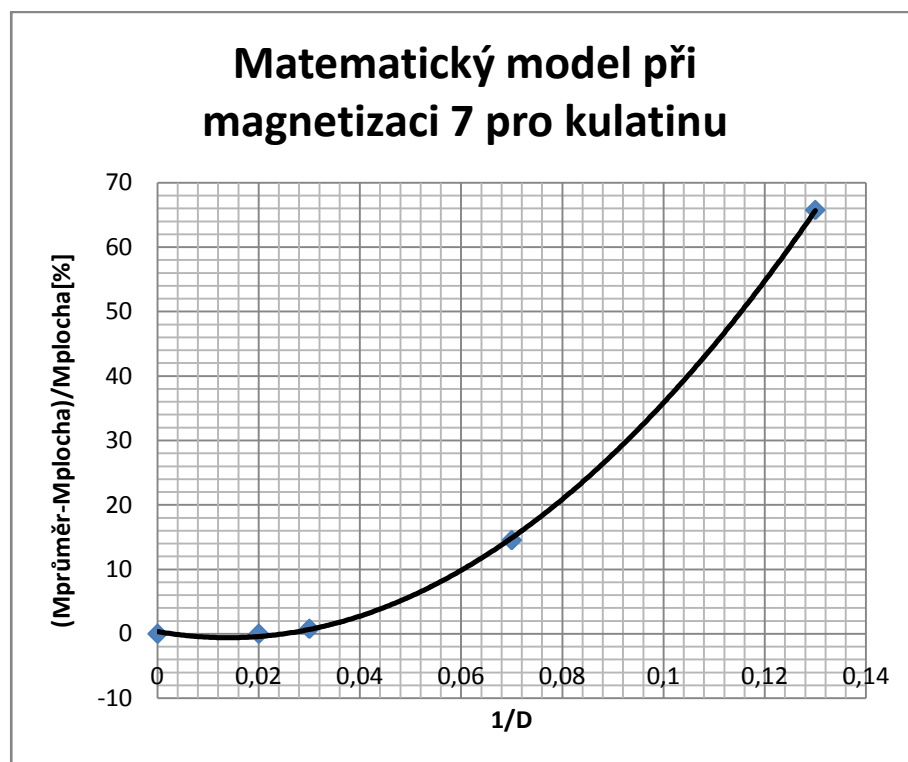
$$M_{plocha} = \frac{M_{průměr}}{\frac{39,153}{D^2} + \frac{1,345}{D} + 1,06396}$$

(3.1)

$$K = 0,965$$

kde: $M_{průměr}$ – hodnota intenzity zbytkového magnetického pole měřená na průměru [A/m], M_{plocha} – hodnota intenzity zbytkového magnetického pole měřená na rovné ploše vzorku, D – průměr měřeného vzorku [mm], K – korelační součinitel (hodnota spolehlivosti)

Matematický model při magnetizaci 7 měřen plochou sondou u kulatiny



Graf 3.5 Matematický model pro kulatinu při magnetizaci 7 měřený plochou sondou.

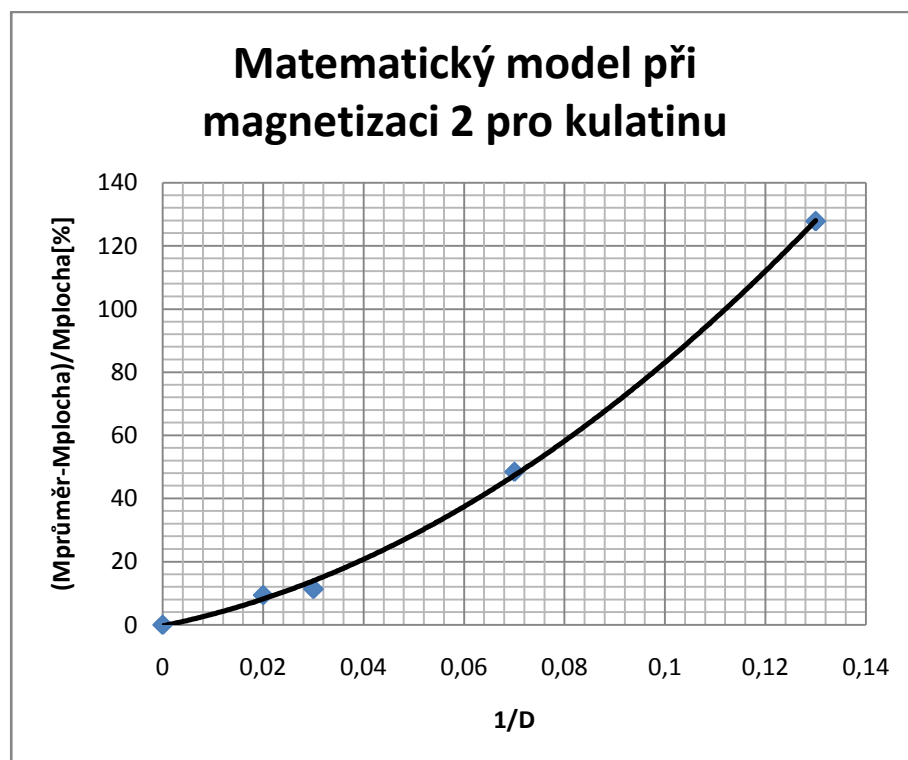
$$M_{plocha} = \frac{M_{průměr}}{\frac{49,203}{D^2} - \frac{1,369}{D} + 1,00324}$$

(3.2)

$$K = 0,998$$

kde: $M_{průměr}$ – hodnota intenzity zbytkového magnetického pole měřená na průměru [A/m], M_{plocha} – hodnota intenzity zbytkového magnetického pole měřená na rovné ploše vzorku, D – průměr měřeného vzorku [mm], K – korelační součinitel (hodnota spolehlivosti)

Matematický model při magnetizaci 2 měřen sondou se snímačem na pružině u kulatiny



Graf 3.6 Matematický model pro kulatinu při magnetizaci 2 měřen sondou se snímačem na pružině.

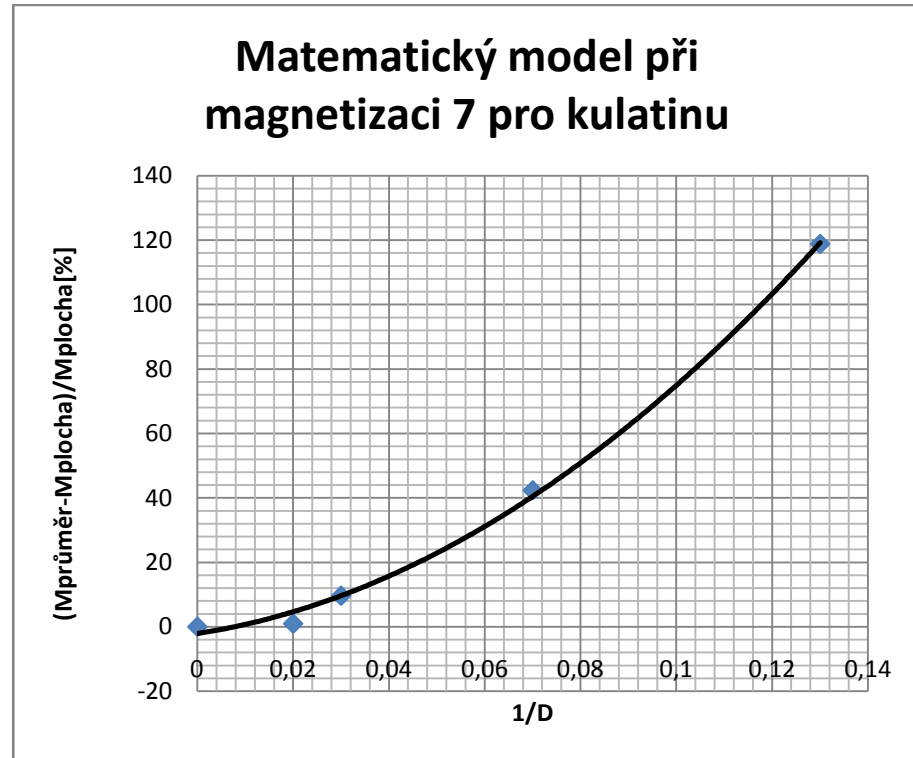
$$M_{plocha} = \frac{M_{průměr}}{\frac{51,162}{D^2} + \frac{3,223}{D} + 0,99650}$$

(3.3)

$$K = 0,998$$

kde: $M_{průměr}$ – hodnota intenzity zbytkového magnetického pole měřená na průměru [A/m], M_{plocha} – hodnota intenzity zbytkového magnetického pole měřená na rovné ploše vzorku, D – průměr měřeného vzorku [mm], K – korelační součinitel (hodnota spolehlivosti)

Matematický průběh při magnetizaci 7 měřen sondou se snímačem na pružině u kulatiny



Graf 3.7 Matematický model pro kulatinu při magnetizaci 7 měřen sondou se snímačem na pružině.

$$M_{plocha} = \frac{M_{průměr}}{\frac{54,174}{D^2} + \frac{2,295}{D} - 0,97825}$$

(3.4)

$$K = 0,997$$

kde: $M_{průměr}$ – hodnota intenzity zbytkového magnetického pole měřená na průměru [A/m], M_{plocha} – hodnota intenzity zbytkového magnetického pole měřená na rovné ploše vzorku, D – průměr měřeného vzorku [mm], K – korelační součinitel (hodnota spolehlivosti)

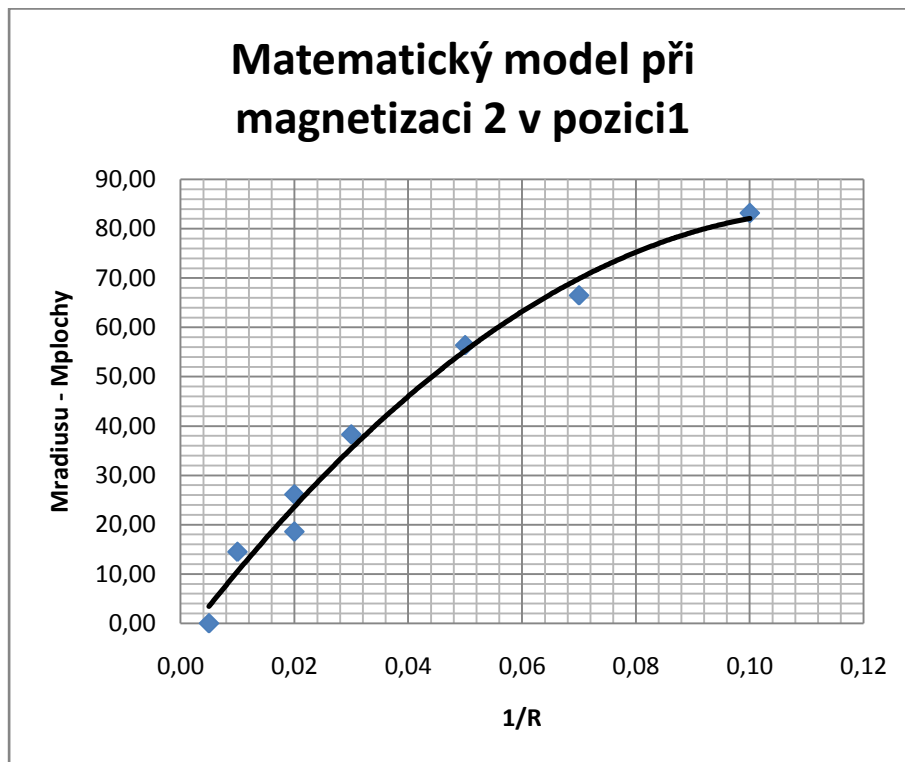
Zhodnocení kapitoly

Matematické modely na kulatině bylo možné provést. Body je možné proložit kvadratickou funkcí. Průběh závislosti rozdílu zbytkového magnetismu na převrácené hodnotě průměru měřených vzorků je parabolický. Ke korekci hodnoty M lze použít regresní matematické modely. Hodnoty korelačního součinitele jsou od 0,96 do 1,00.

3.7 Matematické modely pro měření na ohnutých pleších

V této části práce se budeme zabývat redukčními matematickými modely u vypuklých a vydutých ploch plechů, které byly ohnuty do určitých poloměrů. Tloušťka těchto plechů je 5 mm. Měření probíhalo vždy na třech místech, které byly zobrazené v kapitole (3.2).

Redukční matematický model při magnetizaci 2 měřen plochou sondou v pozici 1



Graf 3.8 Graf matematického modelu pro vydutou plochu při magnetizaci 2 plochou sondou v pozici 1.

$$M_{plocha} = M_{poloměr} - \frac{6470,558}{R^2} + \frac{1507,026}{R} - 3,958$$

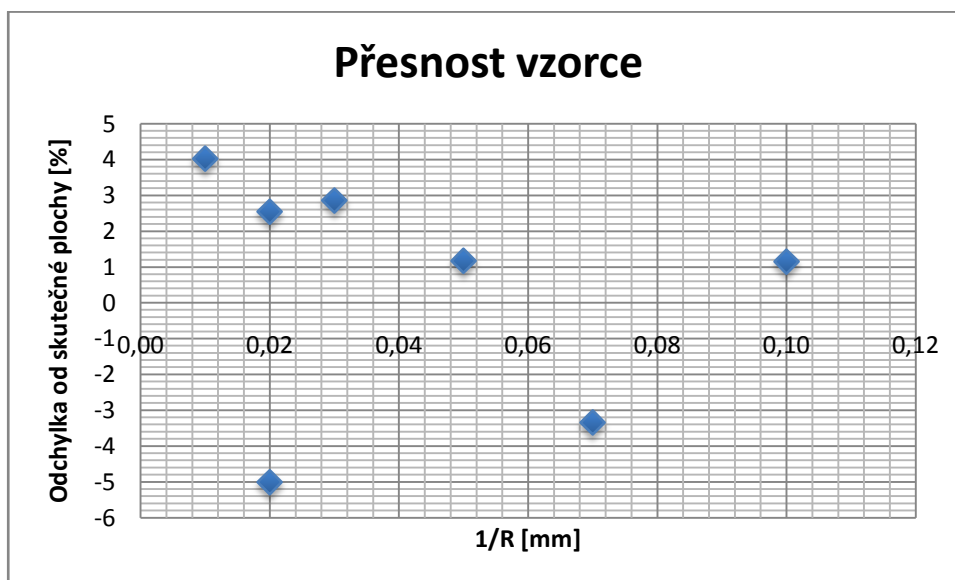
(3.5)

$$K = 0,98$$

Interval použití R od 8,3mm

kde: $M_{\text{poloměr}}$ – hodnota intenzity zbytkového magnetického pole měřená na poloměru [A/m], M_{plocha} – hodnota intenzity zbytkového magnetického pole měřená na rovné ploše vzorku, R – poloměr zaoblení měřeného vzorku [mm], K – korelační součinitel (hodnota spolehlivosti)

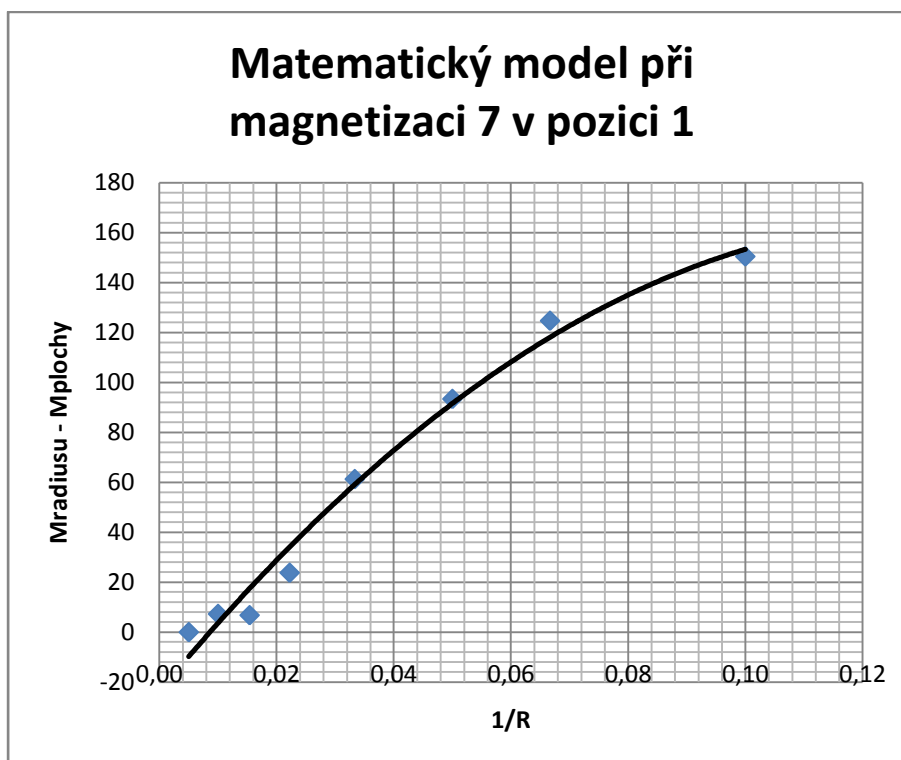
Ze závislosti rozdílu hodnot intenzity zbytkového magnetického pole na rovné ploše a na kulaté ploše při magnetizaci 2, byla získána kvadratická rovnice, která se použije pro přepočet na skutečnou hodnotu intenzity zbytkového magnetického pole. Danou intenzitu lze naměřit pouze na rovné ploše. Graf (3.8.) je proložen kvadratickou funkcí, kde je nutné určit interval, na jakém poloměru R lze tento matematický model použít. Tento interval bude od vrcholu paraboly do 0. Pokud by matematické modely měli mít širší využití, bylo by nutné vynést rozdíl zbytkových magnetismů lomený zbytkovým magnetismem plochy.



Graf 3.8.1 Graf přesnosti vzorce.

Graf 3.8.1 ukazuje odchylku měřené hodnoty na poloměru od změřené hodnoty na rovné ploše. Odchylka se pohybuje do $\pm 5\%$.

Redukční matematický model při magnetizaci 7 měřen plochou sondou v pozici 1



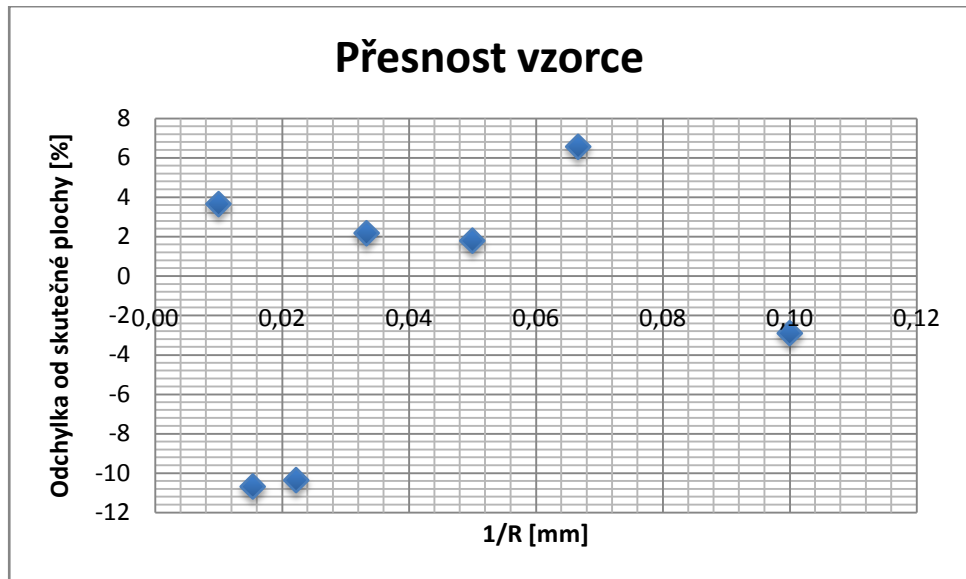
Graf 3.9 Graf matematického modelu pro vydutou plochu při magnetizaci 7 plochou sondou v pozici 1.

$$M_{plocha} = M_{poloměr} - \frac{10712,900}{R^2} + \frac{2841,796}{R} - 23,709 \quad (3.7)$$

$$K = 0,98$$

Interval použití R od 7,7mm

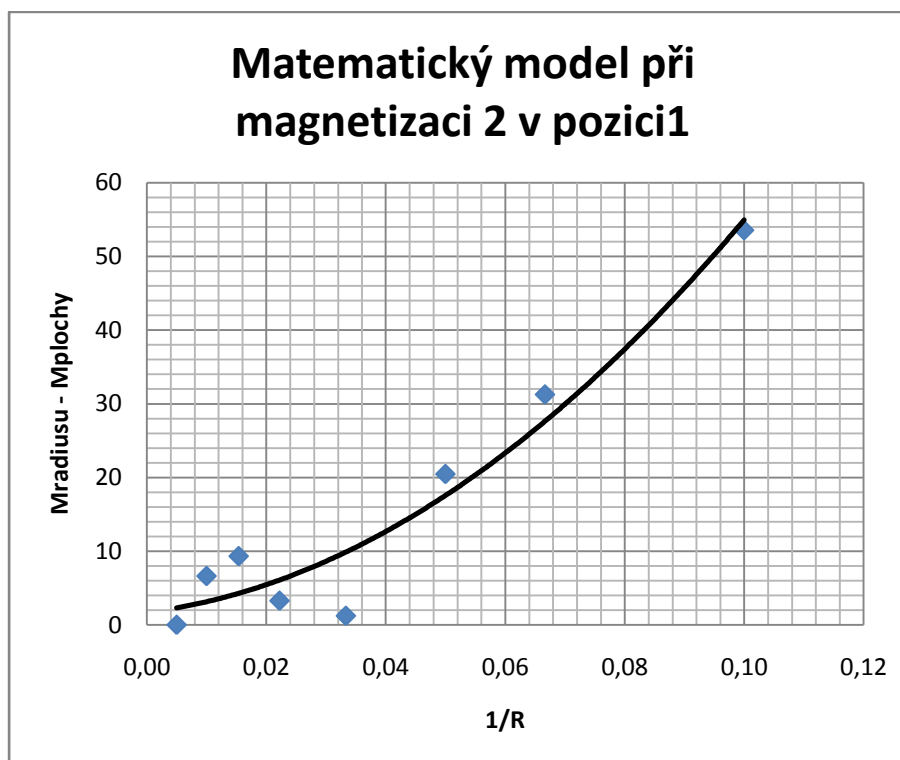
kde: $M_{poloměr}$ – hodnota intenzity zbytkového magnetického pole měřená na poloměru [A/m], M_{plocha} – hodnota intenzity zbytkového magnetického pole měřená na rovné ploše vzorku, R – poloměr zaoblení měřeného vzorku [mm], K – korelační součinitel (hodnota spolehlivosti).



Graf 3.9.1 Graf přesnosti vzorce.

Graf 3.9.1 ukazuje odchylku měřené hodnoty na poloměru od změřené hodnoty na rovné ploše. Odchylka se pohybuje do $\pm 11\%$.

Redukční matematický model při magnetizaci 2 měřen sondou se snímačem na pružině v pozici 1



Graf 3.10 Graf matematického modelu pro vydutou plochu při magnetizaci 2 sondou se snímačem na pružině v pozici 1

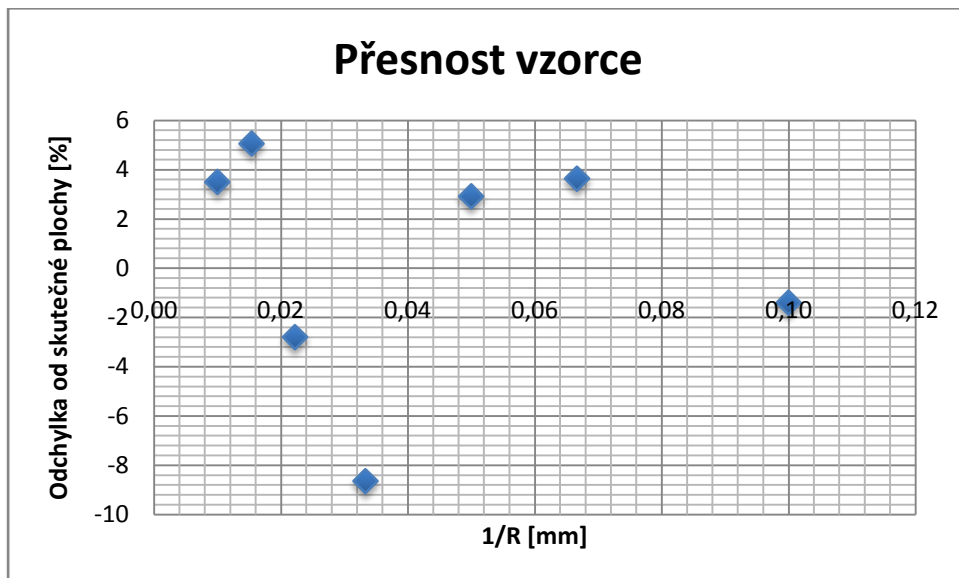
$$M_{plocha} = M_{poloměr} + \frac{4305,988}{R^2} + \frac{102,443}{R} - 1,664$$

(3.8)

$$K = 0,94$$

kde: $M_{poloměr}$ – hodnota intenzity zbytkového magnetického pole měřená na poloměru [A/m], M_{plocha} – hodnota intenzity zbytkového magnetického pole měřená na rovné ploše vzorku, R – poloměr zaoblění měřeného vzorku [mm], K – korelační součinitel (hodnota spolehlivosti).

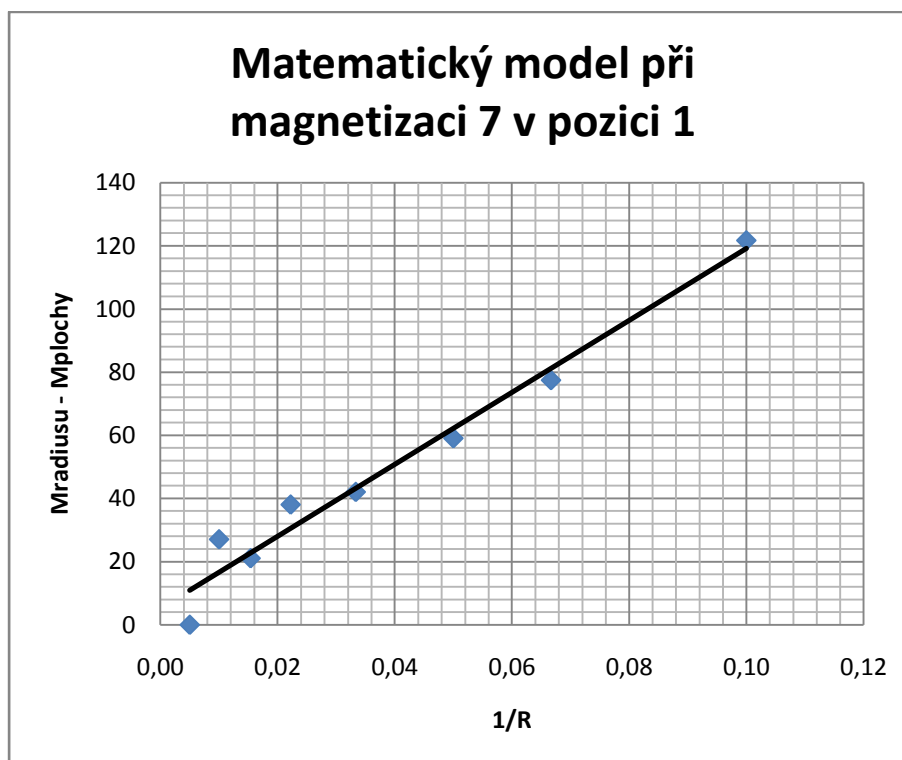
Zde nebude zapotřebí intervalu použití, protože nikdy nebudeme mít záporný poloměr.



Graf 3.10.1 Graf přesnosti vzorce.

Graf 3.10.1 ukazuje odchylku měřené hodnoty na poloměru od změřené hodnoty na rovné ploše. Odchylka se pohybuje do $\pm 9\%$.

Redukční matematický model při magnetizaci 7 měřen sondou se snímačem na pružině v pozici 1



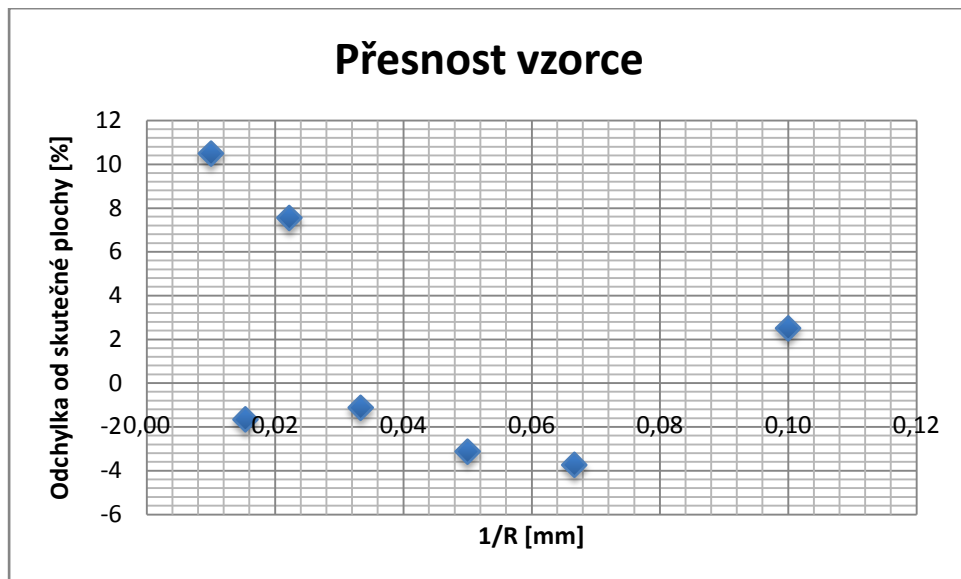
Graf 3.11 Graf matematického modelu pro vydutou plochu při magnetizaci 7 sondou se snímačem na pružině v pozici 1.

$$M_{plocha} = M_{poloměr} + \frac{1140,319}{R} + 5,184$$

(3.9)

$$K = 0,96$$

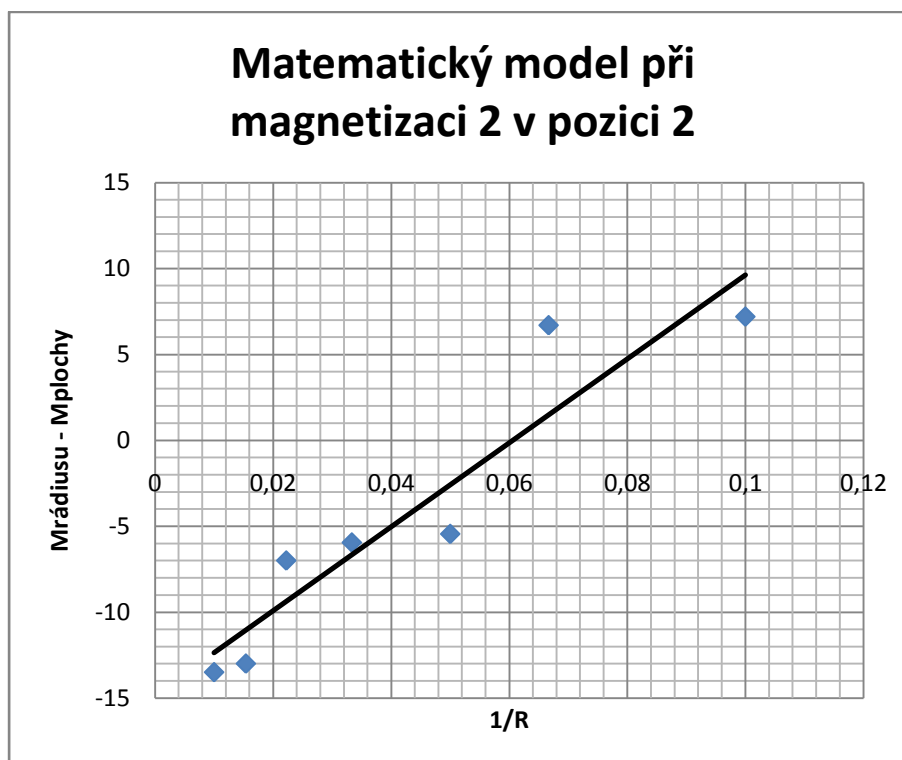
kde: $M_{poloměr}$ – hodnota intenzity zbytkového magnetického pole měřená na poloměru [A/m], M_{plocha} – hodnota intenzity zbytkového magnetického pole měřená na rovné ploše vzorku, R – poloměr zaoblení měřeného vzorku [mm], K – korelační součinitel (hodnota spolehlivosti).



Graf 3.11.1 Graf přesnosti vzorce (3.4).

Graf 3.11.1 ukazuje odchylku měřené hodnoty na poloměru od změřené hodnoty na rovné ploše. Odchylka se pohybuje do $\pm 11\%$.

Redukční matematický model při magnetizaci 2 měřen plochou sondou v pozici 2



Graf 3.12 Graf matematického modelu pro vypuklou plochu při magnetizaci 2 měřen plochou sondou v pozici 2.

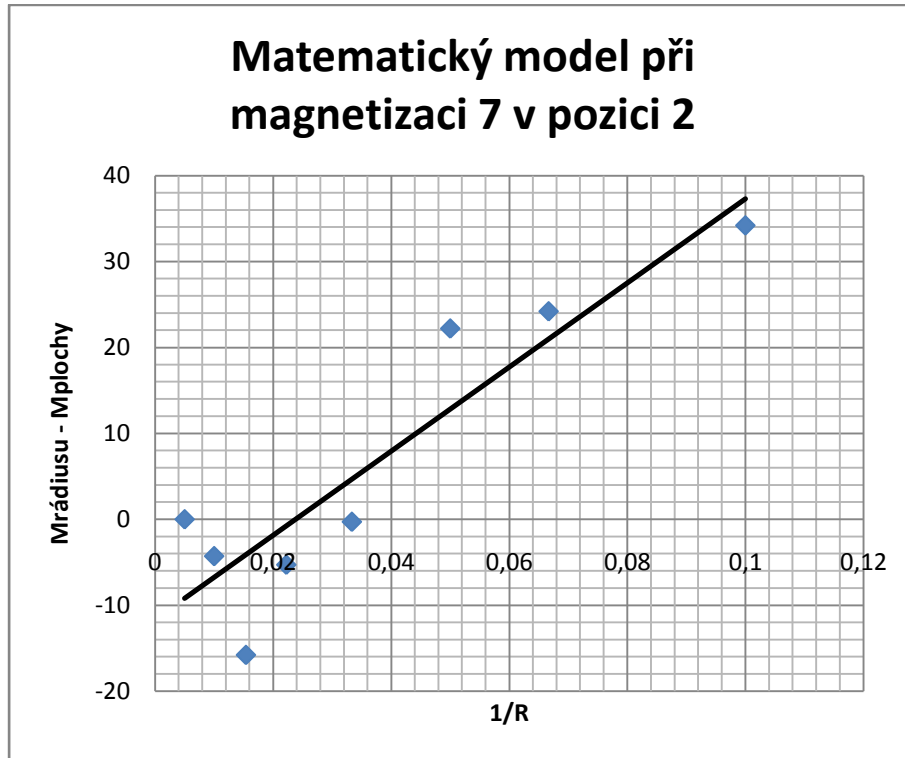
$$M_{plocha} = M_{poloměr} + \frac{244,380}{R} - 14,808$$

(3.10)

$$K = 0,88$$

kde: $M_{poloměr}$ – hodnota intenzity zbytkového magnetického pole měřená na poloměru [A/m], M_{plocha} – hodnota intenzity zbytkového magnetického pole měřená na rovné ploše vzorku, R – poloměr zaoblení měřeného vzorku [mm], K – korelační součinitel (hodnota spolehlivosti).

Redukční matematický model při magnetizaci 7 měřen plochou sondou v pozici 2



Graf 3.13 Graf matematického modelu pro vypuklou plochu při magnetizaci 7 měřen plochou sondou v pozici 2.

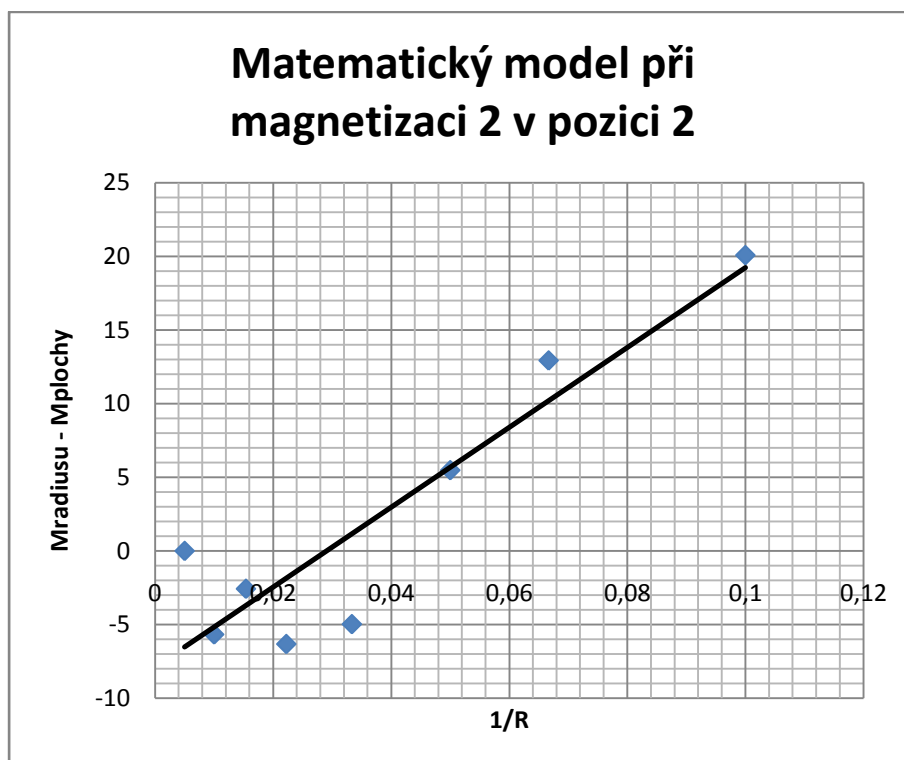
$$M_{plocha} = M_{poloměr} + \frac{489,390}{R} + 11,640$$

(3.11)

$$K = 0,83$$

kde: $M_{poloměr}$ – hodnota intenzity zbytkového magnetického pole měřená na poloměru [A/m], M_{plocha} – hodnota intenzity zbytkového magnetického pole měřená na rovné ploše vzorku, R – poloměr zaoblení měřeného vzorku [mm], K – korelační součinitel (hodnota spolehlivosti).

Redukční matematický model při magnetizaci 2 měřen sondou se snímačem na pružině v pozici 2



Graf 3.14 Graf matematického modelu pro vypuklou plochu při magnetizaci 2 měřen sondou se snímačem na pružině v pozici 2.

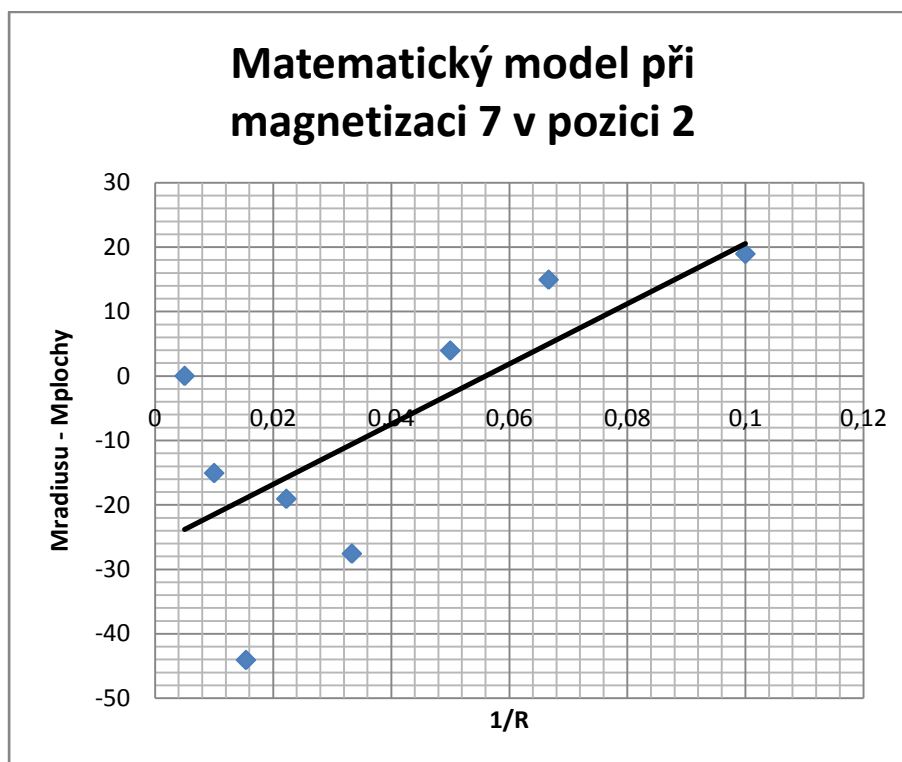
$$M_{plocha} = M_{poloměr} + \frac{271,210}{R} - 7,8886$$

(3.12)

$$K = 0,83$$

kde: $M_{poloměr}$ – hodnota intenzity zbytkového magnetického pole měřená na poloměru [A/m], M_{plocha} – hodnota intenzity zbytkového magnetického pole měřená na rovné ploše vzorku, R – poloměr zaoblení měřeného vzorku [mm], K – korelační součinitel (hodnota spolehlivosti).

Redukční matematický model při magnetizaci 7 měřen sondou se snímačem na pružině v pozici 2



Graf 3.15 Graf matematického modelu pro vypuklou plochu při magnetizaci 7 měřen sondou se snímačem na pružině v pozici 2.

$$M_{plocha} = M_{poloměr} + \frac{466,880}{R} - 26,159$$

(3.13)

$$K = 0,49$$

kde: $M_{poloměr}$ – hodnota intenzity zbytkového magnetického pole měřená na poloměru [A/m], M_{plocha} – hodnota intenzity zbytkového magnetického pole měřená na rovné ploše vzorku, R – poloměr zaoblení měřeného vzorku [mm], K - korelační součinitel (hodnota spolehlivosti).

Zhodnocení kapitoly

Použitelné matematické modely nabízí pouze výsledky měření na vypuklých plochách. U vydutých ploch nelze body proložit přímkou ani křivkou tak, aby korelační součinitel vycházel nad 0.9. Matematické modely pro vyduté plochy jsou nespolehlivé. Na hodnoty M kromě zakřivení plochy patrně působí další vlivy, které bude nutno dále zkoumat.

3.8 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Zkouška se provádí podle normy ČSN 420374 pomocí indentoru čtyřbokého diamantového jehlanu, který má vrcholový úhel 136° . Tento jehlan je vtlačován silou F kolmo do předem připravených metalografických výbrusů. První výbrus je z kulatiny a druhý výbrus je z ohnutého plechu. Po odlehčení se měří mikroskopem obě úhlopříčky. Z tabulek k tomu určených se odečtou hodnoty tvrdosti nebo se použije vzorec.

$$HV = 0,102 \cdot \frac{2 \cdot F \cdot \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} = 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (3.14)$$

kde: F [N] – je zatěžující síla

d [mm] – je aritmetický průměr délek úhlopříček vtisku

Naměřené hodnoty pro vzorek z kulatiny

Tab. 3.33 Hodnoty tvrdosti HV20

1 úhlopříčka	2 úhlopříčka	Průměr
163,0	164,0	163,5
172,0	169,0	170,5
164,0	156,0	160,0
156,0	156,0	156,0
150,0	149,0	149,5
Celková průměrná hodnota		159,9

Z naměřených hodnot vychází průměrná hodnota tvrdosti 159,9 HV20. Měření tvrdosti se provádí na tvrdoměru WP – HV20 (20 udává zatížení v kilogramech).

Naměřené hodnoty pro vzorek z ohnutého plechu

Tab. 3.33 Hodnoty tvrdosti HV20

1 úhlopříčka	2 úhlopříčka	Průměr
144,6	144,9	144,8
143,8	141,5	144,7
143,8	146,8	144,3
137,5	145,6	144,6
144,2	141,3	144,8
Celková průměrná hodnota		143,4

Z naměřených hodnot vychází průměrná hodnota tvrdosti 143,4 HV20. Měření tvrdosti se provádí na tvrdoměru WP – HV20 (20 udává zatížení v Kilogramech).

3.9 Metalografický výbrus obou vzorků

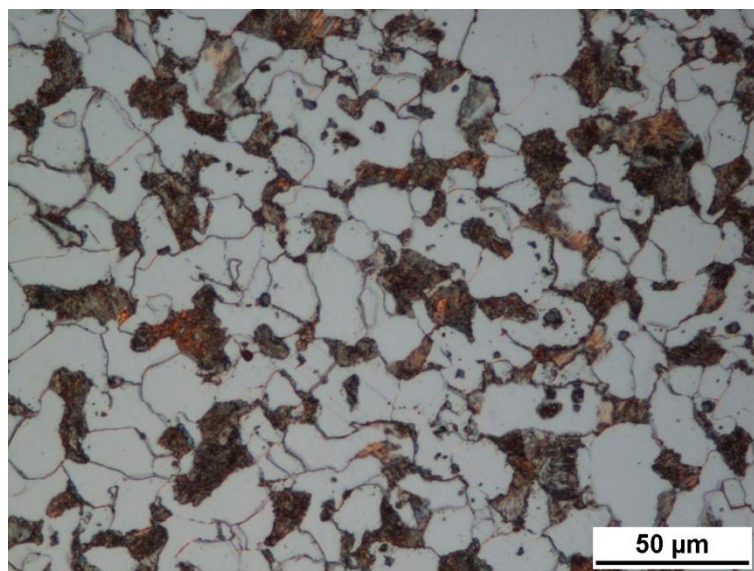
Použité přístroje a pomůcky

Pro přípravu metalografického vzorku byla použita rozbrušovací pila DELTA Abrasimet Cutter, elektro-hydraulický lis SIMPLIMET 100 pro zalisování vzorku do dentakrylu, Metalografické brusky Buehler Alpha, leštičku MHT a fén. Dále bylo použito leptadlo (2% Nital), pinzeta, tampónky, denaturovaný líh. Pro sledování struktury byl použit optický mikroskop. Vzorky byly sledovány optickým mikroskopem EIPHOT 200 (NIKON) a nasnímané struktury vyhodnoceny pomocí softwaru NIS-Elements AR 3.1

Postup metalografického výbrusu

- Zvolí se vhodný řez. Pomocí pily se uřízne vzorek. Je nutné vydatné chlazení, aby nedošlo k ovlivnění struktury teplem.
- Uříznutý vzorek se vloží do lisu, zasype dentakrylem a nechá vytvrdit.
- Vzorek se následně brousí na sadě metalografických papíru do té doby, než jsou všechny rýhy v jednom směru, poté se vzorek pootočí o 90° a brousí se na dalším papíru o nižší hrubosti. Hrubost byla (od 80 do 2000).
- Alkoholem se vzorek odmastí (netvoří skvrny).
- Vzorek se leští se na filcu s pastou, dokud není povrch vzorku zrcadlově lesklý. Nakonec se povrch opláchne alkoholem.
- Zkoumá se struktura na mikroskopu.

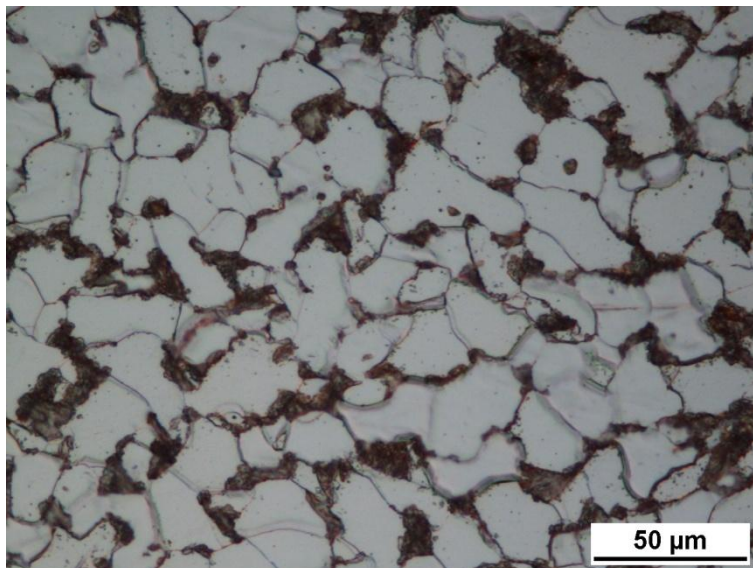
Výsledek metalografického výbrusu pro kulatinu ocel ČSN 12 060.1



Obr. 3.1 Vzorek kulatiny

Ocel 12 060 je podeutektoidní ocel s obsahem uhlíku přibližně 0,55%. Na pozorované struktuře v základním stavu je vidět, že je více oblasti feritu (bílé části) než lamelárního perlitu (tmavé části). Struktura vykazuje symetrická zrna feritickoperlitická. Dle ČSN odpovídá materiál stavu po normalizačním žíhání a tvrdosti oceli 160HV a pevnosti $R_m = 555\text{MPa}$.

Výsledek metalografického výbrusu pro ohnutý plech ocel ČSN 11 500.1



Obr. 3.2 Vzorek ohnutého plechu

Ocel 11 500.1 je podeduktoidní ocel s obsahem uhlíku přibližně 0,38%. Na pozorované struktuře v základním stavu je vidět, že je mnohem více oblasti feritu (bílé části) než lamelárního perlitu (tmavé části). Struktura vykazuje symetrická zrna feritickoperlitická. Dle ČSN odpovídá materiál stavu po normalizačním žíhání s tvrdostí oceli 145HV a pevností $R_m = 470\text{MPa}$.

4 Diskuze k výsledkům

Měření a zpracování hodnot ve formě grafů a matematických modelů dospělo k následujícím poznatkům:

- Sonda se snímačem na pružině má rovné čelo na vysunutém snímači – měla umožnit kontakt s kovem i na velmi malých vydutých poloměrech. Ovšem z naměřených hodnot plyne, že od vydutého poloměru R10 do R30 se hodnoty zbytkového magnetismu blíží hodnotám naměřených sondou s rovnou plochou.
- Při porovnání sond a nastavení přístroje DOMENA na magnetizaci 7 bylo zjištěno, že hodnoty intenzity zbytkového magnetismu u plechů v pozici 1 měřené plochou sondou je patrná těsná závislost intenzity zbytkového magnetismu na poloměru ohnutí. Na rozdíl od měření sondou se snímačem na pružině, kde jsou výrazné odchylky od matematického modelu. (Graf 3.2).
- Při měření v pozici 2 jsou odchylky více patrné než v pozici 1.

Hlavním výstupem této práce jsou především matematické modely pro přepočítání intenzity zbytkového magnetismu. Tyto modely jsou v kapitole (3.5) a (3.7):

- Matematické modely pro měření na plných válcových vzorcích byly proloženy parabolou s velmi těsnou korekcí.
- V práci získané matematické modely slouží k dosazení do vzorce 2.16. Vzorce typu 2.16 pro měření mechanických vlastností byly získány z měření na rovných vzorcích v předešlých pracích.
- Matematické modely pro měření na vypuklých plochách (typu ohybů plechových výrobků) bylo možno proložit s dostatečnou spolehlivostí parabolou.

- Měření zbytkového magnetismu pro účely nedestruktivní strukturoskopie na vydutých plochách nelze matematickým modelem korigovat na rovnou plochu. Strukturoskopické úlohy nutno zadávat na vzorcích s konstantním vydutím (vnitřním radiusem). Sonda dle UV koriguje měřené hodnoty vydutí jen do R30. Na zakřivenějších plochách je u ní patrný výrazný pokles hodnot M.
- Z matematických modelů, u kterých bylo provedeno zpětné dosazení, byla stanovena odchylka oproti zbytkovému magnetismu na rovné ploše. Bylo provedeno u matematických modelů, kde vycházel nejvyšší korelační součinitel, jsou to matematické modely 3.5, 3.7, 3.8.
- Univerzálnější použití (na různé jakosti feromagnetických ocelí a litin) najdou spolehlivé korekční vztahy 3.2, 3.3, 3.4.
- U matematického modelu 3.5 vyšla nejmenší odchylka ze všech matematických modelů (do $\pm 5\%$).
- U matematických modelů z měření na vyduté ploše jsou naměřené hodnoty výrazně odskakující od předpokládaného průběhu, lze je proložit křivkou, ale korelační součinitel je nízký a jsou nespolehlivé.
- K přesnějšímu měření na vypuklých a vydutých plochách by bylo dobré vyrobit sondu, která by lépe kopírovala vydutou nebo vypuklou plochu. Bylo by možné dostat přesnější hodnoty.
- Dalším výstupem této práce bylo ověřit materiál, což jsme provedli naměřením tvrdosti a metalografickým výbrusem. Zjistilo se, že kulatina je z materiálu ČSN 12060.1 a plech z ČSN 11500.1, což potvrdilo prvotní předpoklady.

5 Závěr

Bakalářská práce přispěla k rozšíření akčního rádiusu snadné, rychlé, levné a mobilní strukturoskopické metody magnetické skvrny na konstrukcích z ocelí a litin.

Seznamuje s principy magnetických metod testování struktury ocelí a litin. Práce se zaměřuje především na metodu magnetické skvrny. Rozbor naměřených výsledků je proveden formou tabulek a grafů. Hlavním cílem této práce bylo vytvoření matematických modelů na korekci intenzity zbytkového magnetického pole měřeného metodou magnetické skvrny dle průměru plných válců a poloměru vypuklých ploch tenkých stěn výrobků. Tyto modely usnadní měření mechanických vlastností metodou magnetické skvrny na nerovinných plochách za využití výsledků úloh vypracovaných na rovinných vzorcích. Měření mechanických vlastností na vydutých plochách přineslo nejméně přesné výsledky. Doporučuji provést další experimenty na vydutých plochách i z jiných feromagnetik s vhodnějšími tvary sond. Sondu dle UV (s výsuvným Hallovým snímačem) lze aplikovat až od poloměru $R = 30\text{mm}$ vyduté plochy. Veškeré body zadání bakalářské práce byly splněny.

6 Seznam použité literatury

[1] Dočekal, J.: Elektromagnetická strukturoskopie grafitických litin a podobně disperzních kovových materiálů, Disertační práce, TU Liberec 2008

[2] Kniř, J.: Nedestruktivní metody kontroly vybraných dílů letadla, Bakalářská práce, VUT Brno 2010

[3] Míšek B., Ptáček L.: Zkoušení materiálů a výrobků bez porušení, Druhé, rozšířené vydání, Praha 1973

[4] Skrbek B.: Metoda magnetické skvrny, Profesorské teze, Liberec 2008

[5] Zlatuška B.: Mikromagnetická strukturoskopie výfukových ventilů, Bakalářská práce, TU Liberec 2010

[6] http://ndt.cz/prilohy/34/snimace_ec.pdf [online] ke dni 8.4.2015

[7] Skrbek B.: Snímač pro nedestruktivní strukturoskopii, Užité vzor 22605, Praha 2011