

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta



Magnetická metoda prášková

Bakalářská práce

Vedoucí práce: doc. Ing. Martin Pexa, Ph.D.

Autor: David Gärtner

© PRAHA 2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

David Gärtner

Technika a technologie v dopravě a spojích
Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

Magnetická metoda prášková

Název anglicky

Magnetic particle inspection

Cíle práce

Cílem práce je popsat základní princip magnetické metody založený na moderních příspěvcích uvedených v současné literatuře. Základem bude analýza způsobů magnetizace, popis průběhu vyhodnocení a na závěr bude realizovaná praktická ukázka a porovnání s dalšími metodami NDT.

Metodika

- 1) Úvod
- 2) Cíl a metodika práce
- 3) Předpisy a fyzikální podstata metody (předpisy, magnetická indukce atd.)
- 4) Princip metody (magnetizační prášek, způsob magnetizace, demagnetizace atd.)
- 5) Praktická ukázka (praktická ukázka a porovnání s dalšími metodami NDT)
- 6) Závěr

Doporučený rozsah práce

30-40

Klíčová slova

defektoskopie, magnetizace, demagnetizace

Doporučené zdroje informací

ČESKÁ SPOLEČNOST PRO NEDESTRUKTIVNÍ TESTOVÁNÍ, – KOPEC, B. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí : (nauka o materiálu IV)*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-7204-591-4.

DUBENSKÝ, Rudolf; MINAŘÍK, Václav; ČERMÁK, František. *Defektoskopie – nedestruktivní zkoušení*. Praha – ČVUT 1992. 206s. Fakulta strojní. ISBN 80-01-00844-4

Předpisy, normy a periodika.

RESNICK, R. – DUB, P. – WALKER, J. – HALLIDAY, D. – OBDRŽÁLEK, J. – ŠTRUNC, M. *Fyzika : vysokoškolská učebnice obecné fyziky. Část 3, Elektřina a magnetismus*. V Brně: Vutium, 2000. ISBN 80-214-1868-0.

Ullmann, Jiří. *Nedestruktivní zkoušení materiálů. Magnetická metoda prášková: Materiál, vady, předpisy*. PTS Josef Solnař, 2001

Předběžný termín obhajoby

2019/2020 LS – TF

Vedoucí práce

doc. Ing. Martin Pexa, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra jakosti a spolehlivosti strojů

Elektronicky schváleno dne 18. 12. 2018

doc. Ing. Martin Pexa, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 15. 2. 2019

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 17. 04. 2020

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou/bakalářskou práci na téma: **Magnetická metoda prášková** vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

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

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

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

V Praze dne 9.4.2020

Podpis.....

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu práce doc. Ing. Martinu Pexovi, Ph.D. za jeho podnětné rady, trpělivost a čas, který mi věnoval při vypracovávání práce. Dále bych tímto chtěl poděkovat Ing. Janu Opletalovi za vstřícnost, ochotu a pomoc při získání potřebných informací. V neposlední řadě také děkuji mé rodině za podporu při zpracování mé práce.

Magnetická metoda prášková

Abstrakt: Tato bakalářská práce se zabývá magnetickou práškovou metodou. Cílem bylo popsat její základní principy, metody a také praktickou ukázkou testování součásti pomocí této nedestruktivní zkoušky materiálů. V první části práce je nastíněn souhrn fyzikálních základů a uvedení základních norem. V další části práce je formulován princip metody a druhy magnetování. Na závěr je uveden konkrétní příklad využití metody a celkové porovnání s ostatními metodami NTD.

Klíčová slova: Magnetické pole, feromagnetické látky, magnetizace, demagnetizace, magnetizační prášek

Magnetic particle inspection

Abstract: This bachelor thesis deals with the magnetic powder method. The aim was to describe its basic principles, methods, as well as a practical demonstration of component testing using this non-destructive testing of materials. The first part of the work outlines a summary of the physical bases and the introduction of basic standards. In another part of the work, the principle of method and types of magnetizing are formulated. Finally, a specific example of the use of the method and an overall comparison with other NTD methods is given.

Keywords: Magnetic field, ferromagnetic substances, magnetization, demagnetization, magnetising powder

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Cíl práce a metodika	2
2.1	Cíl práce	2
2.2	Metodika práce	2
3	Předpisy a fyzikální podstata metody	3
3.1	Předpisy	3
3.2	Fyzikální podstata metody	3
3.3	Magnetické pole.....	3
3.3.1	Intenzita magnetického pole.....	4
3.3.2	Magnetická indukce.....	6
3.3.3	Magnetický indukční tok.....	7
3.3.4	Permeabilita prostředí.....	7
3.4	Magnetické vlastnosti látek.....	8
4	Princip metody.....	12
4.1	Způsoby magnetizace	12
4.1.1	Pólová (podélná) magnetizace.....	14
4.1.2	Církulární (příčná) magnetizace	16
4.1.3	Kombinovaná magnetizace	18
4.2	Druhy magnetizačního proudu.....	19
4.2.1	Střídavý proud	19
4.2.2	Stejnoseměrný proud.....	19
4.2.3	Usměrněné proudy.....	20
4.3	Demagnetizace.....	20
4.4	Detekční prostředky	22
4.5	Magnetovací zařízení.....	24
5	Praktická ukázka.....	27
5.1	Testování ohýbané trubky pomocí barevného detekčního prášku.....	30
5.2	Porovnání s dalšími metodami NTD	33
6	Závěr.....	34
7	Seznam použitých zdrojů.....	35
8	Seznam obrázků	39

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Název	Jednotka
H	Intenzita magnetického pole	Ampér na metr [$A \cdot m^{-1}$]
I	Elektrický proud	Ampér [A]
l	Délka vodiče	Metr [m]
r	Vzdálenost indukční čáry od středu vodiče	Metr [m]
B	Magnetická indukce	Tesla [T]
μ	Permeabilita prostředí	Henry na metr [$H \cdot m^{-1}$]
μ_r	Poměrná (relativní) permeabilita	-
μ_0	Permeabilita vakua	Henry na metr [$H \cdot m^{-1}$]
d	Vzdálenost magnetické indukce od vodiče	Metr [m]
r_s	Poloměr kruhové smyčky	Metr [m]
l_c	Délka cívky	Metr [m]
N	Počet závitů cívky	-
ϕ	Indukční tok	Webr [W_b]

S	Plocha průřezu	Metr [m^2]
κ	Magnetická vodivost	Henry [H]
B_r	Remanentní indukce	Tesla [T]
B_s	Indukce nasycení	Tesla [T]
H_c	Koercitivní intenzita	Ampér na metr [$A \cdot m^{-1}$]
β	Intenzita fluorescence	Candely / Watt [cd / W]

1 Úvod

V dnešní době jsou kladeny stále vyšší požadavky na kontrolu, jakost materiálů, strojů a konstrukcí. Nedestruktivní zkoušení materiálů známé pod zkratkou NDT (non-destructive testing) je nedílnou součástí kontroly těchto požadavků. K běžnému pojmenování tohoto zkoušení se také používá termín nedestruktivní defektoskopie. Jde o druh zkoušek materiálů, dílů a konstrukcí způsobem, který je trvale nepoškodí a neznehodnotí. Mezi takové zkoušky patří šest základních NDT postupů – vizuální kontrola, metoda vířivých proudů, kapilární metoda, ultrazvuková metoda, radiografická metoda a magnetická metoda prášková.

Účelem zkoušek je najít povrchovou či objemovou vadu prostřednictvím jedné z řady nedestruktivních metod, respektive je účelné potvrdit, že se v materiálu žádná vada nevyskytuje. Kontrola se provádí ve firmách, které svádí boj o zákazníky, firmám tedy záleží na spolehlivosti tudíž i na dlouhodobé spokojenosti zákazníků. Při výrobě strojů a zpracování materiálů se mohou vyskytnout různé vady, které ohrožují bezpečnost konstrukcí a provozu strojů, proto se pomocí nedestruktivní defektoskopie tyto vady vyhledávají.

Při použití nedestruktivního zkoušení materiálů nedojde k poškození zkoušených zařízení či výrobků. To znamená, že při této kontrole se nemusí zkoušený materiál nebo výrobek porušit, například není potřeba výrobek demontovat, aby se zjistilo zda není uvnitř zkorodovaný. Proto jde o cennou techniku, která šetří čas i peníze při hodnocení výrobku.

Metody NDT jsou založené na různých fyzikálních principech a využívají specifické vlastnosti materiálů, proto má každá z nich hranice svého použití a neexistuje metoda, která by zjistila všechny druhy vad. Je vhodné volit kombinaci jednotlivých metod a to vyžaduje rozumět podstatě zkoušky a možnosti jejího využití, ale i podstatě výrobní technologie zkoušených výrobků.

V dnešním průmyslu silně převažuje trend zvaný automatizace, tedy schopnost výrobního zařízení autonomně bez lidské obsluhy provádět výrobní cyklus. Ani odvětví defektoskopie neuniklo tomuto trendu, a to s několika výhodami. Testování je levnější, rychlejší a lze přesněji kontrolovat technologický postup zkoušení a jeho parametry.

Tato bakalářská práce se zaměřuje na magnetickou metodu práškovou. Touto metodou lze odhalit i ty nejjemnější trhliny, póry, vměstky na zkoušeném povrchu a v omezené míře i pod ním. Vady, které je metoda schopna detekovat začínají při šířce tisícín milimetru, pro jiný než feromagnetický materiál, tedy ten jež reaguje na magnet nelze tuto metodu aplikovat.

Základní myšlenka této zkoušky je založena na odhalení rozptylového toku, který se vytvoří díky magnetickému poli vyčnívajícímu nad povrch zkoušeného materiálu v místě necelistvosti. Při zkoušce je materiál zmagnetován, následně vzniklý rozptylový tok přitahuje detekční prášek v podobě jemných feromagnetických zrněk, které odhalí případné vady. Testovat lze materiály a konstrukce pokovené, s tenkou vrstvou barvy i materiály lakované. Pro její jednoduchost je magnetická metoda prášková využívána v kovárnách, slévárnách, strojírenské výrobě při kontrole výkovků, svařenců, odlitků, tyčového materiálu, trubek a svarů.

2 Cíl práce a metodika

2.1 Cíl práce

Hlavním cílem práce je popsat základní princip magnetické metody práškové, toho bude dosaženo pomocí následujících dílčích cílů:

- popsání základních fyzikálních pravidel a zásad magnetické metody,
- popsání způsobů magnetizace,
- uvedení praktického příkladu a popsání potřebných prostředků k vykonání zkoušky,
- porovnání magnetické metody práškové s ostatními.

2.2 Metodika práce

Metodika bakalářské práce popisuje postup, jakým způsobem bylo dosaženo stanovených dílčích cílů:

- fyzikální pravidla a zásady magnetické metody práškové jsou popsány na základě literárního rozboru,
- způsob magnetování je taktéž popsán na základě literárního rozboru,
- praktická ukázka je realizovaná na příkladu ohýbané trubky, kde je kontrolována konkrétně ohýbaná část a její okolí. Zmagnetování součásti bylo dosaženo pomocí magnetizačního jha a k detekci byla použita suspenze barevného prášku ve spreji, po zkoušce byl zpracován protokol, který zaznamenává a popisuje celou zkoušku.
- porovnání magnetické metody práškové s ostatními je realizované jednotlivě a shrnuté v závěrečné celkové tabulce, kde jsou uvedeny její kladné a záporné stránky.

3 Předpisy a fyzikální podstata metody

3.1 Předpisy

Obecné zásady zkoušení magnetickou práškovou metodou jsou definovány normou ČSN EN ISO 9934-1 Nedestruktivní zkoušení – Zkoušení magnetickou práškovou metodou – Část 1: Obecné zásady.

Všechny výrobní normy požadují pro magnetické zkoušení pracovníky kvalifikované dle EN ISO 9712 Nedestruktivní zkoušení – Kvalifikace a certifikace pracovníků NDT. [1]

3.2 Fyzikální podstata metody

Metoda rozptylových toků také často označovaná Magnetická metoda prášková (z angl. Magnetic Particle Inspection – MPI) je principiálně velmi jednoduchá metoda. Prášková metoda je založena na zviditelnění rozptylových magnetických polí nad vadami s pomocí feromagnetických částic. [2], [3]

Z důvodu dostatečné indikace vady, je vhodné, aby trhlina byla orientována do kolmého směru vůči směru magnetování a magnetické pole musí mít dostatečnou intenzitu. Poté vznikne magnetický rozptylový tok nad vadou.[2]

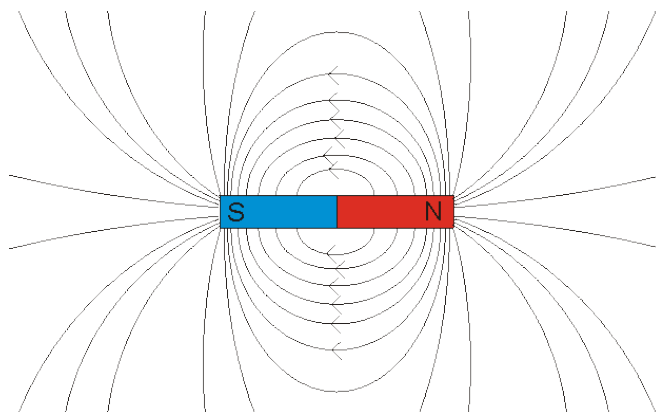
Magnetická metoda prášková je elektromagnetická zkouška pro níž jsou důležité následující pojmy. [3]

- magnetické pole,
- intenzita magnetického pole,
- magnetická indukce,
- magnetický indukční tok,
- permeabilita prostředí,
- magnetické vlastnosti látek.

3.3 Magnetické pole

Nachází se v běžném životě například tehdy, když papírky se vzkazy přidrží malé magnety na dveřích ledničky. Častý typ magnetu je tvořen cívkou navinutou z drátu kolem ocelového jádra, kterou prochází elektrický proud, tzv. elektromagnet. Čím větší proud, tím silnější je magnetické pole. V každodenním životě jsou běžnější permanentní magnety – magnety stejného typu jako na dveřích ledničky. Ty vytvářejí magnetické pole, aniž k tomu potřebují dodávat elektrický proud. Velikost a směr magnetického pole jsou představeny na základě silokřivek. Nejsilnější magnetické pole je v těch místech, kde jsou silokřivky nejvíce zahuštěny. Vzájemně se silokřivky nikde neprotínají. Např. u permanentních magnetů vystupují ze

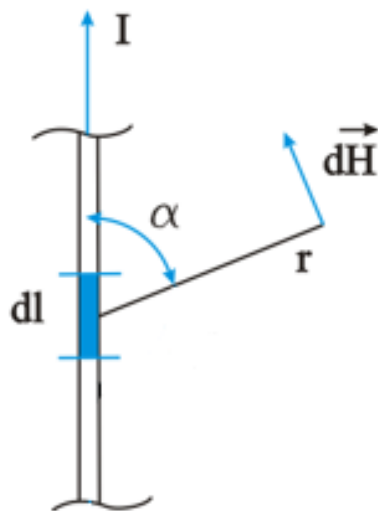
severního pólu, rozprostírají se ve vnějším prostoru kolem magnetu, vstupují do jižního pólu a uzavírají se vnitřní částí materiálu magnetu (obr. 1). [2], [4], [5]



Obr. 1 Magnetické pole [6]

3.3.1 Intenzita magnetického pole

Míru silového působení magnetického pole na myšlený kousek železa popisuje veličina intenzita magnetického pole H (obr. 2). Na základě Biot-Savartova zákona lze určit výslednou intenzitu \vec{H} magnetického pole vodiče libovolného tvaru tak, že jsou vektorově sečteny intenzity $d\vec{H}$ ode všech úseků $d\vec{l}$ vodiče. Platí vztah (3.1). [3], [4]



Obr. 2 Biot-Savartův zákon [7]

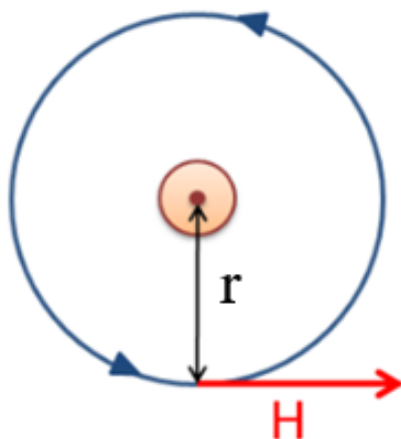
$$dH = \frac{I \cdot dl}{4\pi \cdot r^2} \cdot \sin \alpha \quad (3.2)$$

Přičemž I je elektrický proud [A], dl označuje délku vodiče [m], r je vzdálenost indukční čáry od středu vodiče [m] a úhel α , který je orientovaný směrem průtoku proudu. [7]

Jednotka intenzity magnetického pole H je ampér na metr [$A \cdot m^{-1}$]. Siločáry magnetického pole kolem přímého vodiče mají tvar kružnice, takže délka siločáry ve vzdálenosti r od vodiče je $l = 2 \cdot \pi \cdot r$. Pro který platí vztah (3.3). [3], [4]

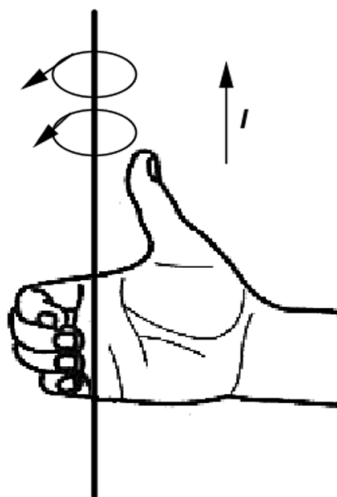
$$H = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad (3.4)$$

Kde I je elektrický proud [A], r je vzdálenost indukční čáry od středu vodiče [m] [3]



Obr. 3 Intenzita magnetické pole v okolí přímého dlouhého vodiče [4]

Čím je siločára delší, tím menší bude intenzita a také menší silové působení. [4]



Obr. 4 Pravidlo pravé ruky [8]

Orientace indukčních čar závisí na směru proudu a k jejímu určení je použito Ampérovo pravidlo pravé ruky: Naznačíme uchopení vodiče do pravé ruky tak, aby palec ukazoval dohodnutý směr proudu ve vodiči, prsty pak ukazují orientaci magnetických indukčních čar (obr 4). [8]

3.3.2 Magnetická indukce

Jednotkou magnetické indukce je:

$$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1} [\text{kilogram na sekundu na Ampér}] = W_b \cdot m^{-2} [\text{Weber na čtverečný metr}] = T [\text{Tesla}] [3]$$

Míru silových účinků magnetického pole v různých prostředích popisuje magnetická Indukce B . Magnetická indukce je opět vektor a má stejný směr i orientaci jako intenzita magnetického pole. Magnetickou indukci je možné také chápat jako hustotu siločar magnetického pole v ploše kolmé na siločáry v daném prostředí. Vztah (3.3). [4]

$$B = \mu \cdot H \quad (3.3)$$

kde H je intenzita magnetického pole [$A \cdot m^{-1}$], μ [$H \cdot m^{-1}$] (Henry na metr) se rovná $= \mu_r \cdot \mu_0$ (μ_r je poměrná permeabilita prostředí, μ_0 je permeabilita vakua) [2]

Magnetická indukce B přímého vodiče protékaného proudem I má ve vzdálenosti d od vodiče velikost, vztah (3.4). [2]

$$B = \mu_0 \mu_r \cdot I / (2\pi d) \quad (3.4)$$

kde μ [$H \cdot m^{-1}$] (Henry na metr) se rovná $= \mu_r \cdot \mu_0$ (μ_r je poměrná permeabilita prostředí, μ_0 je permeabilita vakua), I je protékaný proud, $I = I A$ [Ampér], d je vzdálenost magnetické indukce B od vodiče [1], [3]

Magnetická indukce B ve středu kruhové smyčky o poloměru r_s , která je protékaná proudem I , má velikost danou vztahem (3.5). [2]

$$B = \mu_0 \mu_r \cdot I / (2r_s) \quad (3.5)$$

Kde permeabilita μ [$H \cdot m^{-1}$] (Henry na metr) se rovná $= \mu_r \cdot \mu_0$ (μ_r je poměrná permeabilita prostředí, μ_0 je permeabilita vakua), I je protékaný proud, $I = I A$ [Ampér], d je vzdálenost magnetické indukce B od vodiče, r_s je poloměr kruhové smyčky [2], [3]

Magnetická indukce B válcové cívky o délce l_c a počtu závitů N , která je protékaná proudem I má velikost danou vztahem (3.6). [1]

$$B = \mu_0 \mu_r \cdot N \cdot I / l_c \quad (3.6)$$

Válcová cívka o délce l_c a počtu závitů N , permeabilita μ [$H \cdot m^{-1}$] (Henry na metr) se rovná $= \mu_r \cdot \mu_0$ (μ_r je poměrná permeabilita prostředí, μ_0 je permeabilita vakua), $I = I A$ [Ampér] [1], [3]

3.3.3 Magnetický indukční tok

Magnetické napětí tvořené průchodem proudu vodičem vybudí v okolním prostředí magnetický tok ve formě siločar. Celkové množství siločar procházejících danou plochou kolmou na siločáry (neboli magnetický tok touto plochou) je určeno z hustoty siločar, neboli z magnetické indukce. [4]

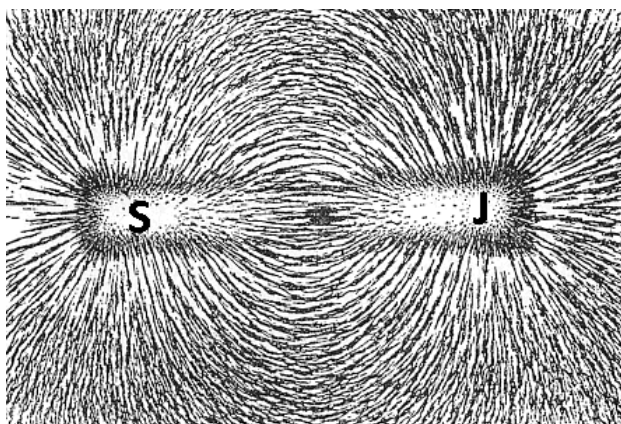
Jednotka magnetického indukčního toku $[\phi]$ je $kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} \cdot A^{-1} = W_b$ [Weber] [3]

Magnetický tok je dán součtem elementárních toků na celý průřez S a pro těleso homogenně magnetované, pro kolmý směr vektoru B k ploše průřezu platí vztah (3.7). [3]

$$\phi = B \cdot S \quad (3.7)$$

kde B je magnetická indukce [T], S je plocha průřezu [m^2] [9]

Indukční čáry lze zviditelnit pomocí železných pilin (obr. 6), které se uspořádají kolem indukčních čar. Hustota pilin je tím větší, čím je magnetické pole silnější. Magnetické indukční čáry tvoří vždy uzavřené křivky, čímž se podstatně liší od siločar elektrického pole, které vycházejí z kladného náboje a končí na záporném náboji. [2]



Obr. 5 Zobrazení magnetických indukčních čar pomocí železných pilin [4]

3.3.4 Permeabilita prostředí

Vliv prostředí reprezentuje veličina Permeabilita μ , která je chápána jako měrná magnetická vodivost látek (jak snadno magnetické pole prostupuje daným prostředím). Absolutní permeabilita (permeabilita prostředí) se skládá z permeability vakua a bezrozměrné relativní permeability prostředí. [4]

Permeabilita vyjadřuje intenzitu magnetizace látky, při působení magnetického pole. Pro permeabilitu prostředí μ [$H \cdot m^{-1}$] (Henry na metr) je dán vztah (3.8). [3], [4]

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0 \quad (1.8)$$

Kde $\mu_r = 1 + \kappa$ [-] je poměrná (relativní) permeabilita prostředí, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} [H \cdot m^{-1}]$ permeabilita vakua [3], [7]

Permeabilita prostředí μ_r je bezrozměrná veličina. Podle ní se posuzují magnetické vlastnosti materiálů (DIA, PARA, FERRO-magnetické látky) [7]

$$\mu_r = 1 + \kappa \quad (3.8)$$

κ je magnetická susceptibilita (vodivost), jednotka je Henry [H]. [7], [9]

Permeabilita μ je také přepočtovou veličinou mezi magnetickou indukcí B a intenzitou magnetického pole H , takže platí rovnice:

$$B = \mu \cdot H \quad (3.9)$$

Látky s poměrnou permeabilitou $\mu_r > 1$ se nazývají paramagnetické, je-li $\mu_r < 1$ jde o látky diamagnetické. U feromagnetických látek dosahuje poměrná permeabilita hodnot mnohem větší než 1. [3]

3.4 Magnetické vlastnosti látek

Jsou způsobeny pohybem elektronů v atomech. Elektrony se pohybují oběhem kolem jádra atomu a rotací kolem své osy, to způsobuje vytvoření magnetického pole elektronů, která se propojují a stanovují konečné magnetické pole atomů a tím vlastnosti látky. Podle toho se pak látky rozdělují na: [2], [10]

- látky diamagnetické
- látky paramagnetické
- látky feromagnetické

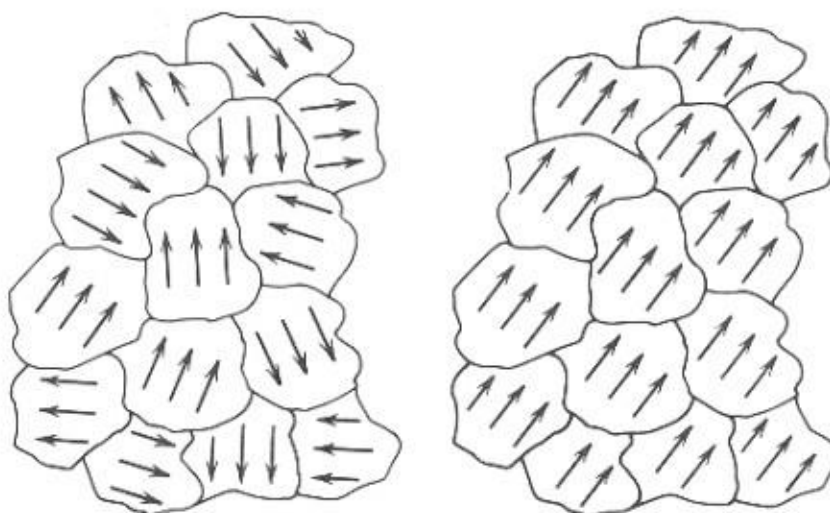
Látky diamagnetické: elementární magnetická pole se zcela ruší, látky zeslabují magnetické pole, do kterého jsou vloženy (jsou z něho slabě vytlačovány). Mají relativní permeabilitu nepatrně menší než 1 ($\mu_r < 1$). Mezi paramagnetické látky patří například zinek, zlato, voda, měď, rtuť. [2], [3], [10], [11]

Látky paramagnetické: elementární magnetická pole se ruší jen částečně, látky zesilují magnetické pole, do kterého jsou vloženy (jsou magnetickým polem slabě přitahovány). Permeabilita relativní je nepatrně větší než 1 ($\mu_r > 1$). Atomy těchto látek mají vlastní magnetické pole. Vnější magnetickým polem by tedy bylo možné je uspořádat tak, aby došlo k souhlasné orientaci magnetických polí jednotlivých atomů, a tím i ke značnému zesílení magnetického pole v látce. Ve skutečnosti tento stav nenastává, brání mu tepelný pohyb. K paramagnetickým látkám patří například hliník, platina, kyslík, hořčík, draslík. [2], [3], [10], [11]

Látky feromagnetické: u feromagnetik dosahují hodnoty μ_r řádově stovek, tisíců a u některých speciálních materiálů například u permaloye (slitina niklu a železa) až statisíců. Charakteristickým znakem feromagnetických látek je nelineární závislost mezi intenzitou magnetického pole H a magnetickou indukcí B . Tato závislost je označována jako magnetizační křivka. [2]

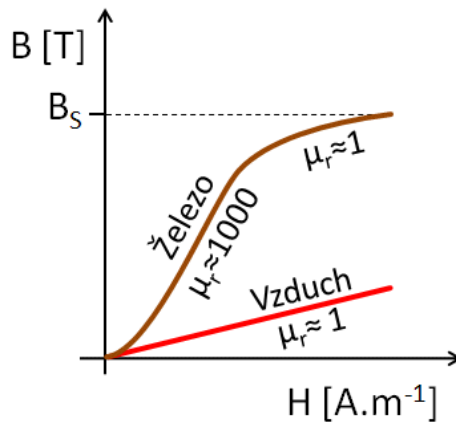
Atomy feromagnetik jsou stejné jako u paramagnetik, to ale není důležité pro vznik magnetického pole u feromagnetických látek, podstatné je, že v těchto látkách jsou takzvané domény. U nezmagnetizovaných feromagnetických látek jsou tyto oblasti nepravidelně uspořádány tak, že se jejich magnetické účinky ruší. Po vložení do magnetického pole se zvětšuje doména, která je zmagnetována ve stejném směru, a ostatní domény se pak navíc natáčejí tak, aby jejich magnetické pole souhlasilo s vnějším magnetickým polem. Doménová struktura nakonec zmizí-látka je magneticky nasycena. Když pak látku z magnetického pole vyndáme, látka zůstává částečně zmagnetovaná. [2], [10]

Uspořádání domén za normálního stavu (látka není vložena do magnetického pole) je zobrazeno na obr. 6, vpravo při vložení feromagnetické látky do magnetického pole. [12]



Obr. 6 Uspořádání domén ve feromagnetické látce [14]

Feromagnetické materiály se ve vnějším magnetickém poli chovají tak, že nízké intenzity vnějšího pole nezvládnou natočit vnitřní magnety a materiál se chová spíše jako paramagnetický $\mu_r > 1$. Pokud intenzita vzroste natolik, že se vnitřní magnety začnou natáčet, materiál bude zesilovat vnější magnetické pole $\mu_r \gg 1$. Potom intenzita bude dále růst, při maximální hodnotě už se všechny vnitřní magnety natočí-dojde k magnetickému nasycení při indukci B_s - materiál se opět jeví jako paramagnetický a dále už magnetické pole nezesiluje. To znamená, že permeabilita feromagnetických materiálů není konstanta, ale mění se podle intenzity vnějšího magnetického pole. Grafické vyjádření této závislosti se nazývá křivka prvotní magnetizace (obr. 7). [4]

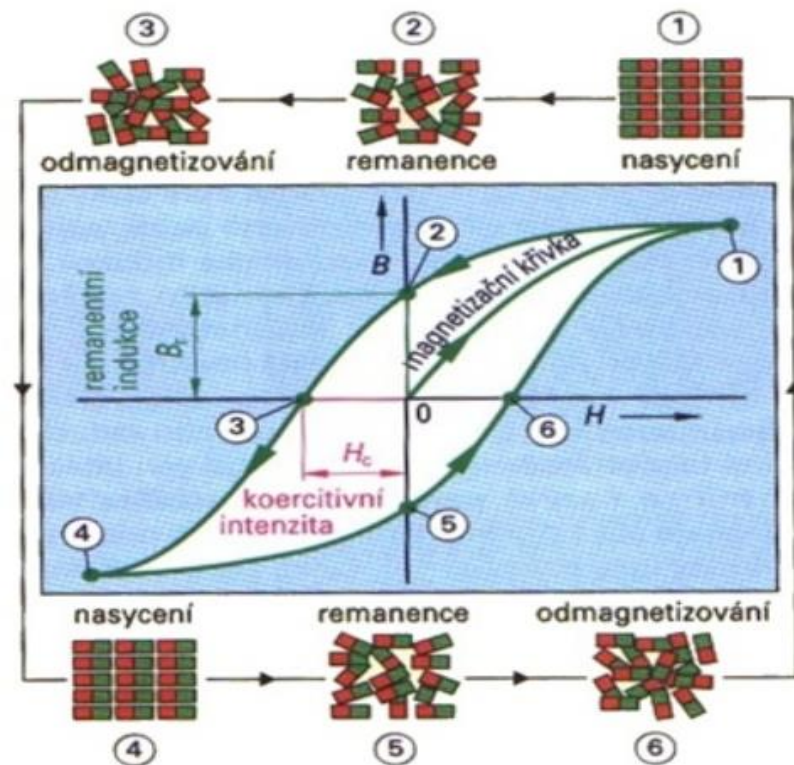


Obr. 7 Křivka prvotní magnetizace [4]

Křivka prvotní magnetizace je magnetizační křivka materiálu, který je magnetován poprvé, nebo po úplném odmagnetování. [13]

Hysterezní smyčka

Feromagnetické látky jsou charakterizované hysterezí, která se graficky znázorňuje hysterezní smyčkou. [3]



Obr. 8 Hysterezní smyčka [14]

(1) Je-li vložen do magnetického pole feromagnetický materiál, který ještě nebyl nikdy zmagnetován, začne se materiál magnetovat podle křivky prvotní magnetizace do tzv. bodu nasycení. [14]

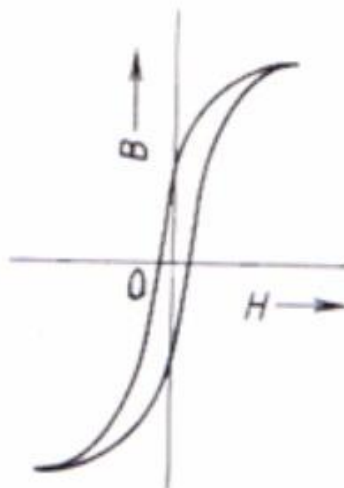
(2) Jakmile magnetické pole zanikne, zůstane část domén v každé feromagnetické látce orientována, tzn. látka zůstane částečně zmagnetovaná, což se projeví tzv. remanentní indukci B_r . Remanentní (zbytkový) magnetismus magneticky měkké látky zanikne teprve po dlouhé době vlivem tepelných pohybů látkových částic. U magneticky tvrdých látek nezaniká. [14]

(3) Aby remanentní magnetismus zanikl, je látka demagnetizována tím, že na ni působíme opačným magnetickým polem. Magnetizace je přerušena v okamžiku, kdy látka nevykazuje žádné magnetické účinky (proběhla demagnetizace). K odstranění remanentního magnetismu musíme vynaložit práci. Koercivní intenzita H_c je intenzita magnetického pole potřebná ke zrušení remanentní indukce. [13], [14]

(4) Pokračováním magnetizace je dosaženo nového zmagnetování feromagnetické látky, ale magnetické póly budou opačné. Po změně směru magnetického pole probíhá opět demagnetizace, takže se hysterezní křivka uzavře. Celá křivka se nazývá hysterezní smyčka. [3], [14]

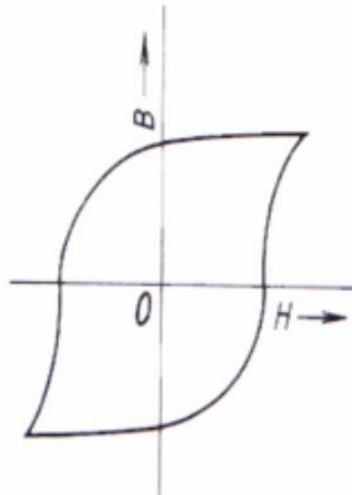
Každý feromagnetický materiál vykazuje feromagnetické vlastnosti jenom do určité teploty (Curierovy teploty). Při vyšší teplotě se látka chová jako paramagnetická. Například pro $Fe = 280^\circ C$. [3], [11]

Magneticky měkké feromagnetické materiály jsou materiály s malou koercitivní silou, s úzkou hysterezní křivkou (obr. 10). Po vyndání z magnetického pole své magnetické vlastnosti ztrácejí (měkké železo, slitiny železa s niklem, křemíkem...). [3], [14]



Obr. 9 Úzká hysterezní křivka [14]

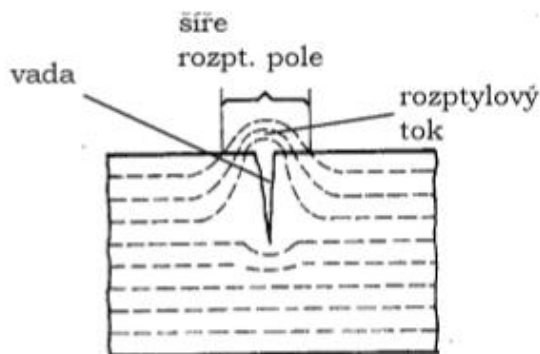
Magneticky tvrdé feromagnetické látky jsou charakteristické velkou koercitivní silou a tedy širokou hysterezní smyčkou (obr. 11). Ideálně magneticky tvrdé materiály jsou takové, které po vyndání z magnetického pole zůstávají trvale zmagnetovány (jejich domény se už neuspořádají zpět náhodně). Je to například uhlíková, chromová, kobaltová ocel, slitina Alnico (Fe-Al-Ni-Co). [3], [14]



Obr. 10 Široká hysterezní křivka [14]

4 Princip metody

Magnetické metody nedestruktivní kontroly jsou založeny na registraci rozptylových magnetických polí nad vadami. V důsledku přítomnosti povrchové vady se ve zmagnetizovaném předmětu v oblasti této vady zvětšuje odpor, dochází k rozptylu magnetického pole, které zčásti vystupuje do okolního prostředí a tuto skutečnost je možno využít ke zjištění vady (obr 12). [3]

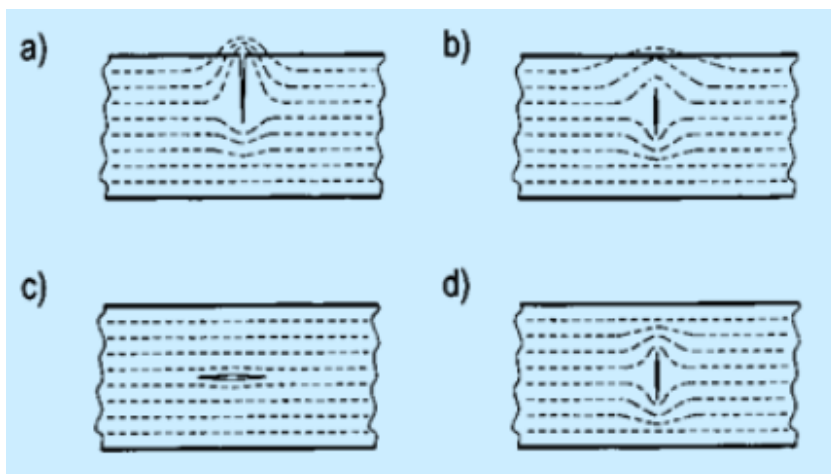


Obr. 11 Rozptylové pole nad vadou [1]

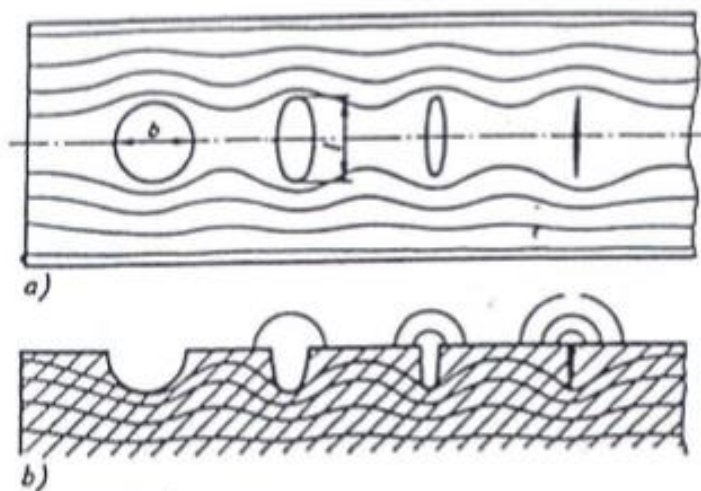
4.1 Způsoby magnetizace

Ve zkoušeném materiálu se mohou vady vyskytovat v různých směrech, tvarech a velikostech, a proto je třeba vždy zvolit nejvhodnější způsob magnetizace. Velikost rozptylového toku je ovlivněna hloubkou uložení, rozměrem i tvarem necelistvosti. Největší rozptylový tok vzniká

u vad souvisejících přímo s povrchem (obr. 13–a). Rozptyl rychle klesá, roste-li vzdálenost necelistvosti od povrchu předmětu (obr. 13-b, d). V opačném případě, splývá-li směr necelistvosti se směrem pole, rozptylové pole nevzniká a necelistvost zůstane nezjištěna. (obr. 13–c). Tvar vady, přesněji řečeno poměr délky k šířce, ovlivňuje velikost rozptylového toku v tom smyslu, že úzké, dlouhé vady, oproti širokým a mělkým, zvětšují rozptylový tok, zachyceno na obr. 14. Pokud je však vada velmi úzká, zmenšuje se magnetický odpor a její indikace se stává nevýraznou. [3], [11], [1]



Obr. 12 Vliv polohy vady [11]



Obr. 13 Vliv tvaru trhliny na velikosti rozptylového pole [1]

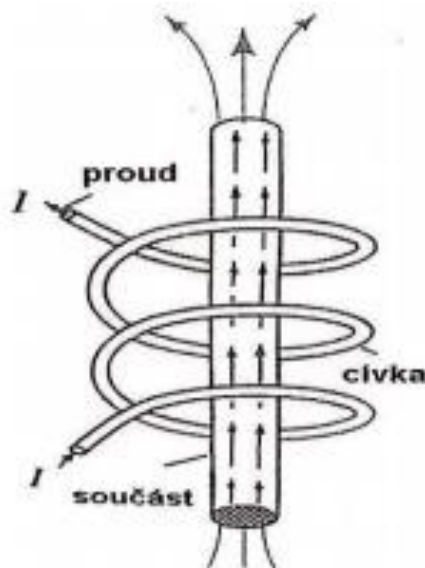
K vytvoření magnetického pole v místě vady je nutno zkoušený předmět zmagnetovat a to kolmo na směr zjišťovaných necelistvostí. V zásadě jsou rozeznávány dva způsoby magnetizace a to: pólovou magnetizací a cirkulární magnetizací. [2], [15]

4.1.1 Pólová (podélná) magnetizace

Pro vytvoření takového magnetického pole jsou používány především přenosná magnetická jha nebo magnetické cívky. Magnetické pole prochází předmětem od jednoho pólu ke druhému. V neporušeném materiálu jsou magnetické křivky rovnoběžné s povrchem. Na hranách vady vzniknou fiktivní magnetické póly, nad nimiž se pak rozptylové pole vyklene a je možno ho indikovat. Tímto způsobem se zjišťují příčné nečistoty. [3], [15]

Pólová magnetizace cívkou

Při magnetizaci cívkou se zkoušený předmět zasune do cívky, kterou protéká proud (obr. 14). Cívky mají obvykle ve formovaném rámu tři nebo pět závitů měděného kabelu (obr. 15). Magnetické pole má směr osy cívky, zjišťují se vady příčné. [2], [16]



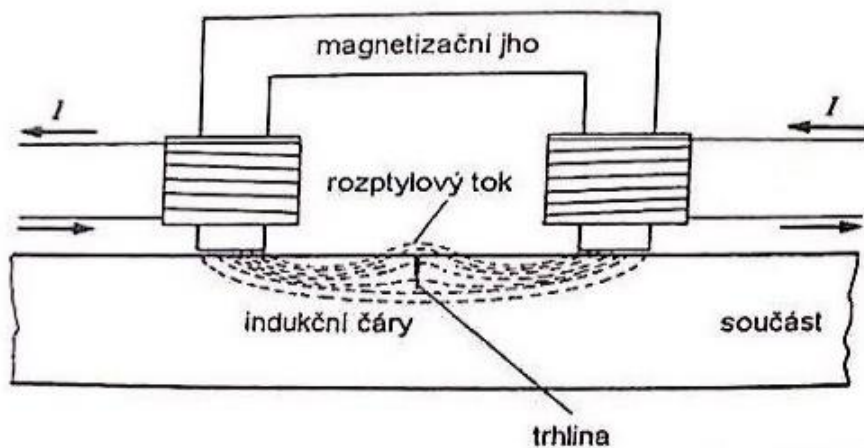
Obr. 14 Pólová magnetizace cívkou [2]



Obr. 15 magnetizační cívka [17]

Pólová magnetizace pomocí magnetizačního jha

Zkoušený předmět nebo jeho část (obr. 16) je umístěn mezi póly magnetizačního jha a stává se součástí magnetického obvodu. Magnetické indukční čáry jdou z jednoho pólu k druhému pólu a jsou umístěny tak, aby trhliny byly kolmé na indukční čáry. Pro úspěšnou indikaci vad je nutná magnetizace ve dvou kolmých směrech. Mohou být napájeny střídavým proudem ze sít'ové zásuvky nebo pomocí stejnosměrného proudu z baterie. Výhodou je snadná manipulace v nepřístupných místech, jako jsou velké svařence. S výhodou se také používají pro zkoušení hmotných předmětů, se kterými se těžko manipuluje, nebo je nelze upnout do stacionárního magnetizéru (obr. 17). [2], [17], [18], [19], [20]



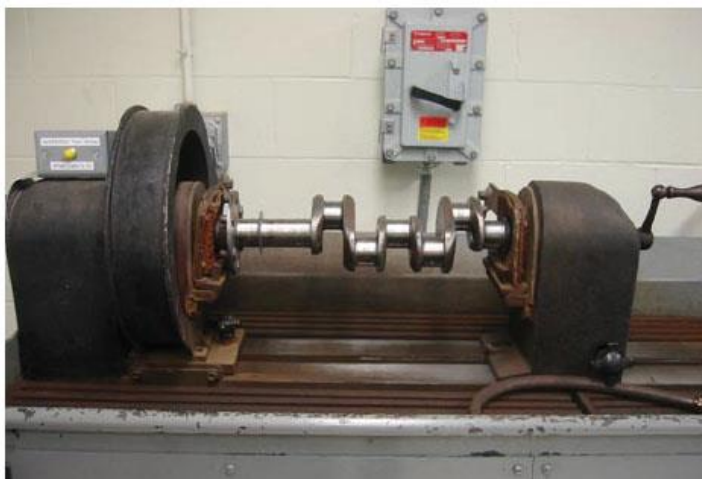
Obr. 16 Magnetování magnetizačním jhem [2]



Obr. 17 Použití ručního jha [21]

4.1.2 Cirkulární (příčná) magnetizace

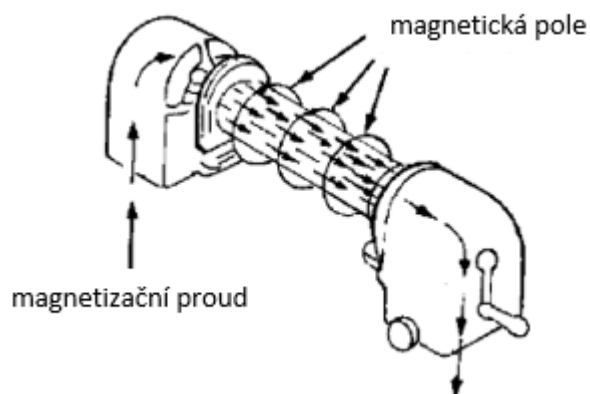
Cirkulární magnetizace je prováděna průchodem proudu kontrolovaným výrobkem, často s pomocným vodičem, nebo indukcí proudu v kontrolovaném výrobku. Magnetický tok je uzavřen ve zkoušeném předmětu. Na rozdíl od pólové magnetizace nevznikají póly a magnetické pole tvoří uzavřené dráhy, jejichž roviny jsou kolmé ke směru proudu. Navenek se vnitřní magnetické pole nijak výrazně neprojevuje. Jsou zjištěny podélné nečelistvosti. Na obr. 18 je ukázána kontrola klikových hřídelů [2], [3], [15]



Obr. 18 Cirkulární magnetizace klikového hřídele [22]

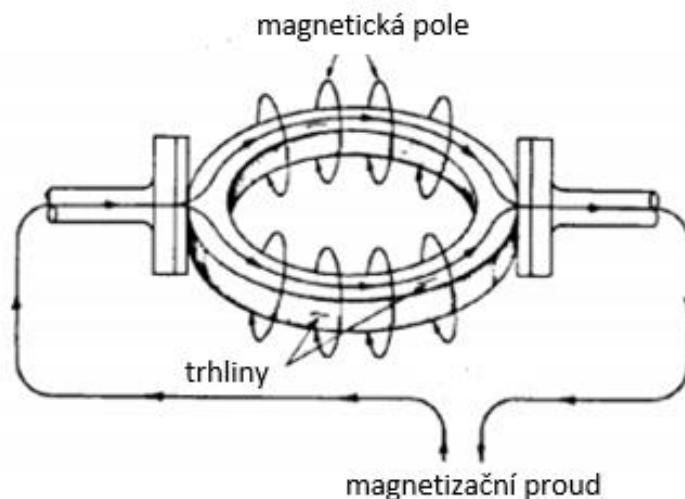
Cirkulární magnetizace přímým průchodem proudu

Magnetizace, prováděná tímto způsobem, je dosažena průchodem proudu značné intenzity přes kontrolovanou součást. Tento typ magnetizace je vhodný pro detekci vad ležících rovnoběžně nebo orientovaných 45° k hlavní ose. Obr. 19 ilustruje magnetická pole a možnou detekovatelnou orientaci vad v podobě šipek na zkoušeném materiálu. [2], [20]



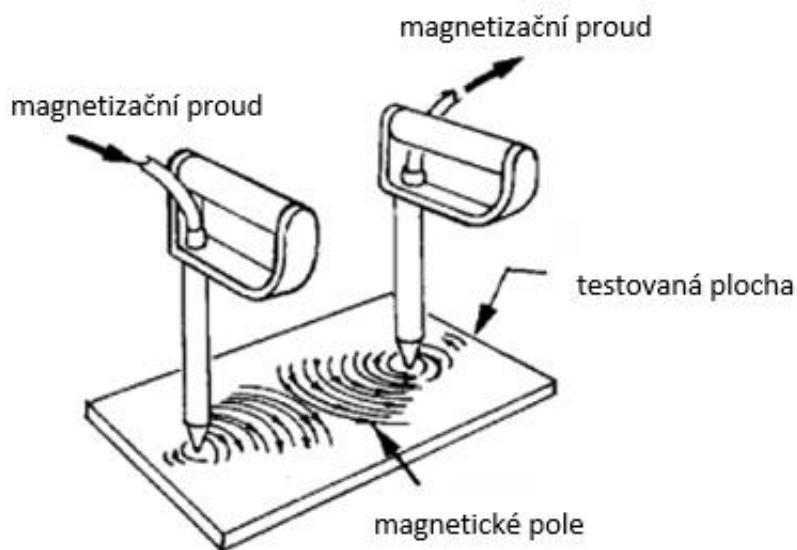
Obr. 19 Cirkulární magnetizace přímým průchodem proudu [20]

Pro magnetizaci přímým průchodem proudu se používají speciální proudové zdroje, které dávají proud od 500 A až do 10 000 A. Základním prvkem těchto zdrojů je transformátor, jenž je napájen ze sítě a jehož sekundární napětí se obvykle pohybuje v rozmezí 3 až 15 V. Nesprávný kontakt může vést k oblouku, který může poškodit součást. Je také možné přehřátí součásti v oblastech s vysokým odporem, jako jsou kontaktní místa a v oblastech s malým průřezem. Obr. 19 ukazuje kontrolu kroužků (např. pro vagónová ložiska). [2], [23]



Obr. 20 Církulární magnetizace kroužků [20]

Církulární magnetizace průchodem proudu v ohraničené lokalitě na rozměrném výrobku se dá dosáhnout použitím ručních příložných elektrod (obr. 20). Obvykle se používá pro inspekce svaru. Pokud není udržován správný kontakt mezi výstupky a povrchem součásti, může dojít k elektrickému oblouku a způsobit poškození součásti. Z tohoto důvodu není použití inspekci povoleno při inspekci v letectví a dalších podobných odvětvích. [2], [16]



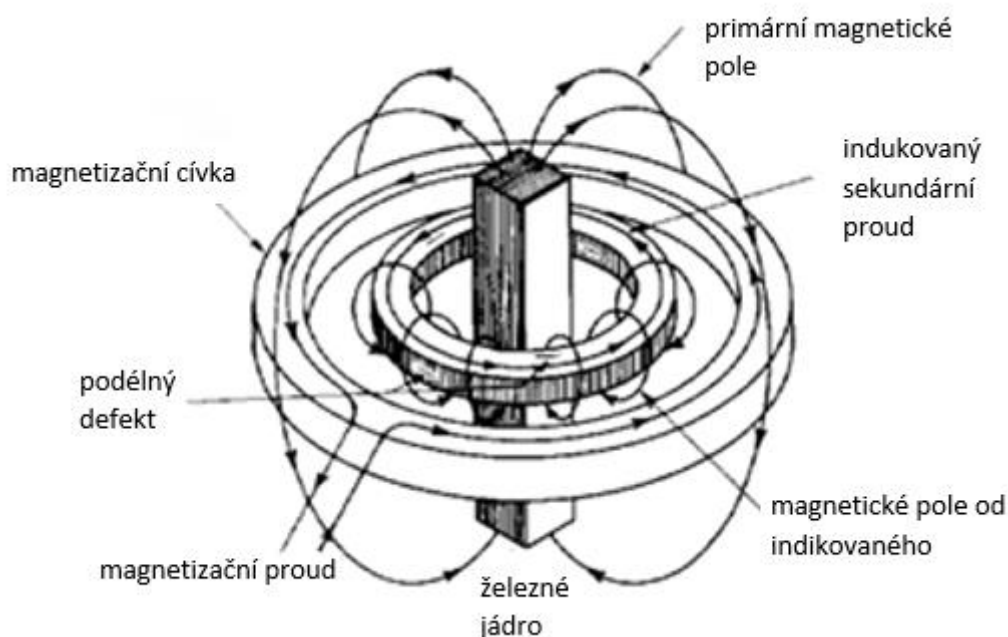
Obr. 21 Použití ručních příložných elektrod [20]

Cirkulární magnetizace pomocným vodičem

Magnetování pomocným vodičem je cirkulární magnetování prstencových a trubkových součástí s dírou (např. různá závěsná oka, díry pro šrouby apod.). Pomocným vodičem může být buď tyč nebo kabel z vodivého neferomagnetického materiálu, nejčastěji z mědi nebo hliníku. Pomocný vodič se umísťuje pokud možno v ose zkoušeného otvoru. Protože neexistuje žádný elektrický kontakt mezi zkoušeným materiálem a pomocným vodičem, není zde riziko přehřátí součásti a vzniku opalu. Tímto způsobem lze detekovat vnitřní i vnější vady. Další výhodou metody je její schopnost testovat několik kusů současně. [2], [11], [24]

Cirkulární magnetizace indukcí proudu

Součást na trnu obklopuje magnetizační cívka, která je napájena střídavým proudem (obr. 21). Tento způsob se používá pro duté součástky např. ke kontrole krátkých trubek, kroužků apod. Široké využití má především při hromadné kontrole kvality leteckých součástí prstencových tvarů. Výhodou je, že předmět je magnetován bezdotykově, takže nemohou vzniknout ani opaly ani nadměrný ohřev. [2], [11]



Obr. 22 Princip cirkulární magnetizace kroužku pomocí indukce proudu [20]

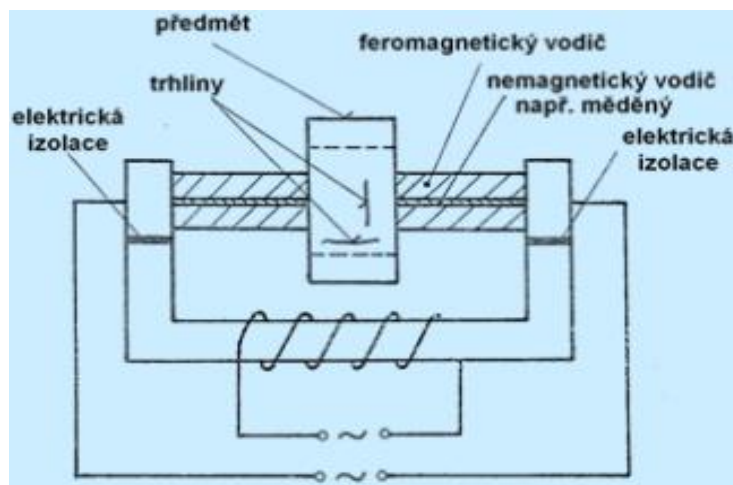
4.1.3 Kombinovaná magnetizace

Při kombinované magnetizaci se současně magnetizuje podélně i příčně. Podélná magnetizace je vyvolána stejnosměrným proudem, příčná proudem střídavým. Není tedy nutné provádět zkoušení dvakrát, zvláště na podélné trhliny a zvláště na příčné, což přináší ekonomický efekt. Při kombinované magnetizaci se zkoušený předmět magnetuje současně dvěma magnetickými

poli, která jsou na sebe prostorově kolmá. Je možno tohoto dosáhnout několika způsoby např.: [2], [3]

- kombinací magnetizačního jha a průchodu proudu,
- kombinací cívky a průchodu proudu,
- kombinací cívky a pomocného vodiče,
- kombinací indukce v součásti a pomocného vodiče.

Způsob kombinací indukce v součásti a pomocného vodiče je ukázán na obr. 23.



Obr. 23 Kombinovaná magnetizace pomocným vodičem a indukcí proudu v předmětu [11]

4.2 Druhy magnetizačního proudu

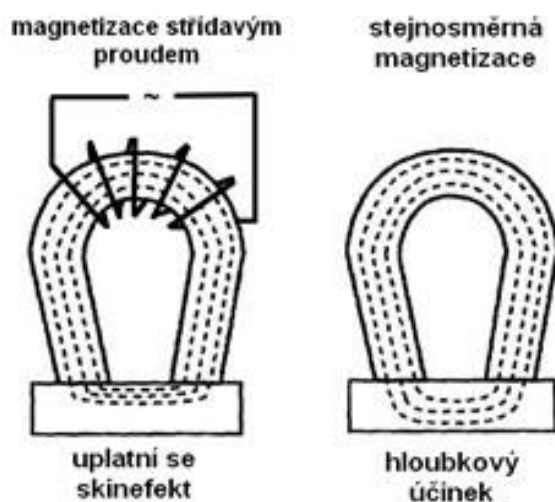
4.2.1 Střídavý proud

Střídavý proud AC (alternating current) o frekvenci 50 Hz je používán téměř u všech druhů magnetizačních zařízení. Střídavý proud se vyznačuje tzv. skin-efektem. Proud teče téměř výhradně v tenké svrchní povrchové vrstvě. Reaguje jen na povrchové vady, nebo mírně podpovrchové vady. U ocelových výrobků dosahuje hloubka vniku hodnoty cca 2 mm , proto není zmagnetována větší část průřezu a odmagnetování není složité. AC se doporučuje používat pouze tehdy, je-li kontrola omezena na povrchové vady. Zdrojem proudu je transformátor s nízkým výstupním napětím $3\text{ až }15\text{ V}$. [2], [11], [25], [18]

4.2.2 Stejnoseměrný proud

Tento způsob se používá zřídka. Ve feromagnetických materiálech magnetické pole produkované DC obecně proniká celým průřezem komponenty. Stejnoseměrná magnetizace principiálně umožňuje obsáhnout i podpovrchové objemové vady (až do cca $5\text{--}10\text{ mm}$).

Citlivost a ostrost indikace s hloubkou vady klesá. Nevýhodou je obtížnější odmagnetování, větší hmotnost zdroje proudu a tím i robustnost celého přístroje. [1], [13], [21], [22]



Obr. 24 Magnetizační proudy [11]

4.2.3 Usměrněné proudy

Jednocestným HWDC (half wave direct current), nebo dvoucestným FWDC (full wave direct current) usměrněním střídavého proudu lze kombinovat vlastnosti, které má magnetizace střídavým a stejnosměrným proudem. Čím větší je stejnosměrná složka magnetizačního proudu, tím hlouběji je materiál zmagnetizován. HWDC je s oblibou používán jak u přenosných proudových zdrojů, tak i u univerzálních i automatizovaných přístrojů. Průnik pole zasahuje cca 30 % pod povrch tělesa, jsou tedy indikovány necelistvosti uložené v blízkosti pod povrchem. FWDC se používá u stacionárních i automatizovaných přístrojů, případně i u velkých mobilních proudových zdrojů. Je vhodný pro zjišťování podpovrchových vad. [2], [18]

4.3 Demagnetizace

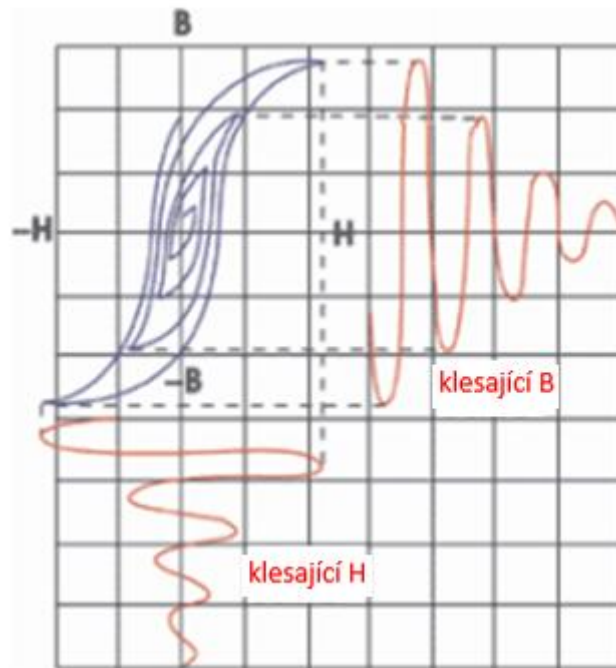
Po kontrole magnetickou metodou práškovou jsou součásti obvykle demagnetizovány. Zbytkový magnetismus se může nepříznivě projevit při jejich další funkci. Zbývající magnetická pole mohou:

- ovlivnit obrábění tím, že třísky drží na součásti a to může vést i k vážnému poškození drahého stroje, pokud se např. znehodnotí výroba ložisek,
- neodmagnetovaná součást může narušit chod hodin, kompasu apod.,
- silnější zbytkové magnetické pole může mít nepříznivý vliv i při obloukovém svařování, svar nemusí být dostatečně provařen např. v kořeni svaru,

- neodstraněné zmagnetování komponentu může nepříznivě ovlivnit přesnost měřících zařízení [2], [3], [26], [27]

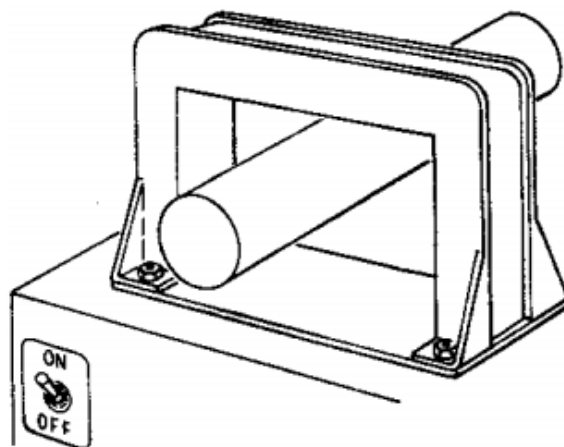
Obecně lze odmagnetování provést:

- vnějším střídavým magnetickým polem s klesající amplitudou,
- komutací (tj. přepínáním polarity) stejnosměrného proudu, napájecího demagnetizační cívku (obr. 26), jehož hodnota se při provádění komutování postupně snižuje na nulu,
- magnetováním výrobku polem opačné polarity než bylo magnetické pole při provádění zkoušky,
- nejúčinněji lze dosáhnout odmagnetování zahřátím materiálu nad jeho teplotu curie. Teplota curie pro nízkouhlíkovou ocel je $770\text{ }^{\circ}\text{C}$ nebo $1390\text{ }^{\circ}\text{F}$. Když je ocel zahřátá nad její teplotu curie, stane se austenitickou a ztrácí své magnetické vlastnosti. Tato metoda demagnetizace je nevhodná, a proto se běžně používána jiná metoda, která vrací materiál do téměř nemagnetizovaného stavu. [2], [26]



Obr. 25 Princip odmagnetování [19]

Princip odmagnetování střídavým polem s klesající amplitudou je znázorněn na obr. 25. Je zřejmé, že při slábnoucím vnějším magnetickém poli H se přemagnetování děje po stále menších hysterezních smyčkách až do úplného odmagnetování. [2]



Obr. 26 Demagnetizace cívkou [27]

4.4 Detekční prostředky

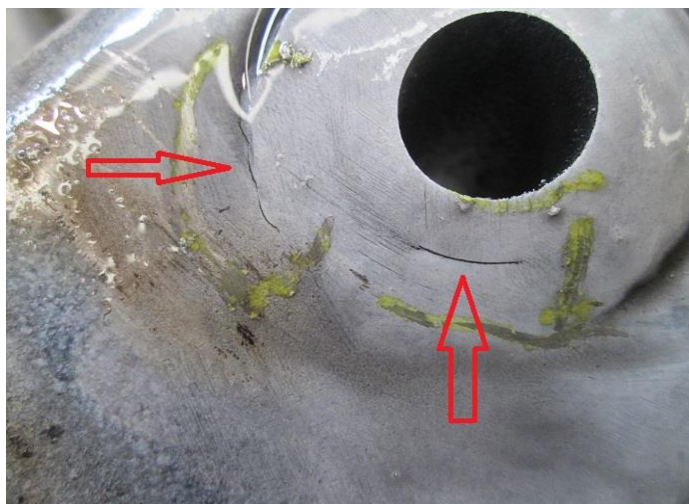
Jak bylo uvedeno výše, částice, které se používají pro kontrolu magnetickou práškovou metodou, jsou klíčovou složkou, protože vytvářejí indikace, které inspektora upozorňují na přítomnost defektů. Magnetické částice jsou drobné frézované kousky železa nebo oxidu železa. [19], [28]

Existují různé typy detekčních médií: suspenze barevných (včetně černých) nebo fluorescenčních částic v nosné tekutině (na bázi vody nebo oleje) nebo suché prášky. Fluorescenční média obvykle dávají nejvyšší citlivost. [29]

Metoda zkoušení magnetických částic v nosné tekutině je obecně citlivější než suchá, protože suspenze poskytuje částicím větší mobilitu a umožňuje použití menších částic, protože prach a přilnavost k povrchové kontaminaci jsou sníženy nebo eliminovány. Mokrý způsob také usnadňuje rovnoměrné nanášení částic na relativně velkou plochu. Testování za sucha se doporučuje tam, kde je třeba zabránit navlhčení povrchu nebo při zkoumání horkých částí. [28], [29]

Metoda barevná

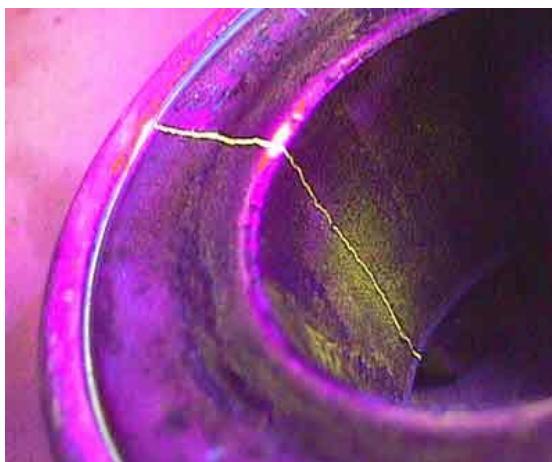
Detekční prostředky jsou buď černé, šedé nebo červenohnědé, v závislosti na způsobu výroby a druhu výchozího materiálu. Pro zvýšení kontrastu a tím i citlivosti metody se na zkoušený povrch nanese tenká vrstva podkladové, nejčastěji bílé barvy (obr. 27). Kombinací těchto dvou barev je získán maximální kontrast, díky němuž je tato metoda dostatečně citlivá i pro vyhledávání malých lineárních vad. Při vyhodnocování je normou předepsán zdroj bílého světla, min 500Lx. [2], [30]



Obr. 27 Indikace prasklin při barevné kontrole [30]

Metoda fluorescenční

Při použití fluorescenčních částic je viditelnost indikací značně zlepšena, protože oko je v temném prostředí přitahováno k „zářícím“ oblastem (obr.28). Pro zobrazení vyvolaných indikací je v tomto případě zapotřebí splnit dvě podmínky. Tou první je minimální okolní světlo (umělé nebo denní), podle normy max. 20luxů. Druhou podmínkou je osvětlení zkoušeného místa zdrojem černého ultrafialového světla s vlnovou délkou 365nm (nanometr). V kuželi tohoto světla se částičky zachycené v místě vady rozzáří a vykreslí vzniklou indikaci. [30], [36]



Obr. 28 Fluorescenční indikace praskliny v ložisku [31]

Vlastnosti magnetických prášků

Magnetické vlastnosti

Používaný prášek musí být z feromagnetického materiálu s vysokou permeabilitou a s co nejnižší koercitivní silou, aby po ukončení proudové magnetizace nezůstal zmagnetovaný a

neulpíval sám vlastní magnetickou přitažnou silou na částech mimo výskyt trhlin. Musí být tedy vyroben z materiálu magneticky měkkého. [2], [3]

Optické vlastnosti

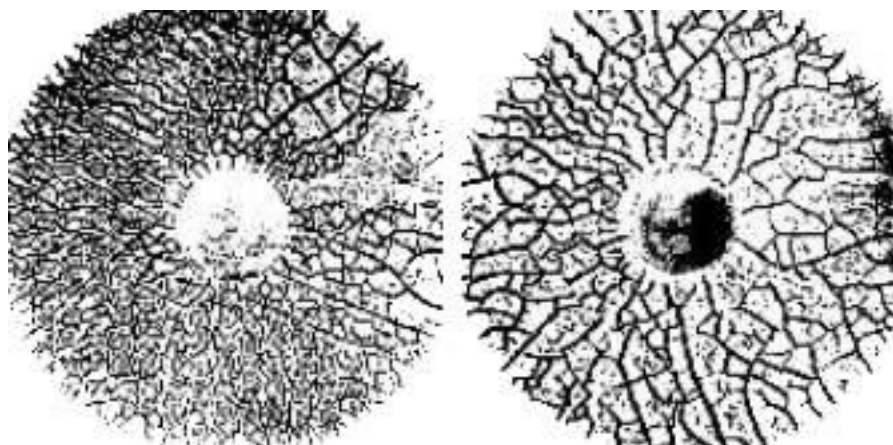
barva prášku – moderní magnetické prášky se vyrábějí pouze v přirozených barvách, tj. černé, šedé, červené,

fluorescence prášku – intenzita fluorescence prášku se vyjadřuje fluorescenčním koeficientem β [cd / W] (Candely / Watt), většina prášků fluoreskuje žlutozeleně a modrozeleně, řidčeji též oranžově. [11]

Velikost a tvar zrna prášku

Suché prášky mají velikost zrna větší a jsou určeny převážně pro zjišťování hrubších necelistvostí. Velikost částic bývá:

- prášky suché – 40 až 400 μm
- prášky do suspenzí – 0,1 až 20 μm [2]



Obr. 29 Vliv velikosti magnetických částic [32]

Na obr. 29 je ukázka vlivu velikosti magnetických částic na citlivost zkoušky. Vlevo je prášek s velikostí zrna 6,5 μm , vpravo 14 μm . Větší zrna se nezachytí na jemných trhlinách, vytvoří však výraznější indikaci. [32]

4.5 Magnetovací zařízení

Magnetovací přístroje sloužící ke zjišťování povrchových necelistvostí ve feromagnetických materiálech rozdělujeme do tří základních skupin:

1. přenosné přístroje
 - ruční magnety
 - přenosné proudové zdroje
2. mobilní proudové zdroje
3. stacionární přístroje
 - univerzální
 - automatizované [2], [3]

1. Přenosné přístroje

Ruční magnety jsou malá jha, opatřená jednou nebo dvěma budícími cívkami, napájenými nejčastěji střídavým proudem z průmyslové sítě 230 V (Volt), 50 Hz (Hertz). Zvláštním typem ručních magnetů jsou jha s permanentními magnety. Nevýhodou ručních magnetů s permanentními magnety je poměrně nízká intenzita magnetického pole a námaha, kterou musí obsluha vynakládat při odtrhování magnetu od kontrolovaného povrchu. [2]

Přenosné proudové zdroje se používají především na stavbách, montážích a při kontrolách ve výrobě materiálu, využití však nacházejí i v řadě dílenských kontrol. Jsou to v principu transformátory, které umožňují transformovat síťové napětí na hodnoty 4 až 10 V (Volt). Zkoušení proudovými zdroji je velmi rychlé a levné, proto je značně oblíbené. Jeho nevýhodou je, že při použití elektrod, zejména měděných (obr. 31), je nebezpečí vzniku opalů. U obou dalších způsobů magnetování, např. s pomocným vodičem, cívkou apod., toto nebezpečí nehrozí. Hmotnost proudových zdrojů roste s výkonem přístroje a to od 10 kg (kilogram) u nejmenších zdrojů (500 A) (Ampér) až do 90 kg (kilogram) u nejvýkonnějších zdrojů (4000 A) (Ampér). [3], [18]



Obr. 30 Zkoušení přenosným proudovým zdrojem pomocí měděných elektrod [16]

2. Mobilní proudové zdroje

Jsou výkonnější obdobou přenosných proudových zdrojů (obr. 32). Staví se pro magnetovací proudy od 4000 do 10000 A (Ampér). Jejich hmotnost se pohybuje od 100 do 700 kg (kilogram). Mobilní proudové zdroje bývají kromě různých magnetovacích proudů často vybaveny též odmagnetovacím zařízením, UV lampou, měrkami, ruční elektrody se spínačem atd. . [2], [3], [18],[33]



Obr. 31 Mobilní proudový zdroj Magman 6000 [33]

3. Stacionární přístroje

Univerzální přístroje jsou stacionární zařízení určené pro sériovou provozní kontrolu s kompletním vybavením pro zkoušení magnetickou metodou práškovou. Tyto přístroje bývají též označovány jako horizontální defektoskopy. Univerzální defektoskop zpravidla obsahuje tyto prvky:

- zařízení pro cirkulární magnetizaci
- zařízení pro pólovou magnetizaci
- upínací zařízení
- čerpadlo detekční tekutiny
- osvětlovací zařízení

Cirkulární magnetizace se obvykle děje přímým průtokem proudu nebo pomocným vodičem. Pólová magnetizace se provádí upnutím do magnetizačního jha nebo u dlouhých předmětů se uskuteční cívkou, která se pohybuje podél zkoušeného předmětu (obr. 33). [2]



Obr. 32 Horizontální magnetický defektoskop UNIMAG Basic [34]

Automatizované přístroje jsou jednoúčelová zařízení pro hromadnou kontrolu stejných nebo tvarově jen málo odlišných součástí. Jsou konstruována s vysokým stupněm mechanizace a automatizace, takže úkol pracovníka se omezuje většinou jen na konečné vizuální hodnocení indikací vad. Automaty se rozlišují podle způsobu dopravy zkoušené součásti přístrojem na:

- pásové (běžící pás)
- krokovací – zvedací zařízení, posunující součást vždy o jednu pracovní pozici
- s otočným kruhovým stolem
- ostatní [2], [3]

5 Praktická ukázka

Vlastnosti zkušebních prostředků musí být v souladu s normou EN ISO 9934-2, kde jsou popsány požadavky na zkoušení typu a šarže. Zkušební prostředky musí být bez nečistot, zrna musí mít vhodnou velikost i tvar, vhodné zbarvení, vysokou permeabilitu, přiměřenou remanenci a co nejnižší koercitivní sílu.

Aby byla zkouška provedena podle přiložené normy je potřeba provést kontrolu okolních podmínek a jednotlivých zařízení, zda dosahují hodnot v normě uvedených: [1]

- světelné podmínky – Luxmetr
- kontrola kvality, citlivosti prášku – Bertholdova měrka, MTU - 3 měrka
- kontrola zdvihací síly jha – ocelová deska 4,54 kg

Luxmetr LXmax 130

Umožňuje měřit osvětlení v rozsahu 0 - 200 000 luxů. Má automatické nulování, velmi nízkou spotřebu (50 hodin souvislého měření s vypnutým podsvícením displeje). Senzor umístěný na

kabelu dlouhém 1,5m (fotodioda s barevným korekčním filtrem) rozšiřuje možnosti luxmetru pro měření v různých měřících polohách. [35]



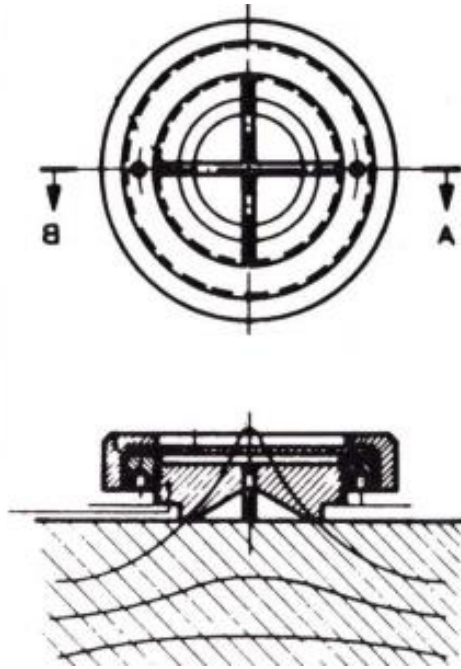
Obr. 33 Luxmetr LXmax 130 [35]

Bertholdova měrka

Citlivost zkoušky, magnetizace a jakost suspenze se kontroluje pomocí Bertholdovy měrky (obr. 37). Měrka položená na kontrolní součást mezi póly jha je během magnetizace postříkána indikační kapalinou. Pomocí měrek lze určit citlivost metody, neboť napodobují přítomnost nečistostí v kontrolovaném místě (obr. 38). [1], [2]



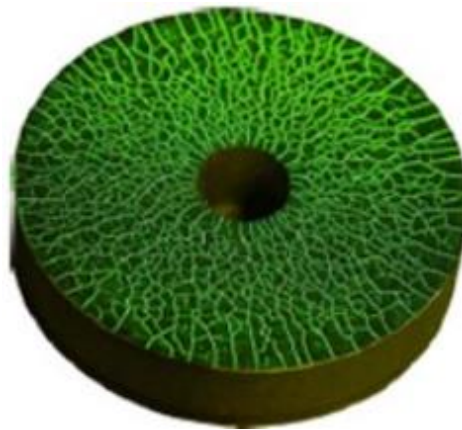
Obr. 34 Bertholdova měrka [11]



Obr. 35 Princip Bertholdovy měrky [36]

Měrka MTU – 3

Slouží ke kontrole kvality detekčních suspenzí. Při zkoušce se povrch kroužku poleje, přebytek suspenze se odstraní a potom následuje vyhodnocení. Suspenze je vyhodnocena jako vyhovující, pokud se dosažený výsledek blíží co nejvíce obrázku číslo 36. [1], [1]



Obr. 36 Měrka MTU – 3 [11]

Ocelová deska 4,54 kg

Slouží k ověření funkce ručního magnetu odtrhovou zkouškou. Nosnost je měřítkem elektromagnetické síly jha. U provedení AC je to hmotnost 4,54 kg. Možnost použití 4 ks pro DC magnety. [37]



Obr. 37 Zkušební ocelová deska [37]

5.1 Testování ohýbané trubky pomocí barevného detekčního prášku

Účelem testování byla certifikace postupu ohýbání trubek na stroji MB642 (obr. 41). Přesněji byla Magnetická metoda prášková provedena z důvodu kontroly vnějšího povrchu ohybu a indikace případných trhlin.



Obr. 38 Ohýbací stroj MB642 [38]

Metodika:

- Příprava povrchu: Je důležité, aby byl zkušební povrch čistý, suchý a bez nečistot, mastnoty, vodního kamene, barvy nebo jiných materiálů, které by mohly ovlivnit kontrolu.

- Kontrola intenzity osvětlení použitím luxmetru LXmax 130 (pro barevnou indikaci minimálně 500 lux).
- Kontrola jednotlivých zařízení (Bertholdova měrka, ocelová deska 4,54 kg , měrka MTU - 3)
- Pro magnetování byl použit ruční magnet Parker B100S (obr. 39). Výhodou je výkonné střídavé magnetické pole, flexibilita nohou, která umožňuje, aby bylo pole skutečně „zaměřeno“ na přesnou oblast kontroly.






Obr. 39 Ruční jho Parker B100S [39]

- Nanesení bílé podkladové barvy PFINDER 280 ve spreji. To je důležité pro kontrast mezi černým detekčním práškem a bílou podkladovou barvou.
- Jako detekční prášek byl použit PFINDER 240 černý prášek ve spreji. Velikost je zrna $5\mu\text{m}$.



Obr. 40 Černý detekční prášek [35]

Po zkoušce se zpracoval protokol, který popisuje typ detekčního prášku, druh magnetizace, celkové hodnocení a další viz. obr. 41.

	TESYDO, s.r.o. - Zkušební laboratoř		202-F04
	Protokol o zkoušce magnetickou metodou práškovou		Revize 1 Strana 1/1
1. Zákazník : Z - K Termochem, s.r.o. Lihovarská 14 190 00 Praha 9		6. Zakázka č.	10 - 008 - J
		7. Protokol č.	11 - 654 - MT
		8. WPS č.	—
2. Výrobek : Zkušební kus - ohýbaná trubka		9. WPQR č.	—
3. Základní materiál 1: 15Mo3		10. Rozměr :	ø 21,3 x 2,9 mm
4. Základní materiál 2: —		11. Rozměr :	—
5. Zkoušená část/oblast : Ohýbaná část a její okolí		12. Výkres č.	—
13. Účel zkoušky : Certifikace postupu ohýbání trubek na stroji MB642			
14. Hodnocení dle : ČSN EN ISO 23278		17. Klasifikační stupeň : 2X	
15. Rozsah zkoušení [%] : 100	16. Typ svaru : —	18. Metoda svařování : —	
19. Technické údaje			
20. Magnetizace :	21. Přístroj - typ :	22. Detekční prášek :	
<input checked="" type="checkbox"/> Podkova <input type="checkbox"/> Průchod proudu <input type="checkbox"/> Kombinovaná	PARKER B100S	<input type="checkbox"/> Fluorescenční <input checked="" type="checkbox"/> Barevný <input type="checkbox"/> Suchý <input checked="" type="checkbox"/> Suspenze	
23. Typ detekčního prášku : PFINDER - APELUX 1041			
24. Kontrolní měrka : Bertholdova měrka	26. Proud [A] : —	28. Druh : —	
25. Povrch : hladký	27. Teplota povrchu [°C] : 20		
29. Výsledek			
Během trvání zkoušky se neprojeví žádné povrchové vady.			
30. Celkové hodnocení / závěr:			
<input checked="" type="checkbox"/> 31. Bez záznamu vad	<input type="checkbox"/> 33. Záznam vad (viz druhá strana tohoto protokolu)		
<input type="checkbox"/> 32. Nevyhovuje	<input type="checkbox"/> 34. Vyhovuje po opravě	<input checked="" type="checkbox"/> 35. Vyhovuje	
36. Zkoušku provedl :	Ing Jan Opletal	41. Razítko a podpis	42. Inspekční organizace
37. Číslo certifikátu :	TDS-SMS-COP 032		
38. Vyhodnotil :	Ing Jan Opletal		
39. Číslo certifikátu :	TDS-SMS-COP 032		
40. Datum vyhodnocení:	24. 10. 2011		

Obr. 41 Protokol o zkoušce magnetickou metodou práškovou [40]

Výsledkem je hodnocení / závěr: Bez záznamu závad / Vyhovuje. Výrobce prokázal, že je způsobilý k provádění výroby ohybů na trubkách.

5.2 Porovnání s dalšími metodami NTD

Hlavními výhodami a nevýhodami oproti ostatním metodám NTD jsou:

Výhody

- vysoká citlivost (malé trhlinky jsou detekovány)
- rychlý způsob kontroly (indikace jsou vidět přímo na povrchu vzorku)
- jedná se o celkem mobilní metodu (pokud použijeme přenosné přístroje)
- v porovnání s mnoha jinými metodami NDT, je tato metoda považována za levnou (nízké náklady)

Nevýhody

- lze detekovat pouze povrchové a blízké povrchové vady
- platí pouze pro feromagnetické materiály
- často je nutné provést následné čištění a demagnetizaci
- kontrola velkých součástí může vyžadovat použití zařízení se zvláštními požadavky na výkon
- některé komponenty mohou vyžadovat odstranění povlaku nebo pokovení, aby se dosáhlo požadované citlivosti inspekce [17], [19]

6 Závěr

Tato práce je věnována jedné z nedestruktivních testovacích metod a to magnetické metodě práškové. Všechny nedestruktivní zkoušky mají svá pravidla, předpisy a doporučení, které jsou uvedeny v celé řadě norem.

Magnetická metoda prášková jak už vychází z názvu je založena na magnetismu-elektromagnetismu, prášku-detekčním prášku. Pro pochopení dané problematiky byly nejdříve popsány základní informace o elektromagnetismu a jeho základních charakteristikách jako je:

- magnetické pole,
- intenzita magnetického pole,
- magnetická indukce,
- magnetický indukční tok,
- permeabilita prostředí,
- magnetické vlastnosti látek.

V další kapitole byl popsán princip metody, kdy po zmagnetizování zkoušeného materiálu v důsledku přítomnosti povrchové vady dojde ke vzniku rozptylového pole nad necelistvostí (vystupování magnetických siločar nad povrch materiálu). Na zkoušený předmět se nanese detekční prostředek v podobě jemných částic železného prášku. Feromagnetický detekční prášek se uchytí v rozptylovém poli nad vadami a označí necelistvost. Na základě odborné literatury byly popsány druhy magnetizace, magnetizačních proudů, demagnetizace, detekčních prostředků a magnetizačních zařízení.

Dále se práce věnuje testováním ohýbané trubky pomocí barevného detekčního prášku. Testování proběhlo z důvodu certifikace postupu ohýbání trubek na stroji MB642. Zde autor uvedl metodiku a prostředky potřebné k vykonání zkoušky. Poté byl vypracován protokol o zkoušce magnetickou metodou práškovou, jehož výsledkem je hodnocení, že se během trvání zkoušky se neprojevily žádné povrchové vady na ohýbané části a její okolí.. Účelem zkoušky bylo potvrdit, že se v materiálu žádná povrchová vada nevyskytuje.

První myšlenka použití magnetismu ke zkoušení feromagnetického materiálu vznikla už před více než sto lety a přesto má magnetická metoda prášková určitě své místo mezi nedestruktivními zkouškami materiálu. Už jen pro její vysokou citlivost na malé trhlinky a nízké náklady na provedení zkoušky. Na druhou stranu její nevýhoda je uplatnění pouze u feromagnetických materiálů.

7 Seznam použitých zdrojů

- [1] DVOŘÁKOVÁ, SALAČOVÁ, BUBENSKÝ, ULLMAN, Normy. 12. *Nedestruktivní defektoskopie – kapilární a magnetická metoda prášková*. 2010.
- [2] KOPEC, Bernard. a ČESKÁ SPOLEČNOST PRO NEDESTRUKTIVNÍ TESTOVÁNÍ. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí : (nauka o materiálu IV)*. Vyd. 1. B.m.: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 8072045911.
- [3] DUBENSKÝ, Rudolf. *Defektoskopie : Nedestruktivní zkoušení*. 2. přeprac. B.m.: České vysoké učení technické, 1992. ISBN 80-01-00844-4.
- [4] VLČEK, Jan. *Základy elektrotechniky* [online]. 2006 [vid. 2020-02-17]. Dostupné z: <http://old.spsemoh.cz/vyuka/zae/el7.htm>
- [5] HALLIDAY, D., R. RESNICK a J. WALKER. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. B.m.: VUTIUM, 2000. ISBN 80-214-1868-0.
- [6] *Stacionární magnetické pole* [online]. [vid. 2020-03-25]. Dostupné z: http://elektross.gjn.cz/magn_pole/stac_mp.html
- [7] VONDRÁŠEK, Zbyněk. *Elektromagnetismus*. 2019
- [8] *Vodič s proudem | Eduportál Techmania* [online]. [vid. 2020-03-05]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/magnetismus/vodic-s-proudem>
- [9] *Magnetická vodivost, permeance* [online]. [vid. 2020-03-09]. Dostupné z: http://147.33.74.135/echo/analytika/jednotky/magneticka_vodivost__permeance.html
- [10] *Rozdělení materiálů podle magnetických vlastností* [online]. [vid. 2020-03-09]. Dostupné z: http://elektross.gjn.cz/magn_pole/magn_materialy.html
- [11] *Magnetická metoda prášková - ppt stáhnout* [online]. [vid. 2020-03-09]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/2371180/>
- [12] *Optika-obrazové přílohy* [online]. [vid. 2020-03-17]. Dostupné z: http://mineralogie.sci.muni.cz/kap_4_8_magnet/obrazek48_1.htm

- [13] *Magnetické materiály* [online]. [vid. 2020-03-17]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/353/07.html>
- [14] *ELUC* [online]. [vid. 2020-03-17]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/459>
- [15] *Metoda magnetická | CONTROLTEST spol. s r.o. - nedestruktivní defektoskopie NDT* [online]. [vid. 2020-03-22]. Dostupné z: <http://www.controltest.cz/metody-ndt/magneticka.php>
- [16] *Portable MPI Equipment* [online]. [vid. 2020-03-26]. Dostupné z: <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/MagParticle/Equipment/EquipmentPortable.php>
- [17] GALLEGO, Prof. Juno. *Magnetic Particle Testing (MPT)* [8]. nedatováno.
- [18] *Print page* [online]. [vid. 2020-03-25]. Dostupné z: http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/print.php?page=6386&typ=html
- [19] HIJAZ, Dr. Ala. *Introduction to Non-Destructive Testing Techniques, Magnetic Particle Testing*. nedatováno.
- [20] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Liquid Penetrant and Magnetic Particle Testing at Level 2*. 2000.
- [21] *TEDIKO s.r.o. - Technická diagnostika komponent* [online]. [vid. 2020-03-26]. Dostupné z: <http://www.tediko.cz/index.php?sub=02cz&lang=cz&p=0207cz>
- [22] *Effect of Flux Direction* [online]. [vid. 2020-03-30]. Dostupné z: http://avstop.com/ac/Aviation_Maintenance_Technician_Handbook_General/8-26.html
- [23] *Magnetization of Ferromagnetic Materials* [online]. [vid. 2020-03-23]. Dostupné z: <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/MagParticle/Physics/Magnetization.htm>
- [24] *Magnetic Particle Method | Hascelik.com* [online]. [vid. 2020-03-30]. Dostupné z: <http://www.hascelik.com/en/teknik-bilgiler.aspx?ID=165>
- [25] *Magnetizing Current* [online]. [vid. 2020-03-23]. Dostupné z: <https://www.nde->

ed.org/EducationResources/CommunityCollege/MagParticle/Physics/MagnetizingCurrent.htm

- [26] *Demagnetization* [online]. [vid. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/MagParticle/Physics/Demagnetization.htm>
- [27] MAGNAFLUX. *MAGNETIC PARTICLE INSPECTION REFERENCE GUIDE*. 2011.
- [28] *Magnetic Particles* [online]. [vid. 2020-04-01]. Dostupné z: <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/MagParticle/Equipment/Particles.php>
- [29] *Magnetic particle inspection - MR® Chemie GmbH* [online]. [vid. 2020-04-01]. Dostupné z: <https://www.mr-chemie.de/en/products/magnetic-particle-inspection/description/>
- [30] *Magnetická metoda prášková - WELDINSPECT* [online]. [vid. 2020-03-19]. Dostupné z: https://weldinspect.cz/?page_id=85
- [31] *Examples - Wet Fluorescent* [online]. [vid. 2020-04-01]. Dostupné z: <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/MagParticle/Indications/WetExamples.htm>
- [32] *Zkouška magnetická TECHNTEST* [online]. [vid. 2020-04-01]. Dostupné z: http://www.technotest.cz/zkouska_magneticka
- [33] GROUP, ATG - Advanced Technology. *Přenosné a mobilní generátory, MAGMAN 1500/2000/3000/4000/6000/8000*
- [34] GROUP, ATG - Advanced Technology. *UNIMAG Basic, Typová řada horizontálních magnetických defektoskopů*
- [35] *MT metoda. chemie Pfinder, přístroje a měrky. - PDF Free Download* [online]. [vid. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/19606740-Mt-metoda-chemie-pfinder-pristroje-a-merky-www-ptsndt-com.html>
- [36] GROUP, HELLINNG GMBH. *Test Body according to Berthold*
- [37] *Testovací závaží* [online]. [vid. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://www.ptsndt.com/cs/prodej/mt-zkouseni-magneticke/mt-merky-a-meridla/1318-testovaci-zavazi>

- [38] GROUP, TRANSFLUID. *MB 642 Mobile bending machine*
- [39] *PARKER B100S HAND HELD AC MAGNETIC YOKE - NDT* [online].
[vid. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://www.ndt.com.au/product/parker-b100s/>
- [40] TESYDO, s.r.o. *Inspekční certifikát (FPQR)*

8 Seznam obrázků

Obr. 1 Magnetické pole [6].....	4
Obr. 2 Biot-Savartův zákon [7]	4
Obr. 3 Intenzita magnetické pole v okolí přímého dlouhého vodiče [4]	5
Obr. 4 Pravidlo pravé ruky [8].....	5
Obr. 5 Zobrazení magnetických indukčních čar pomocí železných pilin [4].....	7
Obr. 6 Uspořádání domén ve feromagnetické látce [14].....	9
Obr. 7 Křivka prvotní magnetizace [4].....	10
Obr. 8 Hysterezní smyčka [14].....	10
Obr. 9 Úzká hysterezní křivka [14]	11
Obr. 10 Široká hysterezní křivka [14]	12
Obr. 11 Rozptylové pole nad vadou [1].....	12
Obr. 12 Vliv polohy vady [11]	13
Obr. 13 Vliv tvaru trhliny na velikosti rozptylového pole [1].....	13
Obr. 14 Pólová magnetizace cívkou [2]	14
Obr. 15 magnetizační cívka [17]	14
Obr. 16 Magnetování magnetizačním jhem [2].....	15
Obr. 17 Použití ručního jha [21].....	15
Obr. 18 Cirkulární magnetizace klikového hřídele [22].....	16
Obr. 19 Cirkulární magnetizace přímým průchodem proudu [20]	16
Obr. 20 Cirkulární magnetizace kroužků [20].....	17
Obr. 21 Použití ručních příložných elektrod [20].....	17
Obr. 22 Princip cirkulární magnetizace kroužku pomocí indukce proudu [20]	18
Obr. 23 Kombinovaná magnetizace pomocným vodičem a indukcí proudu v předmětu [11]	19
Obr. 24 Magnetizační proudy [11]	20
Obr. 25 Princip odmagnetování [19]	21
Obr. 26 Demagnetizace cívkou [27].....	22
Obr. 27 Indikace prasklin při barevné kontrole [30]	23
Obr. 28 Fluorescenční indikace praskliny v ložisku [31].....	23
Obr. 29 Vliv velikosti magnetických částic [32]	24
Obr. 30 Zkoušení přenosným proudovým zdrojem pomocí měděných elektrod [16].....	25
Obr. 31 Mobilní proudový zdroj Magman 6000 [33].....	26
Obr. 32 Horizontální magnetický defektoskop UNIMAG Basic [34].....	27
Obr. 33 Luxmetr LXmax 130 [35]	28
Obr. 34 Bertholdova měrka [11].....	28
Obr. 35 Princip Bertholdovy měrky [36].....	29
Obr. 36 Měrka MTU – 3 [11]	29
Obr. 37 Zkušební ocelová deska [37]	30
Obr. 38 Ohýbací stroj MB642 [38].....	30
Obr. 39 Ruční jho Parker B100S [39]	31
Obr. 40 Černý detekční prášek [35].....	31
Obr. 41 Protokol o zkoušce magnetickou metodou práškovou [40]	32