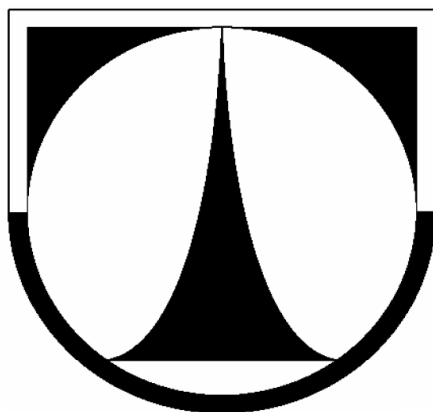


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

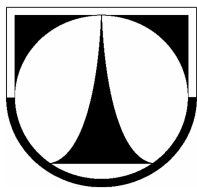
KATEDRA MATERIÁLU



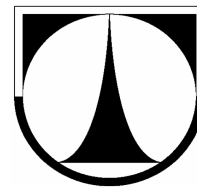
Diplomová práce

2008

JIŘÍ DVOŘÁK



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ
KATEDRA MATERIÁLU



Obor: Materiály a technologie
Zaměření: Materiálové inženýrství

Akustická emise magnetických impulsů metody magnetického bodového pólu

Jiří Dvořák

KMT –M – 240

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Břetislav Skrbek, CSc.

Rozsah práce:

Počet stran: 62
Počet obrázků: 37
Počet tabulek: 5
Počet vztahů: 48

V Liberci dne 22.12.2008

Anotace

1. Seznamte se s principy bezkontaktního ultrazvuku EMAT, akustické emise a metody magnetického bodového pólu.
2. Nalezněte vztahy pro vyvolání mechanických vln magnetickým polem ve feromagnetiku, vypočtěte intenzitu mechanické vlny pro magnetické impulsy vyvolané přístroji typu DOMÉNA.
3. Pokuste se o experimentální snímání mechanických vln vyvolaných magnetickými impulsovémi přístroji řady DOMÉNA. Zhodnoťte možnosti aplikací a dalšího vývoje.

Klíčová slova

Magnetické pole, magnetická strukturoskopie, metoda magnetického bodového pólu, ultrazvuk, akustická emise.

Annotation

1. Get acquainted with principles of the contactless supersound EMAT, acoustic emission and methods of magnetic point pole.
2. Find the relations for invocation of mechanic waves by a magnetic field in a ferromagnetic body. Calculate the intensity of the mechanic wave for magnetic pulses evoked by the DOMÉNA type apparatuses.
3. Attempt to an experimental wave reading of mechanic waves evoked by the magnetic DOMÉNA type apparatuses. Evaluate a chances of the future development and applications.

Key words

Magnetic field, magnetic strukturoscopy, method of magnetic point pole, supersound, acoustic emission.

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou 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 diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou 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.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce.

V Liberci, dne: 22. 12. 2008

Podpis:

Poděkování

Děkuji Doc. Ing. Břetislavu Skrbkovi, CSc za vedení diplomové práce, dále děkuji Ing. Michalu Landovi, CSc z Ústavu termomechaniky Akademie věd v Praze za významnou pomoc při realizaci experimentu ohledně snímání akustické emise magnetických impulsů metody bodového pólu a Doc. Ing. Jiřímu Rezovi, CSc z VUT Brno za věcné připomínky k elektrotechnickému problému této práce.

OBSAH

1.0 Úvod	11
2.0 Cíle práce	11
3.0 Teoretická část	12
3.1 Základní přehled jednotlivých NDT metod	12
3.1.1 Zkoušky ultrazvukem	13
3.1.2 Zkoušky prozařovací	14
3.1.3 Magnetická metoda prášková	15
3.1.4 Zkoušky magnetické indukční	17
3.1.5 Zkoušky kapilární	17
3.2 EMAT – elektromagnetický akustický měnič	18
3.3 Akustická emise	23
3.4 Strukturoskopie	29
3.4.1 Akustické metody zkoušení	29
3.4.2 Metoda vířivých proudů	31
3.4.3 Magnetické metody	33
3.4.3.1 Metoda měření permeability	33
3.4.3.2 Měření koercitivity	34
3.4.3.3 Měření remanentní indukce	34
3.5 Magnetické pole	35
3.5.1 Historie	35
3.5.2 Popis magnetického pole	36
3.6 Rozdělení látek podle jejich chování v magnetickém poli	37
3.6.1 Diamagnetické látky	38
3.6.2 Paramagnetické látky	38
3.6.3 Feromagnetické látky	38
3.7 Metoda magnetického bodového pólu	39
3.7.1 Princip měření metodou magnetického bodového pólu	40
3.7.2 Charakteristika a popis přístroje DOMÉNA B3.b	41
3.7.3 Postup měření přístrojem DOMÉNA B3.b	42
3.7.4 Moderní koncepce strukturometru DOMÉNA	43
3.7.5 Impulsní magnetování a analýza proudového signálu	44
3.7.6 Technické parametry zařízení	47
3.7.7 Rozklad proudového pulsu na harmonické složky	48
3.7.8 Rozložení magnetického pole v materiálu u bodového pólu	49
3.8 Jevy související se vznikem mechanické vlny	51
3.8.1 Lorentzova síla	51
3.8.2 Magnetostrikce	52
3.8.3 Pohyby Blochových stěn	52
3.9 Magnetomechanický jev	53
4.0 Pohybová rovnice mechanické vlny	54
4.1 Útlum vln ve struktuře	55
5.0 Experimentální část	56
5.1 Vzorky materiálu	56
5.2 Měřicí přístroje a pomůcky	57
5.3 Postup měření a snímání AE	57
5.4 Akusticko-emisní spektrogramy	58
6.0 Vyhodnocení a závěr	60
7.0 Seznam literatury	62

Seznam použitého značení

a	[-]	vnitřní konstanta přístroje DOMÉNA
α	[dB/mm]	koeficient útlumu mechanické vlny
α_1	[-]	koeficient vyjadřující vztah mezi parametry magnetovacího obvodu
α_2	[-]	koeficient vyjadřující vztah mezi parametry magnetovacího obvodu
α_p	[dB/mm]	koeficient útlumu mechanické vlny vlivem absorpce
α_r	[dB/mm]	koeficient útlumu mechanické vlny vlivem rozptylu
B	[T]	magnetická indukce
B_0	[T]	magnetická indukce vakua
$B(0)$	[T]	magnetická indukce na povrchu materiálu
B_m	[T]	magnetická indukce ve směru m
B_p	[T]	magnetická indukce v podpovrchové vrstvě materiálu
c	[m/s]	fázová rychlost šíření mechanické vlny
c_{LO}	[m/s]	fázová rychlost šíření podélné vlny v ocelové matici
c_L	[m/s]	fázová rychlost šíření podélné vlny
C	[F]	elektrická kapacita kondenzátoru
d	[m]	tloušťka polovodiče Hallovy sondy
D	[-]	velikost prostoru
E	[MPa]	Youngův modul pružnosti
f	[Hz]	frekvence
F	[N]	Lorentzova síla
ϕ	[Wb]	magnetický indukční tok
γ	[S/m]	měrná elektrická vodivost
$H(0)$	[A/m]	intenzita magnetického pole na povrchu materiálu
H_1	[A/m]	intenzita magnetického pole budící cívky
H_2	[A/m]	intenzita magnetického pole vířivých proudů
H_c	[A/m]	koercitivní intenzita magnetického pole
H_r	[A/m]	remanentní intenzita magnetického pole
H_p	[A/m]	intenzita magnetického pole v podpovrchové vrstvě materiálu
i_1	[A]	proud tekoucí budící cívkou
I	[A]	elektrický proud
j_0	[A/m ²]	hustota vířivých proudů na povrchu materiálu
j	[A/m ²]	hustota vířivých proudů
J	[A/m ²]	magnetická polarizace
k_α	[-]	koeficient útlumu
k_f	[-]	koeficient frekvence
κ_m	[-]	magnetická susceptibilita
κ_{ijm}	[-]	koeficienty magnetostrikce
L	[H]	indukčnost cívky
L'	[m]	tloušťka stěny
L_u	[m]	ultrazvuková dráha
λ	[m]	vlnová délka
m	[kg]	hmotnost
m'	[-]	vnitřní nekorigovaná intenzita magnetického pole bodového pólu
M	[A/m]	magnetizace
M_0	[A/m]	magnetizace etalonu

μ'	[-]	koeficient příčné kontrakce (Poissonova konstanta)
μ	[H/m]	magnetická permeabilita
μ_0	[H/m]	permeabilita vakua
μ_r	[-]	poměrná permeabilita
n	[z/mm]	závitová hustota cívky
n'	[-]	řád tenzoru
N	[-]	počet závitů cívky
P	[-]	počet složek tenzoru
q	[Ω]	elektrický náboj
R	[Ω]	elektrický odpor
R'	[%]	odraz akustického tlaku mechanické vlny
R_H	[Ω]	Hallova konstanta
ρ	[kg/m ³]	hustota
T_{ij}	[MPa]	tenzor napětí
u	[m]	výchylka atomů z rovnovážné polohy
U	[m]	amplituda výchylky atomů z rovnovážné polohy
U'	[V]	napětí na snímači akustické emise
U_H	[V]	Hallovo napětí
U_0	[V]	nabíjecí napětí na kondenzátorech
v	[m/s]	rychlost pohybu elektrického náboje
ω	[Hz]	úhlová frekvence
ξ	[A/mm]	koeficient útlumu vířivých proudů
t	[s]	čas
Z	[MPa/s]	vlnový odpor
Z_g	[MPa/s]	vlnový odpor grafitu
Z_m	[MPa/s]	vlnový odpor matrice litiny

1.0 Úvod

S rostoucími nároky, jež jsou v současnosti kladeny na kvalitu výrobku i na produktivitu práce, je třeba stále zdokonalovat techniku kontroly. Ta by měla zaručit jakost výrobku v souladu s technickými požadavky, podobně jako jeho provozní spolehlivost a životnost.

V současné době se stále více uplatňují způsoby kontroly, při nichž nedochází k destrukci kontrolovaného výrobku. Nedestruktivní metody jsou schopny odhalit skryté vnitřní vady, které nelze zcela eliminovat ani použitím nejmodernějších výrobních technologií. Tím lze předejít vzniku možných havárií a ušetřit tak náklady na jejich odstranění. Další nespornou předností těchto metod je i relativně velká rychlost vyhodnocení, jež může v některých případech zaručit až 100% kontrolu výrobků a to i v hromadné výrobě. Zatímco klasická defektoskopie je v dnešní době již dostatečně prozkoumána a její metody náležitě popsány, oblast nedestruktivní materiálové diagnostiky se neustále vyvíjí.

Právě do oblasti strukturoskopie patří i metoda magnetického bodového pólu, která pracuje na základě souvislosti mezi magnetickými vlastnostmi a strukturně-mechanickým stavu materiálu. Nevýhodou je omezení aplikace pouze na feromagnetické materiály. Tato metoda se již v mnoha slévárnách v ČR používá, a to zejména k měření tvrdosti odlitků. Nebylo však ještě zkoumáno použití této metody jako zdroje akustické emise, zda mechanické vlny vznikající magnetickými impulsy mohou dosahovat ultrazvukových frekvencí. Rovněž tak otázka, zda tato metoda může být uplatněna v ultrazvukové defektoskopii, není dosud zodpovězena.

2.0 Cíle diplomové práce

Cíle této diplomové práce jsou následující:

4. Seznamte se s principy bezkontaktního ultrazvuku EMAT, akustické emise a metody magnetického bodového pólu.
5. Nalezněte vztahy pro vyvolání mechanických vln magnetickým polem ve feromagnetiku, vypočítejte intenzitu mechanické vlny pro magnetické impulsy vyvolané přístroji typu DOMÉNA.
6. Pokuste se o experimentální snímání mechanických vln vyvolaných magnetickými impulsovémi přístroji řady DOMÉNA. Zhodnoťte možnosti aplikací a dalšího vývoje.

Poznámka

Na základě vyjádření vedoucího DP nebylo měření přístrojem řady CASTA prováděno.

3.0 Teoretická část

Teoretická část diplomové práce především věnuje pozornost seznámení se s principy činnosti bezkontaktního ultrazvuku EMAT, akustické emise a metodě magnetického bodového pólu a doplňkově jsou popsány základní metody nedestruktivního zkoušení. Dále je v souvislosti s problematikou magnetického bodového pólu pojednáno také o magnetickém poli, feromagnetických látkách o problematice impulsního magnetování a nakonec o akustické emisi.

3.1 Základní přehled jednotlivých NDT metod

Nedestruktivní testování (NDT) se skládá ze dvou základních oblastí, a sice z defektoskopie a strukturoskopie. Defektoskopie se zabývá indikací vnitřních, podpovrchových či povrchových vad materiálu.

Vadou výrobku se obecně rozumí každá odchylka složení, struktury a vlastností výrobku od jeho charakteristik předepsaných technickými podmínkami, normami nebo smluvním vzorkem.

V defektoskopii se z metod zkoušení používají zkoušky ultrazvukem, prozařovací zkoušky s využitím rentgenova či gama záření, zkoušky magnetické (metoda magnetická prášková a indukční), kapilární, vizuální a zkoušky těsnosti (LT).

Obecně platí pravidlo, že žádná z těchto metod není univerzální, každou z nich lze aplikovat pouze na určité typy vad. Někdy je nutné pro správné posouzení zkoušeného předmětu použít kombinaci určitých zkoušek.

Jejich výběr závisí především na typu, tvaru, orientaci a umístění vady v materiálu, na druhu materiálu zkoušeného předmětu, na tvarové členitosti předmětu, atd.

3.1.1 Zkoušky ultrazvukem (UT)

Ultrazvuk je mechanické vlnění šířící se hmotným prostředím o frekvenci nad 20 kHz. Ke zkoušení se využívá pásmo frekvencí v rozmezí 1 až 10 MHz i více (podle vlnové délky). Ultrazvukové vlny jsou buzeny piezoelektrickými nebo elektrostričními destičkami a využívají se vlny podélné i příčné. Podélné vlny se mohou šířit v prostředí pevném, kapalném i plynném. Naproti tomu příčné vlny se mohou šířit pouze v prostředí pevném (modul $G \neq 0$) rychlostí asi poloviční ve srovnání s podélnými vlnami. Rychlost podélných UZ vln v oceli činí kolem 5 900 m/s.

$$\text{Vlnová délka: } \lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

kde: c ...fázová rychlost šíření vlny

f ...frekvence UZ vln

λ ...vlnová délka vlny

Zkouší se pomocí ultrazvukových sond, které mohou být podle konstrukčního uspořádání přímé nebo úhlové. Je možné použít dvou způsobů zkoušení – metody odrazové a průchodové.

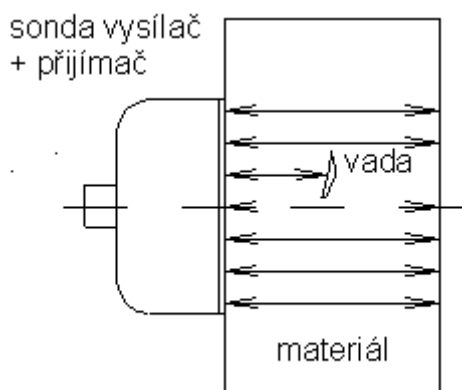
Podmínkou zjistitelnosti vady ultrazvukem je dostatečný odraz ultrazvukových vln na vadě. V materiálu lze zjistit vadu, jejíž rozměr kolmý na směr šíření vln je větší než poloviční délka vlny. V opačném případě je vada nezjistitelná.

Princip zkoušení

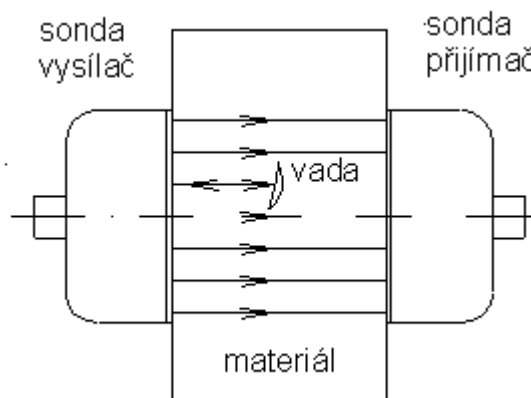
Odrazová metoda využívá jedné sondy, která pracuje střídavě jako vysílač a zároveň jako přijímač vln. Na rozhraní mezi sondou a povrchem materiálu je nutno zabezpečit průchod ultrazvukových vln vhodnou přechodovou látkou (např. voda, olej, vazelína), aby nedocházelo k úplnému odrazu vln. Sonda vysílá do zkoušeného materiálu svazek ultrazvukových vln, jenž se odráží od protilehlého povrchu a jsou přijaty zpět. Je-li v materiálu vada, pak sonda přijme pouze část vyslaného svazku vln. Případná vada se zobrazí na obrazovce osciloskopu formou poruchového echa.

Průchodová metoda využívá dvou sond, umístěných proti sobě na obou stranách materiálu. První sonda vysílá svazek ultrazvukových vln, které jsou po průchodu materiálem

přijímány druhou sondou. Není-li v materiálu vada, pak přijímací sonda přijme 100% svazku ultrazvukových vln. V případě existence vady přijme jen část vyslaného svazku vln a vada se opět zobrazí na osciloskopu formou poruchového echa. Nevýhodou je, že neumožňuje přesnou lokalizaci vady v materiálu oproti odrazové metodě.



Obr. 1-Metoda odrazová



Obr. 2-Metoda průchodová

Aplikace

Zkoušení ultrazvukem umožňuje spolehlivé zjištění vnitřních vad u výkovků, vývalků a tlustostěnných odlitků z oceli (bubliny, póry, staženiny, struskové vměstky, zavaleniny). Není vhodná pro indikaci povrchových a podpovrchových vad (kvůli mrtvé zóně přístroje).

Výhody: pohotovost, nízké náklady, velké možnosti mechanizace a automatizace v seriové výrobě, progresivní metoda.

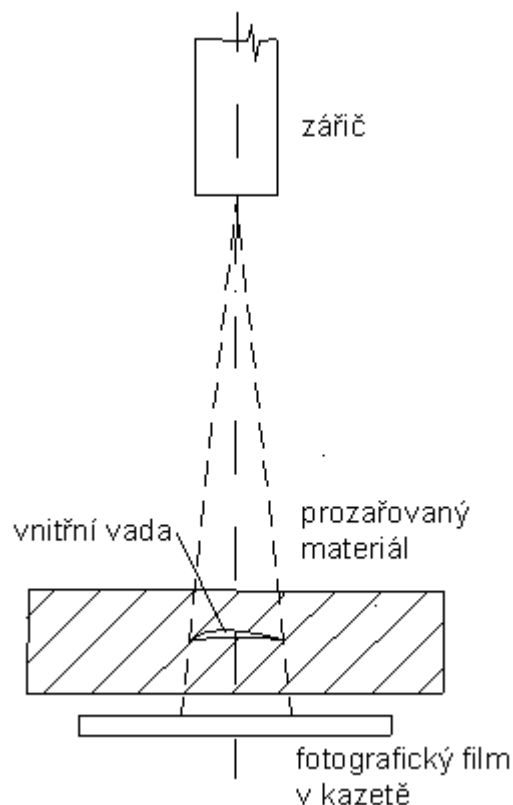
Nevýhody: obtíže při zkoušení tvarově složitých a členitých předmětů, velký útlum ultrazvukových vln v grafitických litinách (z důvodu vlivu heterogenní struktury).

3.1.2 Zkoušky prozařovací (RT)

Tyto zkoušky pracují na principu prozařování zkoušeného materiálu rentgenovým nebo gama zářením. Obě záření jsou elektromagnetická, s vysokou energií a velmi krátkou vlnovou délkou. Běžně se rtg záření získává v rentgence při prudkém zabrždění urychlených elektronů emitovaných katodou na anodě, při větším požadavku pronikavosti záření se

získává v lineárních urychlovačích, případně kruhových urychlovačích (betatronech). Vlnová délka se pohybuje řádově 10^{-8} až 10^{-11} m.

Gama záření má vlnovou délku přibližně o čtyři řády nižší než rtg záření a vzniká při rozpadu radioaktivních izotopů. Oproti rtg záření se vyznačuje vyšší energií a výraznější pronikavostí (tedy tvrdostí).



Princip metody

Rentgenka nebo zářič vysílají rtg nebo gama záření na zkoušený předmět, záření prochází celou tloušťkou materiálu a po průchodu se zachycuje na fotografický film v kazetě. Prošlé záření působí na citlivou vrstvu fotografického filmu na základě fotochemického principu a vzniká fotografický záznam – radiogram.

Radiogram musí mít vyhovující jakost, kontrast a schopnost rozlišení skrytých vad. Při prozařování oceli nad 10 mm tloušťky je třeba zesilovacích folií, které zvyšují ostrost radiogramu (zejména kovové folie).

Na radiogramu se vyhodnocuje druh, velikost a četnost jednotlivých vad.

Obr. 3-Princip prozařovací zkoušky

Aplikace

Prozařovací zkoušky jsou vhodné pro detekci prostorových vnitřních vad u odlitků (zejména bubliny, póry, staženiny), ale též pro kontrolu neprovařeného kořene svarů. Prokazování plošných vad (u výkovků a vývalků) je málo spolehlivé.

3.1.3 Magnetická metoda prášková (MT)

Tato metoda se používá k indikaci necelistvostí materiálu souvisejících s povrchem (trhliny, studené spoje ve svařích), případně podpovrchových vad.

Významnou nevýhodou je omezení metody pouze na předměty z feromagnetických materiálů.

Princip metody

Povrchové či podpovrchové vady zkoušeného materiálu se indikují na základě změny magnetického toku v předmětu, jenž je předem zmagnetován. V místě výskytu vady dochází ke zhuštění a zakřivení siločar magnetického pole, zvyšuje se magnetický odpor. Část siločar vystupujících na povrch způsobí vznik rozptylového magnetického toku, jenž vytvoří na obvodu vady magnetické póly.

Maximální rozptyl magnetického toku nastává na povrchu předmětu, směrem od povrchu k jádru výrazně klesá. Rozptyl je obecně dán velikostí, tvarem, umístěním defektu, způsobem magnetování, volbou magnetovacího proudu a orientací magnetického toku vůči defektu.

K indikaci míst rozptylového magnetického toku se používá suchého feromagnetického prášku (železné piliny), nebo detekční kapaliny, v níž je prášek rozptýlen (řídský olej). V místech vystupujícího rozptylového toku se feromagnetické částičky zachytí a tím je zobrazen průběh vady.

Nejprve je třeba zkoušený předmět vhodně zmagnetovat, aby v daném předmětu byly indukční siločáry orientovány kolmo na směr předpokládané vady.

Materiál lze magnetovat následujícími způsoby:

1. Průchodem proudu

Proud prochází obvykle přímo zkoušeným předmětem, nebo pomocným vodičem.

Tím vzniká cirkulární magnetické pole, ve kterém se indikují vady rovnoběžné se směrem procházejícího proudu.

2. Magnetizačním jhem

Předmět se vloží mezi póly magnetizačního jha, vzniklý magnetický tok prochází rovnoběžně se spojnicí pólů jha. Tímto způsobem magnetování se zjišťují vady orientované kolmo na směr magnetického pole.

3. Magnetování cívkou

Zkoušený předmět se vkládá do dutiny cívky, kterou prochází proud. Takto se indikují vady orientované kolmo na osu cívky.

3.1.4 Zkoušky magnetické indukční

Těmito zkouškami se zjišťují zejména povrchové vady hutních výrobků kruhového průřezu (tedy tyče, dráty, trubky).

Zahrnují dvě metody:

1. Indikace rozptylového magnetického toku nad vadou ve zmagnetovaném předmětu.

Princip je obdobný jako u magnetické metody práškové. Rozptylové magnetické toky se zjišťují elektromagnetickými snímači, které se pohybují nad povrchem zkoušeného předmětu a převádějí změny magnetického pole na elektrické impulsy.

Metoda se hodí pouze pro feromagnetické materiály.

2. Měření vodivosti vířivými proudy.

Princip je založen na indukci střídavých proudů v povrchové vrstvě zkoušeného materiálu působením střídavého magnetického pole cívky. Hustota indukovaných střídavých proudů závisí na vodivosti materiálu předmětu. Vady přítomné v povrchové vrstvě materiálu vodivost snižují, což se projeví zpětně změnou elektrického napětí na cívce a tím se vady indikují.

Výhody:

Použitelnost pro feromagnetické i nemagnetické materiály, jednoduchost a rychlost kontroly, možnost automatizace a objektivnost hodnocení.

Poznámka:

U feromagnetických materiálů je nutno snížit vliv magnetických vlastností a tím zvýšit vliv elektrické vodivosti.

3.1.5 Zkoušky kapilární (PT)

Těchto zkoušek se používá ke zviditelnění a indikaci jemných povrchových vad (trhlin).

Princip metody

Založen na využívání kapilárních sil, které umožňují vnikání vhodných indikačních kapalin do povrchových trhlin.

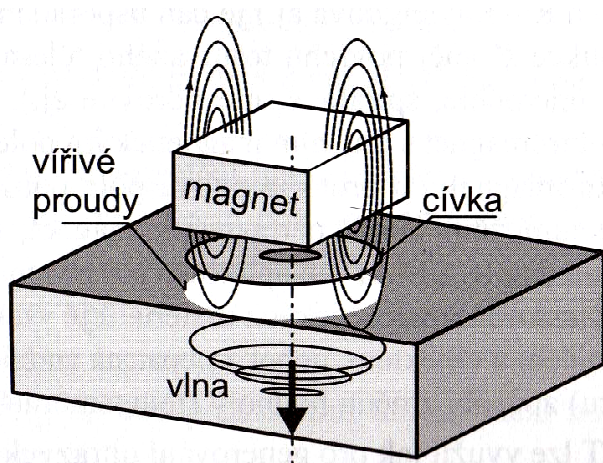
Na povrch zkoušeného předmětu se nanese indikační kapalina, po vniknutí do trhlin se povrch předmětu otře a poté se nanese detekční látka (ve formě prášku nebo suspenze). Detekční látka nasává indikační kapalinu z trhliny a změnou barvy zviditelňuje příslušnou vadu.

3.2 EMAT – Elektromagnetický akustický měnič

Jedná se o progresivní metodu bezkontaktního zkoušení ultrazvukem bez akustické vazby s použitím sond EMAT.

Tato metoda pracuje jen ve vodivých a feromagnetických materiálech a oproti klasickým piezoelektrickým sondám umožňuje řadu aplikací, které jsou u klasických ultrazvukových metod a metody magnetického bodového pólu problematické či velmi obtížně realizovatelné. Jde však o aplikace speciálního charakteru, metoda obecně nenahrazuje klasické ultrazvukové zkoušení.

Princip měniče EMAT



Sonda je opatřena magnetovací cívkou, orientovanou rovnoběžně s povrchem vodivého vzorku, který je měřen. Čelo sondy se přiblíží k povrchu vzorku na vzdálenost několik desetin mm až 2 mm, přičemž tato vzdálenost musí být přesně zachována (obvykle pomocí mechanického přípravku s vodicími kolečky). Cívka elektromagnetu je napájena proudovými

Obr. 4-Princip měniče EMAT

impulsy, jež v materiálu vzorku vyvolají magnetické pole o indukci B . Časově proměnné magnetické pole indukuje v povrchu vzorku vířivé proudy, které

vybudí časově proměnný magnetický tok, jenž působí proti proudu tekoucímu cívkou.

Magnetické pole působí na sondu Lorentzovou silou, která ji přitahuje k povrchu materiálu. Časově proměnná Lorentzova síla způsobí rozkmitání atomů krystalové mřížky zkoušeného materiálu a tím se vzbudí ultrazvuková vlna, která se posléze šíří materiálem. Typ vybuzečné ultrazvukové vlny závisí především na orientaci magnetického pole vzhledem k povrchu vzorku a na konstrukčním provedení elektromagnetu sondy EMAT.

Za předpokladu nulového vektoru intenzity elektrického pole je vektor Lorentzovy síly dán vztahem:

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (2)$$

Na základě hustoty vířivých proudů indukovaných magnetickým polem je lepší uvažovat vektor Lorentzovy síly ze vztahu $\vec{F} = \vec{j} \times \vec{B}$.

Odezva ultrazvukové vlny se registruje na základě napětí indukovaného na snímací části magnetovací cívky, případně na samostatné snímací cívce (pokud je sonda provedena jako dvouměničová). Velikost napětí pak odpovídá intenzitě budícího magnetického pole.

Zásadní výhody

1. Sonda pracuje bez použití kontaktní nebo kapalinové vazby. Mezera mezi povrchem zkoušeného materiálu a sondou chrání sondu proti opotřebení.
2. EMAT může pracovat při vysokých teplotách. Sondu je možné aktivně chladit studeným vzduchem, aniž by vzduch měl negativní vliv na přenos ultrazvukového signálu. Rovněž umožňuje zkoušet objekty pohyblivé a s hrubým povrchem.
3. Konstrukcí měniče lze dosáhnout požadovanou fokusaci ultrazvukového svazku.

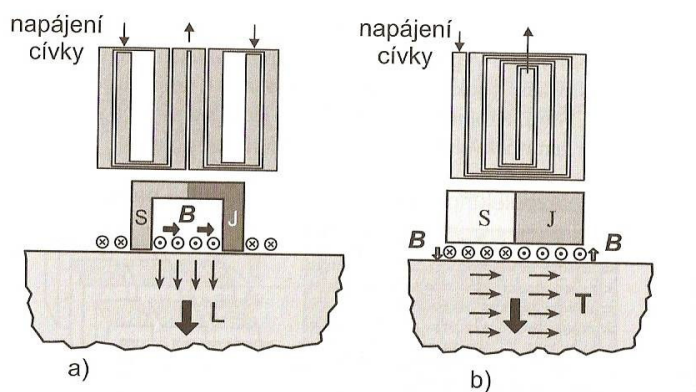
Nevýhody

1. Významnou nevýhodou je omezení aplikace pouze na vodivé prostředí a feromagnetické materiály.
2. Velmi slabý signál pro zkoušení v současnosti požadovaných kritérií vad. Proto se zatím používá jen při specifických aplikacích a obecně nenahrazuje klasické ultrazvukové zkoušení.
3. Permanentní magnet sondy EMAT působí velkou silou, jež sondu přitahuje k materiálu. Může však být nahrazen elektromagnetem (vhodné při vysokých teplotách měření).
4. V porovnání s piezoelektrickými měniči má podstatně nižší účinnost (vazby magnetické pole-ultrazvuk).

Typy ultrazvukových vln generovaných sondami EMAT

Sondy nejčastěji generují příčné a podélné vlny. Příčné vlny vznikají v případě, kdy je magnetické pole orientováno kolmo k povrchu vzorku a vlny se šíří rovnoběžně s povrchem vzorku.

Podélné vlny jsou buzeny v případě, kdy je magnetické pole rovnoběžně orientované s povrchem vzorku a vlny se šíří kolmo k povrchu vzorku, jak je uvedeno na obrázku 5 níže. Sondy umožňují generovat též Rayleighovy a Lambovy vlny, které jsou však méně časté. Je-li cívka elektromagnetu meandrová, pak umožňuje generovat povrchové vlny.



Obr. 5-Konstrukční provedení elektromagnetu

Je-li elektromagnet uspořádan podle obrázku a), pak sonda generuje podélné, tedy longitudinální vlny, v případě provedení b) sonda generuje příčné, tedy transverzální vlny.

Možnosti aplikací EMAT

1. Zkoušení ocelových tyčí

Metoda je vhodná pro zkoušení tyčí kruhového a čtvercového průřezu, zároveň umožňuje zkoušení při vyšších teplotách ve výrobě.

2. Zkoušení trubek

Měření defektů trubek a tloušťky stěny trubek za vyšších teplot ve výrobě.

3. Zkoušení tlakových nádob

Umožňuje zkoušení tlakových nádob v procesu výroby.

4. Zkoušení při inspekci

Zde se používají přenosné přístroje, především ke zkoušení tepelných výměníků v elektrárnách. Dále ke zkoušení trubek horkovodních potrubí za tepla i s velmi nekvalitním povrchem.

5. Sondy EMAT umožňují měření při vysokých teplotách, byly realizovány zkoušky při teplotách 370°C.

Generátory EMAT

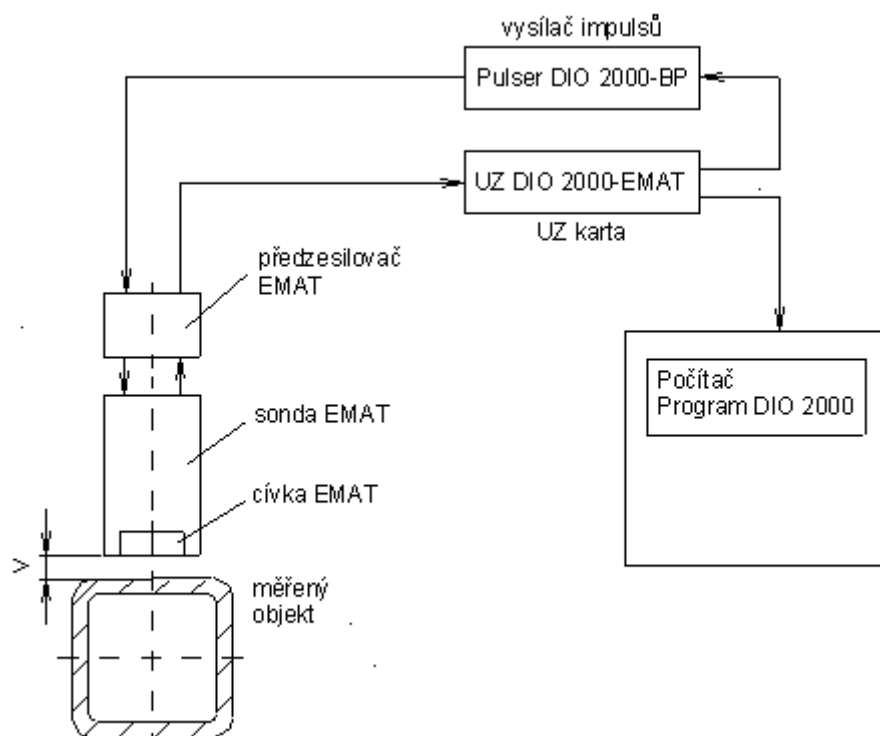
Vzhledem k existenci konstantní mezery mezi čelem sondy a povrchem materiálu dochází ve vzduchu k velmi výrazným rozptylům magnetického toku, což významně snižuje účinnost zařízení a omezuje hloubku vniku vířivých proudů do materiálu. Vířivé proudy se indukují prakticky jen v podpovrchové vrstvě, zasahují do hloubky kolem 60 μm (v závislosti na velikosti magnetovacího proudu). Potřebné parametry jsou následující:

- napětí 900 V,
- doba náběžné hrany 6 ns,
- proud 30 A – 160 A,
- výstupní pulsní výkon 27 kW až 150 kW,
- počet výstupních pulsů 1 až 20.

Soustava pro měření sestává z těchto komponent:

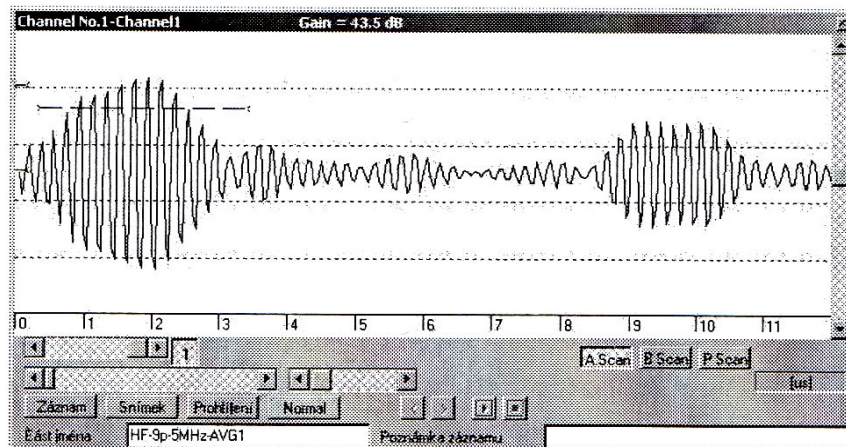
- sonda EMAT s interním předzesilovačem,
- pulser DIO2000-BP,
- UZ karta DIO2000-EMAT,
- počítač s programem DIO2000.

Blokové schema zapojení soustavy pro měření metodou EMAT je znázorněno na obr. 6:



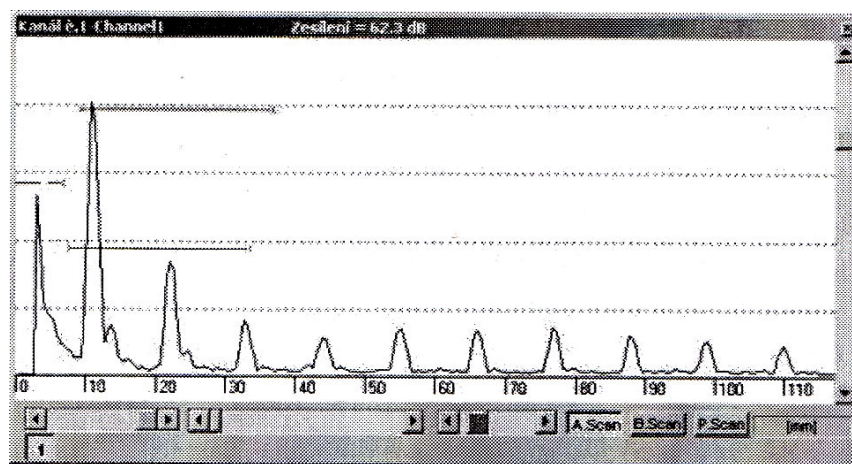
Obr. 6-Blokové schema soustavy zapojení EMAT

Výstupní signál je vzhledem k impulsnímu napájení magnetovací cívky tvořen jednotlivými časově oddělenými kvanty a má nespojitý charakter, jak ukazuje obr. 7. V tomto případě jde o ukázkou vysokofrekvenčního signálu o frekvenci 5 MHz.



Obr. 7-Časový průběh signálu EMAT

Ultrazvukový záznam pořízený na obrazovce osciloskopu může vypadat např. podle obrázku 8. Platí pro ocelovou desku o tloušťce 10 mm.



Obr. 8-Záznam z osciloskopu

Poznámka:

Bohužel se nepodařilo zjistit informace o charakteru magnetovacího proudu, parametrech cívky a intenzitě magnetického pole, jelikož Ing. Štarman odmítl poskytnout o této problematice bližší informace z důvodu firemního tajemství.

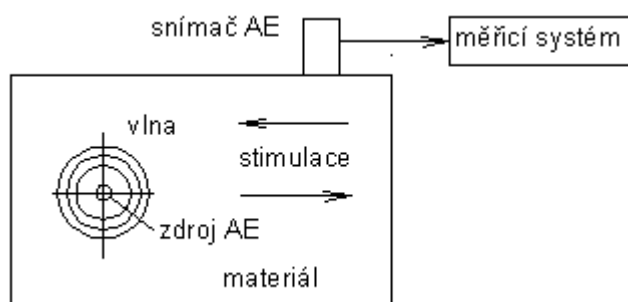
3.3 Akustická emise

Je dlouho známou skutečností, že tyčinky čistého cínu při deformaci ohybem vydávají slyšitelně krátké, akustické pulsy. Tento jev začali před r. 1950 studovat moderními prostředky J. Shockley a J. Kaiser. Jev byl poté nazván akustická emise.

Fyzikální podstata a charakteristika akustické emise

Akustická emise je fyzikální jev, při němž vznikají v pevných látkách při jejich namáhání vnitřní pružné napěťové vlny, uvolněné dynamickou změnou struktury.

K akustické emisi dochází ve zdroji akustické emise při uvolnění energie působením stimulace vnitřními nebo vnějšími silami. Zdroje akustické emise v molekulárním měřítku jsou procesy při vzniku a zániku šíření poruch, dále dislokace, fázové transformace, vnitřní tření, tvorba a šíření trhlin, apod. Zdroje v makromolekulárním měřítku jsou zejména kavitační procesy v hydrodynamických systémech, turbulence při úniku kapaliny z potrubí. Energie uvolněná těmito procesy se transformuje na mechanický napěťový impuls, jenž se šíří materiálem jako elastická napěťová podélná či příčná vlna.



Obr. 9-Schema principu AE

Jakmile vlna dorazí na povrch materiálu (tedy na rozhraní materiálu se vzduchem), dochází částečně k jejímu odrazu a částečně k její transformaci na jeden či více módů. Vlna se pak dále šíří převážně Rayleighovou, tedy povrchovou vlnou. Kromě této vlny dochází také k transformaci např. na Lambovy, tedy deskové vlny. Jednotlivé typy vln se šíří materiálem různou fázovou rychlostí.

Elektrický signál detekovaný na snímači akustické emise se označuje jako signál akustické emise. Složka vlny je detekována piezoelektrickým snímačem v určitém rozsahu frekvencí, přičemž rezonanční frekvence snímače leží nad měřeným spektrem akustické emise. Šířící se mechanická vlna interaguje se strukturou materiálu a dochází k jejímu útlumu, proto bývají moderní snímače vybaveny předzesilovačem signálu. Tyto snímače umožňují vyhodnocovat

např. dislokace v materiálu o velikosti řádově 10^{-14} m nebo umožňují zachycovat výchyly částic z rovnovážné polohy řádově na atomární úrovni.

Z důvodu bezdrátového přenosu energie vlny z povrchu materiálu do snímače se používá vazební prostředí (vazelína, olej, suspenze). Akustickou emisi lze také snímat metodou EMAT. V tomto případě se signál snímá pomocí magnetovací cívky, na níž se indukuje příslušné napětí, které odpovídá intenzitě emisní události.

Aplikace akustické emise

Akustickou emisi lze obecně považovat za univerzální diagnostickou metodu. Jde o velmi citlivou metodu ke zjišťování vzniku, vývoje a šíření aktivních poruch v materiálu. Často slouží k detekci předhavarijních stavů strojních součástí a konstrukcí (kovových i betonových).

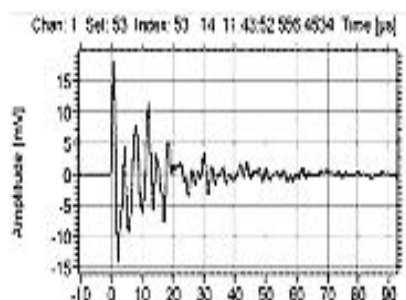
V technické diagnostice se metoda akustické emise používá při monitorování úniků média z potrubních systémů, stavu skladovacích nádrží, při kontrole tlakových zásobníků, cisteren, při detekci a lokalizaci vznikajících mikrotrhlin ve stěnách tlakových nádob a potrubí, u leteckých a mostních konstrukcí. Nachází uplatnění také v textilním průmyslu při hodnocení textilních vláken (např. hodnocení vnitřního tření), dále ke zjišťování anizotropie pevných látek. Lze ji využít při únavových materiálových zkouškách a destrukčních testech. Může sloužit také v oblasti obrábění k monitorování průběhu opotřebení břitů rezných nástrojů, čímž se zabýval Prof. Žižka na katedře obrábění a montáže.

Mezi výhody patří zejména:

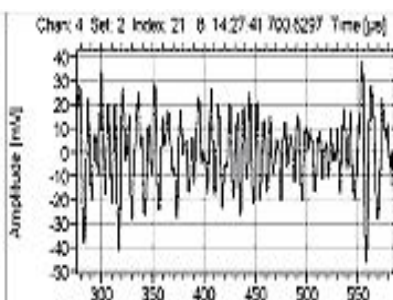
- kontinuální monitorování objektu oproti jiným defektoskopickým metodám
- možnost měření za provozu objektu
- významná úspora času při měření
- detekce vad v celém objemu sledovaného objektu
- vysoká citlivost měření
- univerzální diagnostická metoda.

Mezi nevýhody patří příliš nízká energie jednotlivých kvant akustických pulsů, dosud neobjasněný způsob vzniku emisních kvant, což neumožňuje jednoznačnou interpretaci měření.

Signály akustické emise



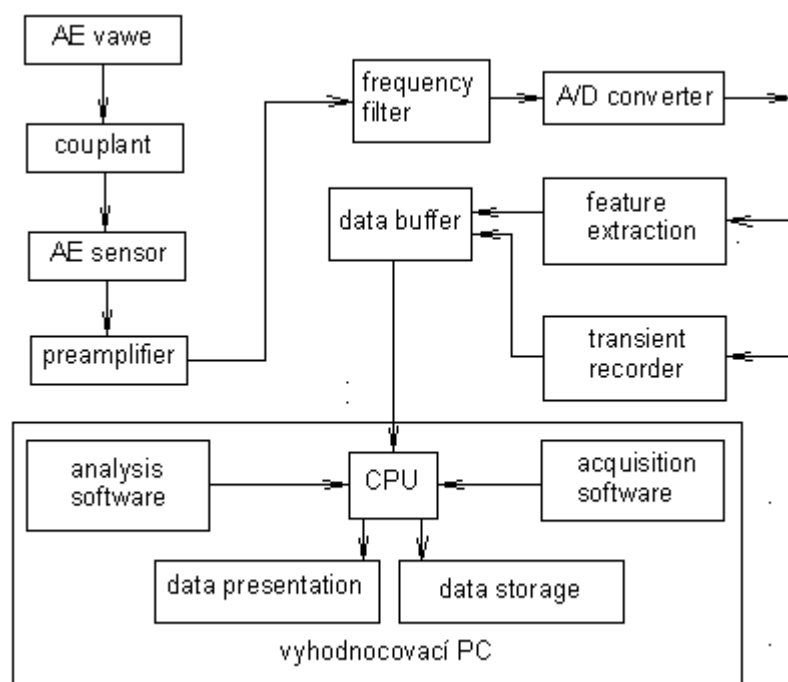
Obr. 10-Nespojitý signál



Obr. 11-Spojité signál

Tyto průběhy se odborně nazývají akusticko-emisní spektrogramy.

Blokové schéma zapojení soustavy pro měření metodou akustické emise je znázorněno na obrázku 12:



Obr. 12-Blokové schéma soustavy pro měření AE

Postup měření

Materiál měřeného objektu je nejprve určitým způsobem namáhán, čímž v určitých místech struktury dojde ke vzniku akustické emise. Akustické vlny se postupně šíří materiálem, až dorazí k piezoelektrickým snímačům. Účelem těchto snímačů je detekce a konverze vln na elektrický signál (obvykle napětí). Následuje převedení elektrického signálu

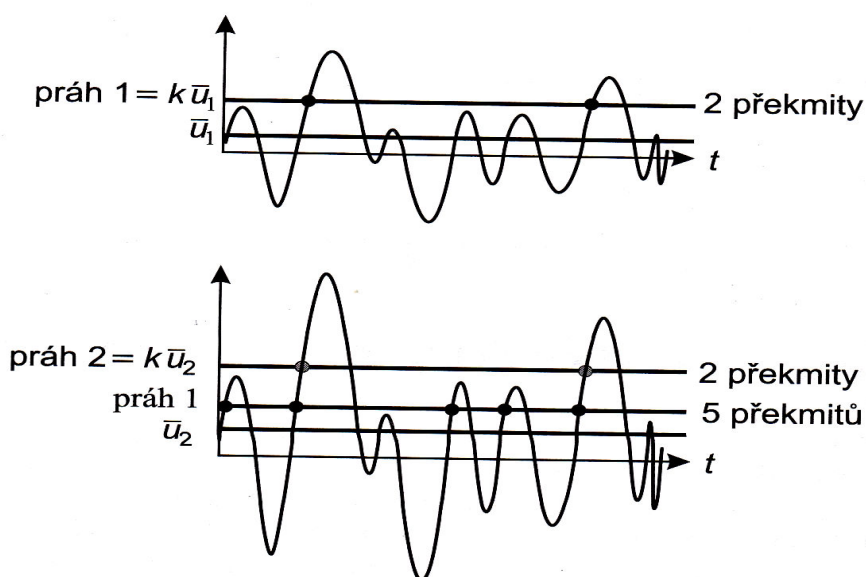
do datové struktury v počítači, kde se realizuje grafické znázornění signálu. Nakonec se signál vyhodnocuje obvykle statistickými metodami (zvláště u kavitačních dějů).

Z hlediska tvaru elektrického signálu se rozlišují dva druhy akustické emise: spojitá a nespojitá (impulsní).

Spojitá akustická emise

Spojitý signál akustické emise je vyvolán událostmi, které nejsou časově oddělené.

Signál může být generován různými fyzikálními jevy, z nichž diagnosticky významné jsou jevy: kavitace v kapalině, plastické deformace povrchu kovů při tření nebo únik kapaliny trhlinou v potrubí nebo nádobě. Na obrázku x níže je zobrazen průběh signálu ze spojité emisní události.



Obr. 13-Průběh spojitého signálu akustické emise

Práh 1 představuje pevně stanovenou úroveň, práh 2 je plovoucí, čili jeho hodnotu lze měnit podle intenzity emisní události.

V případě spojité akustické emise se vyhodnocují tyto parametry:

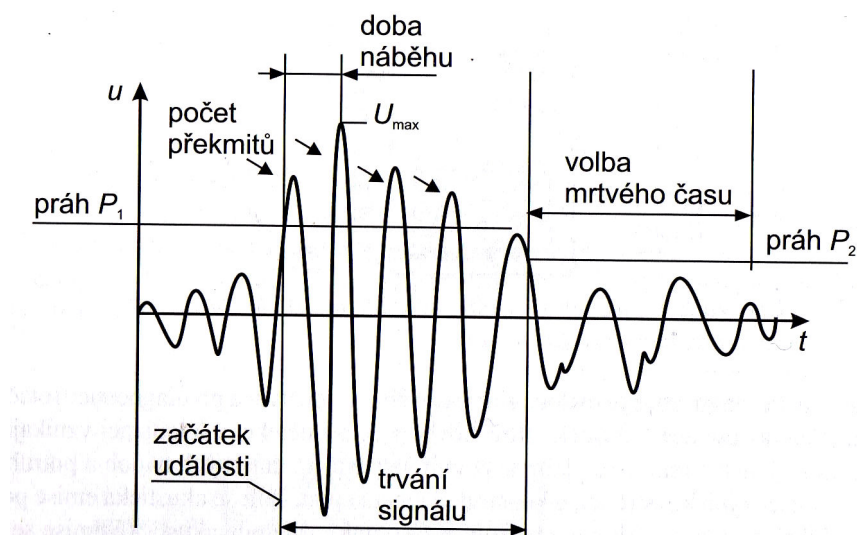
- střední hodnota, efektivní hodnota, maximální hodnota signálu,
- amplitudová distribuční funkce,
- standardní odchylka, rozptyl, vyšší řády momentů,
- histogram amplitud,
- spektrální hustota výkonu,
- četnost překmitů přes prahovou úroveň,

- energie emisních událostí (nelze ji přímo měřit)

Nespojitá (impulsní) akustická emise

Nespojitá akustická emise je vyvolaná časově oddělenými událostmi, které trvají v rozmezí od několika nanosekund do jednotek milisekund. Frekvenční oblast impulsu je teoreticky velmi široká a signál má obvykle podobu tlumených kmitů.

Typickým zdrojem nespojité emise je šířící se trhlina v materiálu.



Obr. 14-Parametry nespojitého signálu akustické emise

Při zpracování nespojitého signálu se vyhodnocují následující parametry:

- četnost nespojité emise (tedy počet událostí za časový interval),
- četnost překmitů přes zvolenou prahovou úroveň,
- čas prvního překročení prahu,
- maximální hodnota signálu,
- doba trvání události,
- doba od překročení prahové úrovně do dosažení maximální amplitudy signálu,
- amplitudové spektrum signálu,
- deformace tvaru impulsu pomocí časově-frekvenčního popisu,
- energie impulsu (nelze přímo měřit)

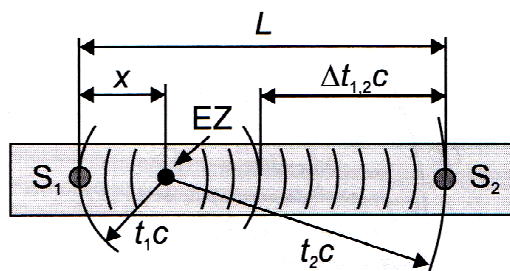
Lokalizace emisních událostí

Při měření akustické emise v praktických aplikacích se obvykle k lokalizaci události používá jednorozměrná nebo dvojrozměrná lokalizace, a to podle tvaru a typu objektu.

Jednorozměrná lokalizace zdroje emisní události

V případě objektů, jež mohou být považovány za jednorozměrné, např. tyče, trubky, svary na desce apod., lze použít tento typ lokalizace. Princip lokalizace spočívá ve změření rozdílu dob Δt začátků událostí z emisního zdroje od dvou senzorů. Poté ze znalosti rozměru L , rozdílu dob Δt a fázové rychlosti vlny lze určit polohu emisního zdroje od snímače. Využívá se dvou snímačů, přičemž vzdálenost mezi nimi musí být v souladu s útlumem vlny v materiálu a citlivostí měřicího systému. Pro vzdálenost x platí vztah $x = (L - \Delta t_{12}c)/2$ (4)

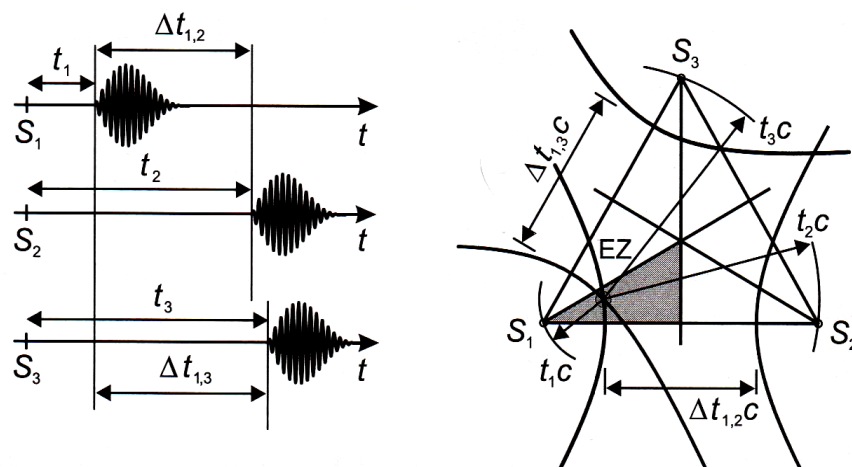
Uvedená lokalizace platí za předpokladů, kdy emisní zdroj leží mezi snímači S_1 a S_2 , snímá se pouze jeden druh vlny a neuvažuje se odraz a disperze vlny.



Obr. 15-Princip jednorozměrné lokalizace

Dvojrozměrná hyperbolická lokalizace emisní události

Při této lokalizaci se používá tří snímačů, obvykle uspořádaných do rovnostranného trojúhelníka. Mezi kterýmikoliv dvěma snímači lze z rozdílu času příchodů vln z emisního zdroje lokalizovat tento zdroj jako místo bodů, jejichž vzdálenost od obou snímačů je konstantní. Emisní zdroj tedy leží na hyperbole, jejíž ohniska jsou dána polohou snímačů a hlavní poloosa má rozměr $\Delta t \cdot c$, viz obr.16. Pokud se emisní zdroj nachází uvnitř trojúhelníka, pak leží na průsečíku hyperbol. Vně trojúhelníka nemusí být určení jednoznačné, přičemž tento nedostatek se řeší přidáním čtvrtého snímače.



Obr. 16-Princip dvojrozměrné lokalizace

3.4 Strukturoskopie

Strukturoskopie se zabývá zkoumáním struktury z hlediska fázové analýzy a krystalické stavby kovů a jejich slitin. Zahrnuje také strukturuometrii, která slouží ke zjišťování chemického složení materiálu.

Lze ji rozčlenit na následující metody:

- akustické metody zkoušení
- metody vířivých proudů
- magnetické metody.

3.4.1 Akustické metody zkoušení

Poněvadž struktura a chemické složení materiálu má značný vliv na některé vlastnosti ultrazvuku při jeho průchodu danou látkou, využívá se změn těchto vlastností k posuzování stavu struktury, popř. chemického složení.

Akustické vlastnosti

Akustické vlastnosti materiálu jsou popsány rychlostí šíření pružného příčného či podélného kmitání atomů kolem jejich rovnovážných poloh a dále jejich útlum.

Pro rychlost podélného šíření zvuku platí vztah:

$$c_L = \sqrt{\frac{E(1-\mu')}{\rho(1+\mu')(1-2\mu')}} \quad (5)$$

kde: E...je Youngův modul pružnosti

ρ ... měrná hmotnost

μ' ...Poissonova konstanta

(součinitel příčné kontrakce)

Prostupnost akustických vln procházejících materiálem klesá s rostoucím útlumem a zejména s množstvím a velikostí vnitřních nespojitostí, čehož se využívá při hodnocení struktury litin.

U grafitických litin představuje grafit ve struktuře významnou vnitřní nespojitost se značně odlišným vlnovým odporem Z_g vůči ocelové matici Z_m . Vlnový odpor Z lze obecně vyjádřit jako součin fázové rychlosti šíření a hustoty, tedy:

$$Z = c \cdot \rho \quad [\text{MPa/s}]. \quad (6)$$

Čím větší je rozdíl vlnových odporů grafitu a ocelové matrice litiny, tím větší je množství a velikost odrazu R tlaku akustické vlny z rozhraní zpět.

Matematicky vyjádřeno vztahem:
$$R = \frac{(Z_g - Z_m)}{(Z_g + Z_m)} [\%]. \quad (7)$$

Rozhraní matrice-grafit odrazí přibližně 80% tlaku akustické vlny. Přímé šíření akustické vlny litinou je po několika odrazech od útvarů grafitu vyčerpáno a rozptýleno. Velikost dráhy akustické vlny procházející matricí závisí na tvaru a rozmístění grafitu. Čím více grafit oslabuje matici litiny, tím větší je hodnota akustické dráhy L_u ve srovnání s přímou dráhou L . Z uvedeného vyplývá, že rychlost zvuku c_L klesá a lze ji spočítat následovně:

$$c_L = c_{L0} \frac{L'}{L_u} = 5920 \frac{L'}{L_u} [\text{m/s}], \quad (8)$$

kde: c_{L0} ...je rychlost zvuku v ocelové matici litiny [m/s]

L'tloušťka prozvučované stěny, změřená posuvným měřítkem [mm]

L_uhodnota ultrazvukové dráhy [mm].

Poznámka: Z hlediska fyziky je správnější nazývat vlnu šířící se v pevné látce spíše mechanickou než akustickou.

Útlum amplitudy akustických vln α výrazně roste, pokud se vlnová délka λ blíží k velikosti útvarů grafitu l. Platí:
$$\alpha = k_\alpha L \left(\frac{c_L}{\lambda} \right)^2 [\text{dB/mm}]. \quad (9)$$

Většinu odlitků lze charakterizovat vlastní rezonanční frekvencí f_r , která se obvykle nalézá

ve slyšitelném pásmu a platí:
$$f_r = k_f \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}} \cdot \frac{D}{H^2} [\text{Hz}], \quad (10)$$

kde poměr D/H ...je geometrická štíhlost.

Fázová rychlost zvuku c_L přímo závisí na hodnotě Youngova modulu pružnosti.

Metody zkoušení

Pokud se odlitek testuje kmity generovanými aktivními sondami do lokálních průřezů stěn, jde o ultrazvukové zkoušení a pokud se hodnotí frekvence a útlum vlastních kmitů odlitku, jedná se o akustické rezonanční zkoušení. Oba způsoby zkoušení jsou založeny na interakci struktury materiálu s externě buzeným akustickým vlněním.

U ultrazvukové impulsní metody bývá zdrojem a zároveň detektorem ultrazvukových vln obvykle sonda s kruhovým či obdélníkovým piezoměničem, jenž transformuje elektrickou energii na mechanickou. Ultrazvuk se do stěny odlitku vyzařuje formou krátkých opakovaných impulsů (frekvence impulsů se pohybuje řádově v kHz), nosné vlny mívají frekvenci v jednotkách MHz.

Konkrétní hodnota použité frekvence nosných vln závisí na požadované přesnosti měření (přesnost roste s výškou frekvence) a prozařitelnosti stěny odlitku. Pro litiny s lupínkovým grafitem se používá frekvence maximálně 2 MHz.

Sonda vysílá impuls akustických vln do stěny odlitku, impuls prochází stěnou a po odrazu od protějšího povrchu stěny nebo rozhraní je zpětně přijat. Po převedení na elektrický signál se impuls zobrazí na displeji nebo obrazovce defektoskopu.

K přenosu ultrazvukového vlnění mezi čelem sondy a povrchem odlitku musí být zajištěna akustická vazba kontaktním kapalným médiem (např. vazelína, olej).

Sondy lze podle způsobu a směru vyzařování rozdělit na přímé a úhlové, podle provedení na jednoduché a dvojité.

Zatímco klasická defektoskopie pracuje s parametry odrazových ech vad materiálu, akustická emise pracuje se vzdáleností L_u mezi echy paralelních povrchů stěny odlitku.

Pro získání hodnot L' a L_u potřebných ke stanovení rychlosti zvuku c_L je nutno provést měření pomocí posuvného měřítka a ultrazvuku. Specializované ultrazvukové přístroje měří současně posuvným měřítkem a sondou umístěnou v čelisti měřítka. Potřebu akustické vazby kapalným médiem odstraňuje vynález elektromagnetických ultrazvukových měničů. Tyto měniče využívají Lorenzových sil, které vzniknou ve feromagnetickém materiálu po zavedení elektromagnetického impulsu.

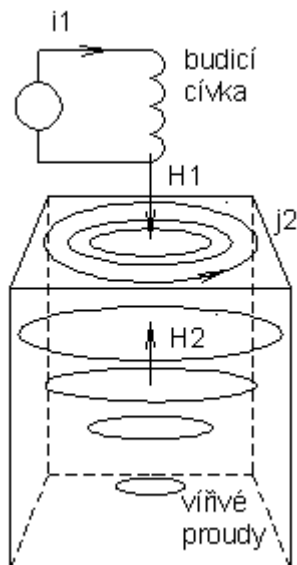
3.4.2 Metoda vířivých proudů

Tato metoda umožňuje zkoumat vlastnosti, jejichž změna ovlivňuje elektrickou vodivost, průřez nebo permeabilitu zkoušeného materiálu.

Je-li zkoušený předmět magnetován v dutině cívky, pak střídavý proud procházející vinutím cívky vytváří časově proměnné magnetické pole.

Toto magnetické pole indukuje v předmětu střídavé napětí. Poněvadž kovový předmět představuje uzavřený proudový vodič, vznikají v něm vířivé neboli Foucaultovy proudy. Tyto proudy působí svými magnetickými účinky zpětně na budící magnetické pole. Účinkem vířivých proudů je budící magnetické pole zeslabováno, čímž vzniká výsledné

magnetické pole dané vektorovým součtem obou polí dílčích (pole cívky a pole vířivých proudů).



i_1 ...proud tekoucí budicí cívkou

j_2 ...hustota vířivých proudů na povrchu materiálu

H_1 ...intenzita magnetického pole budicí cívky

H_2 ...intenzita magnetického pole vířivých proudů

Obr. 17-Princip metody vířivých proudů

Měření se vyhodnocuje na základě napětí indukovaného výsledným magnetickým polem. Napětí se může indukovat dvěma způsoby:

- přímo v cívce, která budí magnetické pole (způsob příložné cívky)
- nebo ve druhé cívce měřicí (způsob průchozí cívky).

Hustota a rozložení vířivých proudů ve zkoušeném předmětu jsou dány především fyzikálními vlastnostmi materiálu předmětu, zejména jeho elektrickou vodivostí, permeabilitou, frekvencí proudu v budicí cívce a také rozměry předmětu.

Způsob průchozí cívky

Systém měření sestává z budicí a měřicí cívky, přičemž vinutí obou cívek jsou ve většině případů navinuta na trubkovém plastovém nosiči. Zkoušený předmět prochází dutinou tohoto nosiče a tvoří jádro cívky. Snímače napětí mohou být uspořádány odděleně, nebo jsou spojeny v jeden celek. V prvním případě jedním snímačem prochází kontrolované předměty, zatímco v druhém snímači je vložen etalonový výrobek, jehož vlastnosti byly ověřeny jinými metodami.

Ve druhém případě se porovnávají dvě sousední oblasti téhož výrobku při jeho průchodu snímačem. Při shodě fyzikálních vlastností obou výrobků nebo obou

porovnávaných oblastí jsou shodná i obě napětí indukovaná v měřicích vinutích snímačů a rozdíl napětí je tedy nulový. V opačném případě vzniká rozdíl napětí, z jehož amplitudy a fáze se posuzuje velikost a druh odchylky, která napětí vyvolala.

Tato metoda se vedle kontroly drátů, tyčí a trubek používá také ke třídění materiálu (resp. kontrolu proti záměně).

Způsob příložné cívky

Zde se cívka přikládá v radiálním směru k povrchu zkoušeného materiálu. Osa časově proměnného magnetického pole buzeného cívkou směřuje kolmo na zkoušený povrch. Účinek vířivých proudů závisí na elektrických a magnetických vlastnostech zkoušeného materiálu, dále na tloušťce materiálu a oddálení cívky od povrchu.

Kromě zjišťování vad materiálu lze tímto způsobem měřit tloušťky vodivých folií, nebo lze bezdotykově měřit vodivost.

3.4.3 Magnetické metody

Tyto metody jsou převážně založeny na využití sekundárních magnetických vlastností materiálu, jako jsou permeabilita, koercivita nebo remanence.

Magnetické metody se rozdělují podle toho, jaké vlastnosti se jimi měří, na:

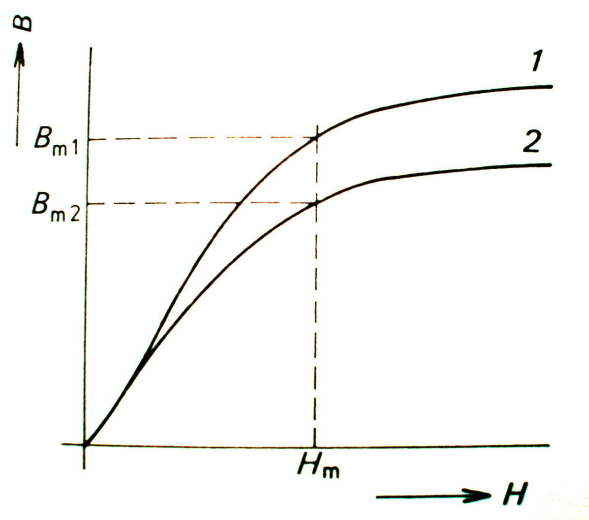
- měření permeability,
- měření koercivity,
- měření remanentní indukce.

3.4.3.1 Metoda měření permeability

Permeabilita se zpravidla stanovuje na základě měření magnetického indukčního toku v kontrolovaném předmětu při zvolené hodnotě intenzity magnetického pole.

Měření probíhá při konstantní hodnotě intenzity a zjišťovaná hodnota indukčního toku je úměrná dané permeabilitě. Takto se stanoví permeabilita zdánlivá, popř. efektivní, poněvadž její hodnota je ovlivněna tvarem předmětu a u časově proměnných magnetických polí také působením vířivých proudů.

Přístroje sloužící ke stanovení permeability se nazývají permeametry.



Obr. 18-Princip měření permeability

V závěru měření se vyhodnocuje rozdíl obou indukovaných napětí, z něhož se usuzuje na rozdíly ve struktuře zkoušeného materiálu.

3.4.3.2 Měření koercitivity (H_c)

Princip metody měření koercitivity spočívá v magnetizaci povrchu zkoušeného materiálu příložným jhem, čímž se vytvoří magnetický obvod. Dosáhne-li materiál stavu nasycení, změní se směr proudu a nastává demagnetizace. V okamžiku vykompenzování remanentní magnetické indukce se vestavěnou sondou změří hodnota intenzity demagnetizačního pole. Stejně měření se provede i pro etalon a výsledná koercivita se stanoví jako rozdíl intenzit demagnetizačního pole etalonu a zkoušeného předmětu.

Poznámka:

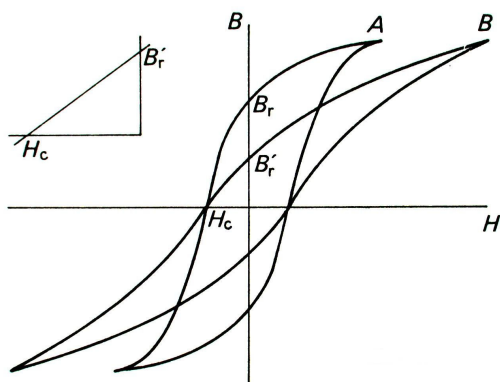
Koercitivní intenzita magnetického pole velmi dobře koresponduje s tvrdostí a pevností v tahu ocelí, čehož se využívá ve strukturoskopii.

3.4.3.3 Měření remanentní indukce

Měření remanentní indukce je nedestruktivní metodou kontroly tepelného zpracování feromagnetických materiálů. Řada ocelí vykazuje velmi dobrou souvislost mezi tvrdostí a koercitivitou, čehož se užívá ke kontrolním účelům. Měření koercitivity však není snadné a v běžných provozních podmínkách se neprovádí (jen v laboratorních podmínkách). Za určitých předpokladů lze nahradit měření koercitivity měřením remanentní indukce, které je výrazně jednodušší.

Metoda měření spočívá v porovnávání kontrolovaného předmětu s etalonovým materiálem. Pro nastavenou konstantní hodnotu intenzity magnetického pole H_m vzniká v etalonovém materiálu magnetická indukce B_{m1} a v kontrolovaném předmětu B_{m2} . Těmto indukcím úměrně odpovídají napětí indukovaná ve vinutích snímacích cívek.

V průběhu měření přechází hysterezní smyčka z původního tvaru A na tvar B. Ve druhém kvadrantu souřadného systému tvoří její větev přeponu pravoúhlého trojúhelníka, jehož odvěsnami jsou zdánlivá remanentní indukce a koercitivita.



Z uvedeného obrázku je patrné, že při změně koercivity se mění i zdánlivá remanentní indukce, neboť trojúhelníky ve druhém kvadrantu zůstávají podobné. Za těchto podmínek lze na koercitivitu usuzovat z hodnoty zdánlivé remanentní indukce. Měření lze snadno provést měřením magnetického pole v okolí zkoušeného předmětu, jenž byl

Obr. 19-Princip měření remanence

předem zmagnetován do stavu nasycení. Tento postup měření je možno mechanizovat či automatizovat.

3.5 Magnetické pole

3.5.1 Historie

První zmínky o magnetismu sahají podle některých pramenů již do staré Číny, kde počátkem 2. tisíciletí př.n.l. byl magnetický jev využíván k výrobě jednoduchých kompasů. Dále pak v 6. století př.n.l. řecký filosof a matematik Tháles z Milétu popisuje magnetismus jako přitažlivost některých druhů železné rudy ke kusům čistého železa.

Za průkopníka tohoto oboru fyziky je však považován anglický učenec, lékař královny Alžběty I, William Gilbert (1544 – 1603). Právě on zavedl pojem magnetické pole. Objasnil severní a jižní pól magnetu i to, že se vzájemně přitahují i odpuzují.

Dále zjistil, že při určitých teplotách feromagnetické látky ztrácejí své magnetické vlastnosti. Objevil také magnetickou indukci, jejíž jednotka později převzala název od fyzika Nikoly Tesly. V roce 1789 dospěl Ch. A. Coulomb k představě koercitivní intenzity magnetického pole. Souvislost mezi elektrickým a magnetickým polem objevil dánský fyzik Hans Christian Oersted (1777 – 1851). Pomocí magnetky zjistil existenci magnetického pole v blízkém okolí vodiče protékaného proudem.

Dalšími vědci, kteří se významně zabývali teorií elektromagnetického pole byli především Michael Faraday (1791 – 1867), James Clerk Maxwell (1831 – 1879) či známá trojice Biot-Savart-Laplace, kteří odvodili diferenciální vztah pro magnetickou indukci.

3.5.2 Popis magnetického pole

Magnetické pole je silové pole, které obecně působí na pohybující se elektrický náboj. Vzniká a působí v okolí vodiče protékaného proudem, nebo v okolí permanentního magnetu. Vznikne-li v okolí vodiče protékaného proudem, pak je buzeno elektrickým polem vodiče. Z hlediska časové proměnnosti může být pole magnetostatické a magnetodynamické (tedy nestacionární).

Pole lze charakterizovat magnetickými indukčními siločarami, což jsou myšlené, spojitě křivky, které v případě permanentního magnetu vycházejí ze severního pólu a vstupují do jižního pólu. Magnetické pole je vírové, poněvadž siločáry jsou křivky uzavřené. Tečna magnetické siločáry v jejím libovolném bodě udává směr vektoru magnetické indukce.

Magnetické pole lze popsat níže uvedenými fyzikálními veličinami.

Magnetická indukce B [T]

Jedná se o vektorovou veličinu charakterizující silové působení magnetického pole na vodič protékaný proudem. Jednotkou je tesla, označováno T. Číselně se tato jednotka rovná síle 1N působící na jednotku délky přímého vodiče protékaného proudem 1A a orientovaného kolmo ke směru magnetické indukce.

Obvykle se počítá z Biot-Savartova-Laplaceova zákona, lze ji též vyjádřit pomocí intenzity ze vztahu $B = \mu_0 \mu_r H$. (11)

Intenzita magnetického pole H [A/m]

Intenzita magnetického pole je vektorová veličinu, jež charakterizuje magnetické pole jako zdroj. Přímo závisí na strukturně-mechanickém stavu materiálu, přičemž této souvislosti se využívá v magnetické strukturoskopii.

Magnetický indukční tok ϕ [Wb]

Magnetický indukční tok se definuje jako tok vektoru magnetické indukce B elementární uzavřenou plochou dS , což lze vyjádřit vztahem: $\phi = \oint_{(S)} \vec{B} dS$ (12)

Podle Maxwellovy věty se tento vztah rovná nule. Pro případ cívky je magnetický tok roven součinu indukčnosti cívky a proudu tekoucího cívkou, tedy $\phi = LI$. (13)

Magnetizace M [A/m]

Jde o vektorovou veličinu, která představuje na základě teorie dipólů intenzitu pole uvnitř magnetovaného tělesa a vyvolanou jeho magnetickými vlastnostmi.

Polarizace J [T]

Polarizace je vektorová veličina, která podobně jako magnetizace vyjadřuje změnu pole vyvolanou magnetickými vlastnostmi látek.

Permeabilita prostředí μ [H/m]

Tato veličina charakterizuje magnetické vlastnosti prostředí, v němž existuje magnetické pole a je rovna součinu permeability vakua a poměrné permeability. Jednotkou je henry/metr.

Poměrná permeabilita μ_r [-]

Udává podíl konkrétní hodnoty magnetické indukce v magnetovaném materiálu a magnetické indukce vakua. Matematicky lze tedy poměrnou permeabilitu vyjádřit jako

$$\mu_r = \frac{B}{B_0}. \quad (14)$$

Permeabilita vakua je dána konstantní hodnotou $4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m].

Magnetická susceptibilita κ_m [-]

Vyjadřuje podíl magnetické polarizace a magnetické indukce vakua, tedy

$$\kappa_m = \frac{J}{B_0}. \quad (15)$$

Rovněž lze napsat vztah mezi magnetickou susceptibilitou a poměrnou permeabilitou, a to

$$\kappa_m = \mu_r - 1. \quad (16)$$

3.6 Rozdělení látek podle jejich chování v magnetickém poli

Látky lze na základě jejich chování v magnetickém poli rozdělit do tří skupin.

A to na látky diamagnetické, paramagnetické a feromagnetické. Základním kritériem rozhodujícím o náležitosti dané látky do některé z těchto skupin je poměrná permeabilita, případně magnetická susceptibilita.

3.6.1 Diamagnetické látky, mají $\mu_r < 1$, $\kappa_m < 0$

Mírně zeslabují magnetické pole a jsou tímto polem odpuzovány. Mezi představitele diamagnetických látek patří měď, stříbro, zlato, ale také voda a vzácné plyny. Atomy těchto látek mají ve slupkách sudý počet elektronů a je u nich zcela vykompenzován spinový magnetický moment elektronů.

3.6.2 Paramagnetické látky, $\mu_r > 1$, $\kappa_m > 0$

Mírně zesilují magnetické pole a jsou jím přitahovány. K těmto látkám náleží zejména hliník a platina. Atomy paramagnetických látek mají ve slupkách lichý počet elektronů a mají částečně nevykompenzovaný spinový magn. moment.

3.6.3 Feromagnetické látky, $\mu_r \gg 1$, $\kappa_m \gg 1$

Výrazně zesilují magnetické pole a jsou tímto polem opět přitahovány. Feromagnetické jsou čisté železo, nikl, kobalt, gadolinium a Heuslerovy slitiny (slitiny neželezných kovů).

Feromagnetismus vykazují látky, jejichž atomy mají nevykompenzovaný spinový magnetický moment. U těchto látek lze již slabým vnějším magnetickým polem vyvolat takové uspořádání magnetických momentů, při němž dochází k zesílení magnetického pole. Krystaly těchto látek jsou tvořeny zmagnetovanými oblastmi, které se nazývají domény, známé též pod jiným označením Weissovy oblasti. Hranice mezi jednotlivými doménami se nazývají „Blochovy stěny.“

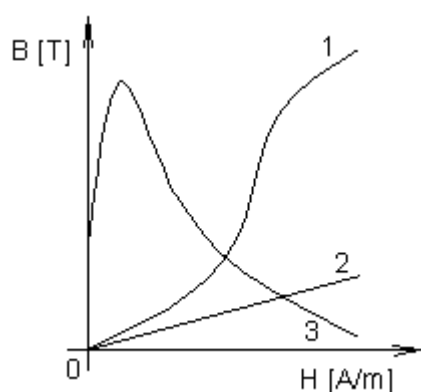
V každé doméně je souhlasná orientace magnetických momentů jednotlivých atomů. Jelikož je však orientace momentů jednotlivých domén různá, chová se feromagnetikum, které ještě předtím nebylo magnetizováno, zdánlivě nemagneticky. Začne-li na feromagnetikum působit vnější magnetické pole s postupně rostoucí indukcí, začnou se zvětšovat domény orientované ve směru vektoru indukce vnějšího pole na úkor domén s odlišnou orientací.

Současně také dochází k postupné změně orientace magnetických momentů ostatních domén do směru indukce vnějšího pole. Po jejich souhlasném uspořádání doménová struktura vymizí a látka se stane magneticky nasycenou.

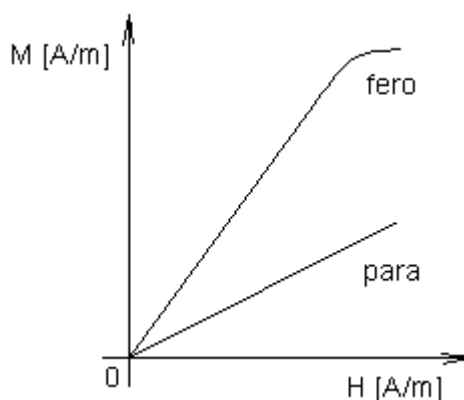
Feromagnetismus se projevuje pouze tehdy, nachází-li se materiál v krystalickém stavu. Ve skupenství kapalném nebo plynném se tyto látky chovají jako paramagnetické.

Významnou vlastností je také ztráta feromagnetických vlastností po zahřátí látky na tzv. Curieho teplotu, která např. u čistého železa činí 760°C .

Zatímco je závislost magnetické indukce na intenzitě magnetického pole u diamagnetických a paramagnetických materiálů lineární, u feromagnetik tomu tak není, jak ukazuje křivka č.1 na obrázku 20. Magnetizace těchto materiálů závisí nejen na intenzitě vnějšího magnetického pole, ale i na historii předchozího magnetování. Tento jev, kdy jsou podstatné i stavy, jimiž magnetizovaná látka prošla předtím, se označuje jako hystereze.



Obr. 20-Křivky prvotní magnetizace



Obr. 21-Průběhy magnetizace

V obrázku 20 představuje křivka 1 prvotní magnetizaci feromagnetika, číslo 2 magnetizaci paramagnetika a číslo 3 představuje chování poměrné permeability při magnetování feromagnetika. Na obrázku 21 vpravo jsou znázorněny průběhy magnetizace při magnetování paramagnetika a feromagnetika.

3.7 Metoda magnetického bodového pólu

Patří mezi magnetické strukturoskopické metody, založené na využití souvislosti mezi magnetickými vlastnostmi a strukturně-mechanickým stavem materiálu. Existuje několik způsobů, jak tyto magnetické vlastnosti, dané některou z charakteristických veličin, měřit. Jedním z těchto principů kontroly výrobků je metoda „bodového pólu“. Jde o metodu rychlou, splňující požadavky současného výrobního provozu. V současné době se k měření metodou magnetického bodového pólu používá přístrojů řady DOMÉNA, které navazují na předchozí sérii přístrojů REMAG.

Díky stálému vývoji této metody lze pomocí přístrojů DOMÉNA měřit nejen tvrdost feromagnetických materiálů, ale i pevnost či hloubku prokalení.

V porovnání s klasickými způsoby měření tvrdosti je tato metoda velmi rychlá, nedestruktivní, umožňuje měření i na neopracovaném povrchu, jednoduchá na obsluhu a umožňuje měřit tvrdost materiálu i přes povrchovou vrstvu.

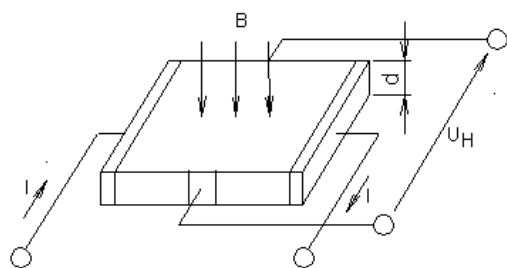
3.7.1 Princip měření metodou magnetického bodového pólu

U zkoušeného objektu (např. odlitku) se pomocí magnetovací cívky sondy vytvoří na povrchu objektu magnetická skvrna – tzv. „bodový pól“. Po zániku proudového pulsu v magnetovací cívce se citlivými snímači měří remanentní intenzita magnetického pole v povrchové a podpovrchové vrstvě materiálu vzorku.

Snímače, nejčastěji Hallovy, jsou diferenciálně zapojeny a měří gradient normálové složky remanentní intenzity. Metoda využívá přímé souvislosti mezi remanentní intenzitou a strukturně-mechanickým stavem materiálu. Se strukturně-mechanickým stavem materiálu lépe koresponduje koercitivní intenzita, ale její hodnoty jsou velmi nízké, proto se přednostně vyhodnocuje remanentní intenzita magnetického pole.

Feromagnetické látky magneticky tvrdé si po vyjmutí z vnějšího magnetického pole uchovávají své magnetické vlastnosti (v materiálu přetrvává remanentní indukce). Přispívá k tomu též existence poruch krystalové mřížky (dislokací) a jiných překážek, např. atomy uhlíku, částice cementitu, které brání návratu domén do jejich původní orientace a do celkově magneticky neutrálního stavu. Souvislost mezi mechanickou a magnetickou tvrdostí materiálu je dána přítomností magneticky tvrdých strukturních složek (lamely perlitického cementitu, martenzit), které jsou zároveň i mechanicky tvrdé.

Princip této metody spočívá v měření intenzity zbytkového magnetického pole kontrolovaného materiálu pod čelem sondy, jejíž hodnota přímo závisí na množství a disperzi perlitu či martenzitu ve struktuře. Hodnota H_r se posléze zobrazí na displeji



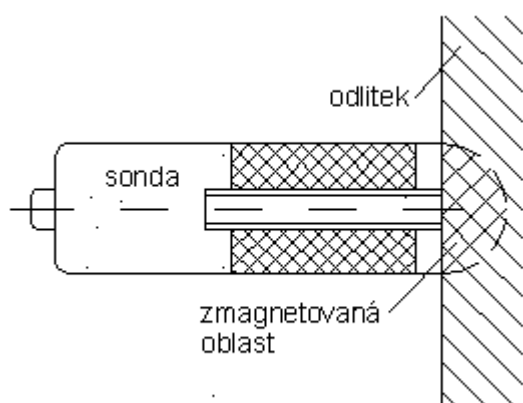
přístroje. Hallův snímač registrující remanentní intenzitu je polovodičový prvek, jenž využívá vlivu magnetické indukce na vychylování nosičů nábojů el. proudu

Obr. 22-Vyobrazení Hallovy sondy

v polovodiči o tloušťce d . Pro Hallovo napětí U_H na elektrodách platí vztah:

$$U_H = R_H \frac{IB}{d} \quad (17)$$

3.7.2 Charakteristika a popis přístroje DOMÉNA B3.b



Přístroj DOMÉNA B3.b je přenosný, v tomto provedení nezávislý na vnějším napájení. V běžném režimu je schopen na jedno nabití akumulátorů provést měření minimálně 600krát. DOMÉNA B3.b je tvořena vlastním přístrojem se zdrojem magnetických impulsů a příložnou sondou. Na čelním panelu přístroje zobrazuje digitální údaj naměřené hodnoty, přepínač funkcí a indikátor stavu, což umožňuje

Obr. 23-Schema příložené sondy

takové nastavení, aby digitální údaj ukazoval měřenou hodnotu přímo v jednotkách, na které je přístroj kalibrován. Mimoto je možná kalibrace DOMÉNY podle etalonů uživatele, dále výpočet statistických údajů ze zapamatovaných hodnot, kterých může být v paměti až sto. Přístroj umožňuje i komunikaci s počítačem.

Na hlavním panelu jsou tedy pro ovládání přístroje k dispozici:

- přepínač akumulátorového zdroje VYP/NAB/ZAP se dvěma indikačními světly a jedním dvojitém světlem
- přepínač velikosti magnetizace v osmi stupních
- přepínač funkce s možnými funkcemi A, B, T, TT, L a LL
- čtyřmístný LED display
- klávesnice s tlačítky
- indikační světla PAM, DATA, x, s.

Výhody přístroje:

- příložnou sondu je možné konstruovat tak, aby její tvar odpovídal místu, kde jsou součásti zkoušeny
- přístroj s výjimkou dobíjení baterií nevyžaduje údržbu
- moderní mikroprocesorová technika umožňuje jednoduchou obsluhu i diagnostickou kontrolu
- příložná sonda zaručuje prostorovou dostupnost větší, než je tomu u klasických metod měření

- kontrola je možná i v hromadné výrobě, protože měření jednoho kusu netrvá déle než šest sekund
- zařízení je přenosné
- velmi jednoduchá obsluha.

Kromě tvrdosti je možné přístrojem DOMÉNA B3.b měřit i pevnost a hloubku prokalení. Jedná se o vlastnosti, jež závisí na množství a rozložení magneticky tvrdých strukturních fází jako je perlit, cementit nebo martenzit.



Obr. 24-Ukázka měření tvrdosti strukturuometrem DOMÉNA B3

3.7.3 Postup měření přístrojem DOMÉNA B3.b

Přístroj uvedeme do chodu přepínačem akumulátorového zdroje umístěného na hlavním panelu, jenž otočíme do polohy ZAP.

Velikost proudu nastavíme přepínačem velikosti magnetizace na požadovaný stupeň.

Přepínač funkce otočíme do polohy T, přičemž se na displeji přístroje zobrazí vnitřní konstanta „a“, která je po zapnutí přístroje automaticky nastavena na hodnotu 1,00. Součástí každého přístroje DOMÉNA je etalon o známé hodnotě M_0 , která je na něm zřetelně označena. Pomocí klávesnice zadáme do paměti přístroje hodnotu etalonu M_0 a ta se následně zobrazí na displeji. Toto nastavení potvrdíme klávesou D. Poté se vlevo na displeji zobrazí znak „C“ a vpravo se zobrazí nula. Nyní přiložíme čelo sondy k etalonu a stiskneme červené

tlačítko. Po třech sekundách se zobrazí nová hodnota vnitřní konstanty „a“ stanovená podle vztahu:

$$a = \frac{M_0}{m'} \quad (18)$$

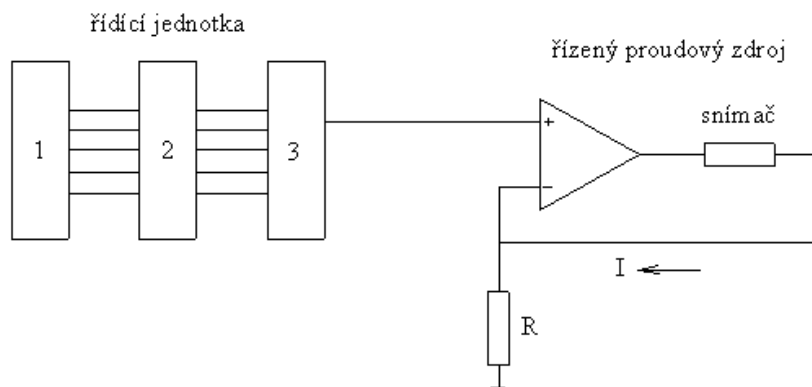
kde m' ...je hodnota vnitřní nekorigované intenzity magnetického pole magnetického bodového pólu.

Pro ověření správnosti vnitřní konstanty „a“ otočíme přepínač funkce do polohy L a znovu přiložíme sondu k etalonovému materiálu a provedeme měření. Nyní se však na displeji přístroje objeví hodnota M, která je v ideálním případě totožná s hodnotou magnetizace M_0 . Jestliže nastavení vyhovuje (odchylka M od hodnoty M_0 není více než 2%), můžeme začít měřit. V opačném případě je třeba hodnotu „a“ nastavit znovu. Nastavením přístroje podle tohoto postupu se při měření zobrazuje na displeji hodnota magnetizace M zkoušeného materiálu, která je přímo úměrná velikosti intenzity zbytkového magnetického pole.

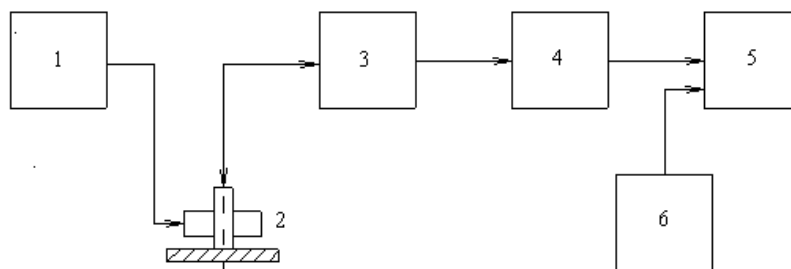
3.7.4 Moderní koncepce strukturuometru DOMÉNA

V současné době se rozvinula moderní koncepce přístroje, nazvaná DOMÉNA II PROMAG. U tohoto přístroje je proudový zdroj řešen jako programovatelný, tzn. že jej lze pomocí dat uložených do paměti naprogramovat na vygenerování libovolného tvaru proudového pulsu. Naproti tomu u starších verzí DOMÉNY je generován trojúhelníkový (neboli pilový) proudový impuls kondenzátorovým vybíjením.

Podrobnější sestava funkčních částí programovatelného proudového zdroje je zobrazena na obrázku 25. Řídící jednotka obsahuje adresovací binární čítač 1, programovatelnou EPROM paměť 2 a D/A převodník 3. Napěťově řízený proudový zdroj je dimenzován na dodávku maximálního proudu 10 A. Řídící jednotka generuje dva až osm period napětí, jejichž průběh je naprogramován v EPROM paměti. D/A převodník převádí datové výstupy na jednotlivých adresách EPROM paměti do analogové formy. Tímto napětím je posléze řízena výkonová část proudového zdroje.



Obr. 25-Koncepční řešení programovatelného proudového zdroje



- | | |
|---|---------------------------|
| 1....programově řízený proudový zdroj | 4....obvody HOLD signálu |
| 2....snímač s Hallovými sondami | 5....zobrazovací jednotka |
| 3....zesilovač s dB nastavením zesílení | 6....obvody kompenzace |

Obr. 26-Blokové schéma struhtuometru DOMÉNA II – PROMAG

Struhtuometr DOMÉNA II – PROMAG je koncepčně řešen tak, aby mohl pracovat zcela autonomně, tedy od vygenerování bodového pólu programově řízeným proudovým zdrojem až po digitální zobrazení naměřeného údaje. Počítá se též s možností připojení programovatelného kalkulátoru, jenž by umožnil statistické vyhodnocení naměřených hodnot s grafickým zobrazením a regresní analýzou včetně přepočtu na mechanické nebo strukturní údaje.

3.7.5 Impulsní magnetování a analýza proudového impulsu

U metody bodového pólu se uplatňuje impulsní magnetování, což je způsob, který lze využít u materiálů s vyšší remanentní magnetickou indukcí a koercitivitou. Tento způsob magnetování má bezesporu některé výhody, jako např. nenáchylnost k tvorbě opalů na kontaktních místech, či nižší celkovou energetickou spotřebu při magnetování. Pro

vytvoření proudového impulsu se používají kondenzátorové zdroje se značnou velikostí elektrické kapacity.

Kondenzátorový zdroj s jednoduchým vybíjením

U tohoto zdroje se kondenzátorová jednotka, sestavená z jednotlivých kondenzátorů, nejprve nabíjí ze síťového transformátoru s usměrňovačem na dané napětí. Po nabití kondenzátorové jednotky se pomocí spínacího tyristoru připojí magnetizační okruh, přes který se jednotka ať vybije. Velikost a časový průběh vybíjení proudového impulsu závisí na parametrech celého magnetizačního okruhu, tedy na kapacitě kondenzátorů zdroje a indukčnosti a rezistanci magnetovací cívky.

Vybíjení proudu může probíhat dvěma způsoby, buď aperiodicky nebo periodicky.

Vybíjení aperiodické nastává při podmínce $\frac{R^2}{4L^2} > \frac{1}{LC}$ (19), pro něž platí časový průběh

$$\text{proudu vyjádřený vztahem: } i(t) = -C \cdot U_0 \frac{\alpha_1 \cdot \alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_2} [-e^{\alpha_1 t} + e^{\alpha_2 t}], \quad (20)$$

$$\text{kde } \alpha_1 = -\frac{R}{2L} + \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}} \quad (21)$$

$$\alpha_2 = -\frac{R}{2L} - \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}} \quad (22)$$

přičemž koeficienty α_1 a α_2 vyjadřují vzájemný vztah mezi elektrickými parametry magnetovacího obvodu, U_0 je nabíjecí napětí na kondenzátorech. Časový průběh určený rovnicí (20) dosahuje v určitém čase $t_{\max}$ lokálního maxima, přičemž tento čas je směrodatný pro dosažení maximální magnetické indukce v materiálu. Lze matematicky odvodit,

$$\text{že: } t_{\max} = \frac{\ln \frac{\alpha_2}{\alpha_1}}{\alpha_1 - \alpha_2} \quad (23)$$

a následně maximální proudový impuls je dán rovnicí

$$I_{\max} = -C \cdot U_0 \frac{\alpha_1 \alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_2} \left[-e^{\frac{\alpha_1}{\alpha_1 - \alpha_2} \ln \frac{\alpha_2}{\alpha_1}} + e^{\frac{\alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_2} \ln \frac{\alpha_2}{\alpha_1}} \right] \quad (24)$$

Pro dosažení max. proudového impulsu je třeba, aby hodnoty U_0 a C byly co největší a rezistance R co nejmenší. Tento způsob vybíjení se uplatňuje u přístroje DOMÉNA B3.b.

V případě platnosti podmínky $\frac{R^2}{4L^2} < \frac{1}{LC}$ (25) by šlo o periodický proces vybíjení, čili proud při vybíjení přechází k nule tlumenými kmity. Časový průběh proudu je vyjádřen vztahem:

$$i(t) = U_0 \omega C \cdot e^{-\frac{R}{2L}t} \cdot \sin \omega t, \quad (26)$$

$$\text{kde } \omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \text{ je úhlová frekvence tlumených kmitů.} \quad (27)$$

Periodickým způsobem vybíjení nelze namagnetování materiálu vlivem tlumených kmitů dosáhnout, je vhodný spíše pro odmagnetovávání.

Na obrázku 27 níže je uveden časový průběh vybíjení proudového impulsu pro přístroj DOMÉNA B3.b, průběh platí pro parametry: rezistance $R = 1,22 \, \Omega$, celková kapacita kondenzátorů $C = 22 \, \text{mF}$ a indukčnost cívky $L = 0,22 \, \text{mH}$. Podle vztahu (23) vychází čas $t_{\max} = 0,95 \, \text{ms}$, příslušná maximální hodnota proudu činí $I_{\max} = 12,75 \, \text{A}$. Hodnota maximálního proudu byla zjištěna pro nejvyšší stupeň magnetizace.

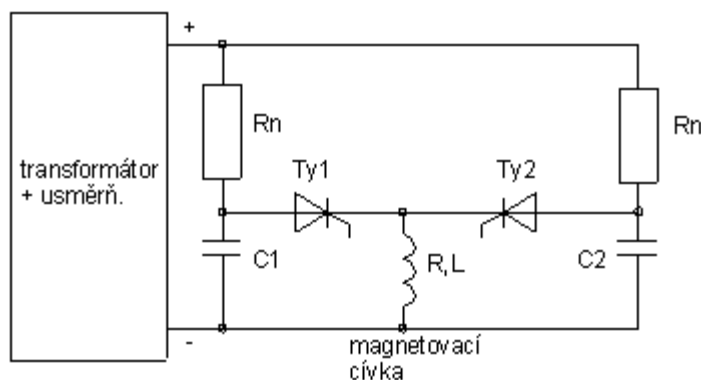


Obr. 27-Průběh proudu v cívce při aperiodickém vybíjení

Kondenzátorový zdroj se sekvenčním spínáním kondenzátorů

Průběh vybíjecího proudu lze ovlivnit při daných parametrech cívky sekvenčním spínáním kondenzátorů magnetovacího zdroje. Princip činnosti je znázorněn na obrázku 28. Kondenzátory jsou rozděleny na dvě sekce C1 a C2. Obě sekce jsou přes nabíjecí rezistory

připojeny na napájecí blok tvořený transformátorem a usměrňovačem. Každá ze sekcí je samostatně připojena na magnetovací cívku. Po společném nabití se nejprve připojí tyristorem Ty1 k magnetování první sekce C1. Druhá sekce C2 se připojuje tyristorem Ty2 se zpožděním. Tvar průběhu vybíjecího proudu bude záviset na velikosti kapacit C1 a C2 a na zpoždění spínání druhé sekce s kondenzátorem C2.



Obr. 28-Zdroj se sekvenčním spínáním kondenzátorů

Tímto je možné magnetovací impuls zplošťovat a časově protahovat nebo naopak zvyšovat a časově zkracovat. Impulsní magnetování se sekvenčním spínáním kondenzátorů přináší tyto výhody: - možnost tvarování vybíjecího impulsu

- snadné uzavírání tyristorových spínačů
- úspora nabíjecí energie.

Mezi nevýhody patří potřeba druhé spínací jednotky, zastoupení vyšších harmonických složek proudu, což snižuje hloubku vniku magnetického pole do materiálu.

3.7.6 Technické parametry zařízení

Příložná sonda:

magnetovací cívka: rozměry: $d_1 = 10 \text{ mm}$, $d_2 = 28 \text{ mm}$, výška $v = 13 \text{ mm}$

počet závitů $N = 120$

rezistance včetně přidružených odporů $R = 1,22 \Omega$,

indukčnost cívky $L = 0,22 \text{ mH}$

generované magnetické pole (v ose a na čele cívky)

$H_{\max} = 114 \text{ kA/m}$, $B_{\max} = 143 \text{ mT}$ (ve vzduchu)

Hallovy sondy: typ A3516, firmy Allegro

Kondenzátory:

kapacita $C = 22 \text{ mF}$

nabíjecí napětí $U_0 = 16 \text{ V}$

Proudový zdroj ke generování magnetovacích pulsů:

amplituda proudových pulsů 2 / 4 / 6 / 8 / 10 A (přepínatelná) podle předem nastaveného stupně magnetizace.

tvár pulsu: průběh kondenzátorového vybíjení proudu

počet pulsů: 3 jednorázově pro režim krátké magnetizace

5 jednorázově pro režim dlouhé magnetizace

Vyhodnocovací část signálu z Hallových sond:

Stejnoseměrný zesilovač s decibelovým přepínáním zesílení:

přepínání hrubé 0 / 10 / 20 / 30 dB

přepínání jemné 10 až 19 dB po jednom dB.

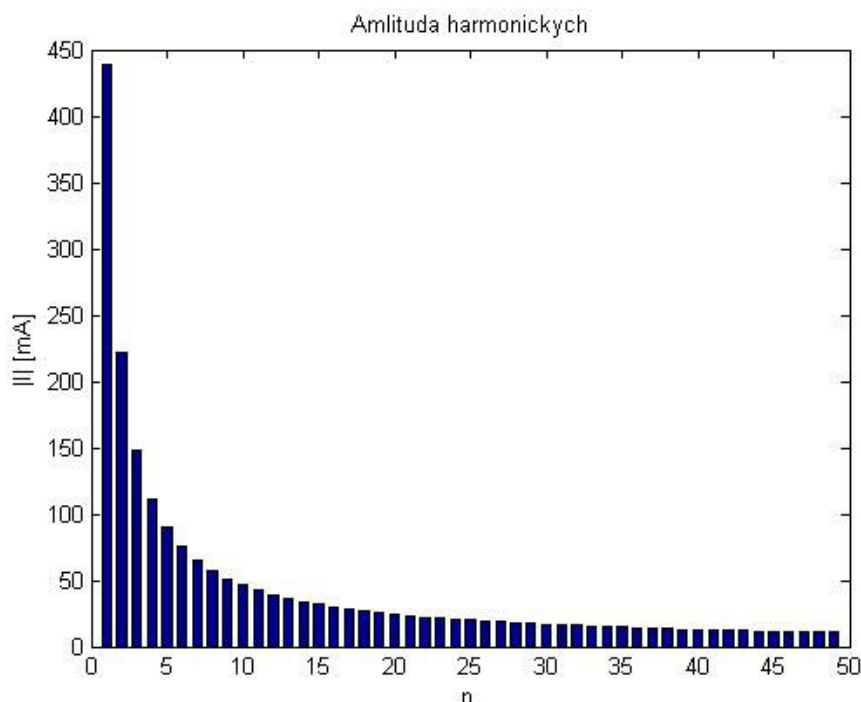
3.7.7 Rozklad proudového pulsu na harmonické složky

Proudový puls podle obrázku 27 nemá harmonický charakter. Tudíž jej lze rozložit pomocí Fourierovy řady na jednotlivé harmonické složky. U diskretních signálů se rozklad provádí pomocí Fourierovy transformace. Fourierova řada má teoreticky nekonečně mnoho členů, proto je nutné rozklad omezit určitým počtem složek (vyšších harmonických), jejichž součet se maximálně přibližuje danému tvaru neharmonického průběhu. Z uvedeného vyplývá, že tomuto průběhu náleží určité spektrum frekvencí, naproti tomu harmonickému průběhu odpovídá jedna konkrétní hodnota frekvence.

Spektrum je tvořeno jednou složkou základní a určitým počtem vyšších harmonických (podle tvaru neharmonického signálu). Platí zásada, že čím strmější je náběžná hrana signálu, tím více má neharmonický signál vyšších harmonických.

Základní složka je určena nejnižší frekvencí, která v tomto případě činí 50 Hz (poněvadž perioda činí 20 ms) a nejvyšší amplitudou. Ostatní vyšší harmonické mají frekvenci danou násobkem základní frekvence. Poněvadž se jedná o periodický signál, vyšší frekvence jsou rovny celistvému násobku frekvence základní. Odpovídající

amplitudové frekvenční spektrum pořízené numerickou Fourierovou transformací je znázorněno na obr. 29 níže:



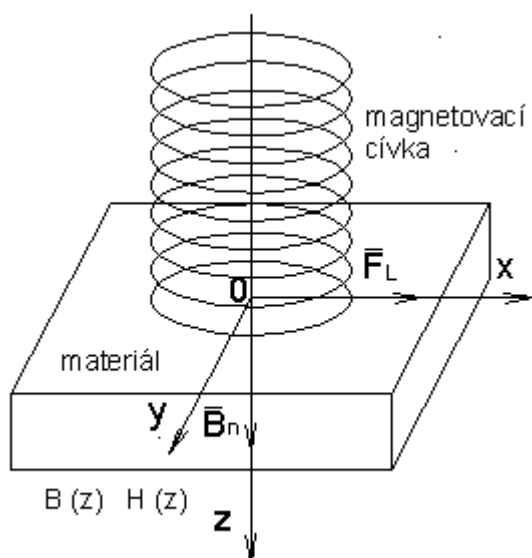
Obr. 29-Amplitudové frekvenční spektrum signálu

Z uvedeného frekvenčního spektra vyplývá, že signálu určeného vztahem (20) přísluší rozsah frekvencí 0-2 450 Hz. Počet významných vyšších harmonických tohoto signálu je 11, což znamená, že aproximace složená ze součtu těchto složek se již velmi dobře přibližuje časovému průběhu podle obr. 27. Příslušné frekvence se pak pohybují do 550 Hz.

3.7.8 Rozložení magnetického pole v materiálu u bodového pólu

Jak už bylo dříve zmíněno, příločná sonda metody magnetického bodového pólu pomocí magnetovací cívky zmagnetuje lokální oblast daného materiálu. Vzniklé magnetické pole je vzhledem k pulsnímu magnetování cívkou nestacionární. Exaktní výpočet rozložení magnetického pole ve zmagnetované oblasti je mimořádně složitá záležitost, především kvůli proměnné hodnotě poměrné permeability, demagnetizaci vlivem stínícího faktoru a vířivých proudů, vlivu anizotropie materiálu, rozptylu magnetického toku na různých heterogenitách v materiálu a podobně. Poměrná permeabilita závisí na magnetizaci a její hodnotu nelze přesně určit, lze ji buď změřit nebo přibližně odhadnout.

Pro účely této práce postačí, bude-li se uvažovat rozložení magnetické indukce a intenzity jako jednorozměrné, ve směru osy přiložené sondy. Pro opravdu přesné rozložení magnetického pole a vířivých proudů je třeba simulace metodami konečných prvků,



nejlépe v programu ANSYS. Situaci bodového pólu podle výše uvedeného vystihuje obrázek 30:

Ze zákona o lomu indukčních čar na rozhraní dvou prostředí o různých permeabilitách vyplývá, že se musí rovnat normálové a tangenciální složky intenzity,

$$\text{tedy: } H_{1n} = H_{2n} \quad (28)$$

$$H_{1t} = H_{2t} \quad (29)$$

Obr. 30-Schema situace bodového pólu

přičemž tangenciální složky intenzity se zanedbávají. Nyní lze přistoupit k výpočtu maximální hodnoty indukce a intenzity magnetického pole.

Ze zákona celkového proudu pro cívku platí:

$$\oint_{(I)} \vec{H} dl = \sum NI \quad (30)$$

po dosazení a úpravě dostáváme: $H_{\max} = (N/l) \cdot I_{\max} = n \cdot I_{\max}$

kde: n ...je závitová hustota cívky,

$I_{\max}$...max. hodnota proudového pulsu.

Pro zjednodušení: $H_{\max} = H(0)$, $B_{\max} = B(0)$.

Maximální hodnota indukce v bodě 0 podle obrázku bude

$$B_0 = \mu_0 H_0 = 143 \text{ mT} \quad (31)$$

kde: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ (permeabilita vakua)

V oblasti těsně pod povrchem materiálu ve směru osy z lze odhadnout poměrnou permeabilitu $\mu_r = 100$, takže intenzita magnetického pole bude přibližně

$$H_p = \frac{B(0)}{\mu_0 \mu_r} = 1,14 \text{ kA/m.} \quad (32)$$

S rostoucí hloubkou od povrchu materiálu je možné považovat pokles magnetické indukce a intenzity magnetického pole za exponenciální a tento pokles lze vyjádřit vztahy:

$B(z) = B_p \cdot e^{-(z/s)}$ (33) a pro intenzitu magn. pole platí $H(z) = H_p \cdot e^{-(z/s)}$ (34). Hloubku

vniku magnetického pole do materiálu lze přibližně určit ze vztahu $s = \sqrt{\frac{2}{\mu\gamma\omega}}$ (35), kde ω

je úhlová frekvence.

Výše uvedené vztahy vyjadřující chování magnetického pole v materiálu ve směru souřadné osy z je nutno chápat teoreticky, protože situaci bodového pólu vystihují velmi přibližně a za platnosti těchto předpokladů:

- 1) magnetické pole se považuje za homogenní,
- 2) nedochází k rozptylu vlivem různých heterogenit materiálu,
- 3) uvažuje se izotropní materiál,
- 4) zanedbávají se tangenciální složky intenzity a indukce
- 5) materiál se považuje za homogenní.

3.8 Jevy související se vznikem mechanické vlny

3.8.1 Lorentzova síla

Magnetické pole, které vznikne v lokální oblasti materiálu po zavedení proudového pulsu, vyvolá vznik Lorentzových sil, jež působí na pohybující se elektrické náboje (v tomto případě elektrony). Tato síla je vyjádřena vztahem ve vektorovém tvaru pomocí hustoty vířivých proudů takto:

$$\vec{F}_L = \vec{j} \times \vec{B} \quad (36)$$

Vířivé proudy se indukují v materiálu účinkem magnetického pole v materiálu. Pro hustotu těchto proudů platí obecně vztah $j = \text{rot}H$ (37)

Operátor rotace je diferenciální operátor vektorové algebry, jenž lze vyjádřit jako vektorový součin gradientu a daného vektorového pole, tedy v tomto případě intenzity H .

Uvažuje-li se jednorozměrné rozložení, lze hustotu brát ze vztahu $j(z) = j_0 e^{-\xi z}$, (38)

kde j_0 je hustota vířivých proudů na povrchu materiálu a ξ je koeficient útlumu určený

$$\text{vztahem } \xi = \sqrt{\frac{\mu\omega\gamma}{2}}. \quad (39)$$

Lorentzova síla dosahuje maximální hodnoty ve směrech, v nichž jsou vektory j a B navzájem kolmé. Poněvadž je časově proměnná, způsobuje v lokálně zmagnetované oblasti rozkmitání atomů krystalových mřížek materiálu a následně vznik mechanické vlny.

Vzhledem k orientaci normálové složky vektoru indukce vůči povrchu materiálu lze usoudit, že vznikne vlna rovinná a příčná, která se může šířit v jakémkoliv směru v rovině xy podle obrázku 30. U příčné vlny částice kmitají kolem svých rovnovážných poloh ve směru kolmém ke směru fázové rychlosti vlny. Rovněž bude vznikat také vlna povrchová (tzv. Rayleighova), která se šíří ve formě soustředných eliptických drah v rovině xy se středy v ose z . Řešení povrchové vlny není předmětem této práce, proto jí nebude věnována pozornost.

3.8.2 Magnetostrikce

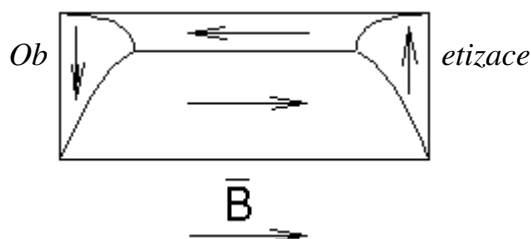
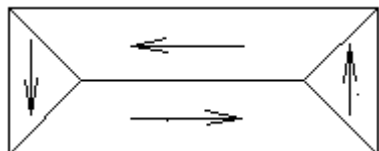
Daším fyzikálním jevem, jenž se podílí na vzniku vln, je magnetostrikce. Jedná se o jev, kdy účinkem nestacionárního magnetického pole dochází k deformaci feromagnetika, v tomto případě lokálně zmagnetované oblasti. Tyto deformace jsou provázeny mechanickým napětím, tahovým nebo tlakovým. Magnetostrikce se uplatňuje zejména u transformátorových jader, v praxi se využívá např. u magnetostrikčních snímačů lineární polohy nebo dříve u magnetostrikčních destiček.

3.8.3 Pohyby Blochových stěn

Třetím fyzikálním jevem jsou tzv. pohyby Blochových stěn. K těmto pohybům dochází při rostoucí magnetizaci materiálu v průběhu magnetování v důsledku nárůstu některých magnetických domén na úkor ostatních. Jde o domény, jejichž magnetický moment má orientaci shodnou s orientací vektoru indukce magnetického pole. V důsledku nárůstu a pohybu těchto domén nastává přesouvání hranic mezi sousedními doménami (Blochových stěn), přičemž tyto přesuny jsou provázeny vznikem Barkhausenova šumu. Intenzita tohoto šumu závisí především na intenzitě magnetického pole, na vodivosti a permeabilitě materiálu.

Vzhled domén před a v průběhu magnetizace je ukázán na obrázcích 31 a 32. Šipky vyjadřují směr výsledných magnetických momentů jednotlivých domén.

Obr. 31 Domény před magnetizací



Výše uvedené fyzikální jevy mající vliv na vznik mechanických vln působí současně, vzájemně se prolínají a tudíž není možno je od sebe oddělit. Z tohoto důvodu rozhodnutí, který z jednotlivých jevů má na vznik vlny rozhodující vliv, není jednoznačné.

3.9 Magnetomechanický jev

Přímou souvislost mezi působením magnetického pole a vznikem mechanické vlny vyjadřuje tzv. magnetomechanický jev, jenž je obecně popsán vztahem v tenzorovém tvaru:

$$T_{ij} = \kappa_{ijm} B_m, \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (40)$$

kde: T_{ij}je tenzor napětí,

κ_{ijm} ...tenzor koeficientů magnetostrikce ve směrech i, j, m

B_m vektor magnetická indukce ve směru m .

Po rozepsání rovnice (40) do složek v kartézském systému (kromě tenzoru koeficientů magnetostrikce, jenž představuje prostorovou strukturu), bude:

$$\begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix} = \kappa_{ijm} \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{pmatrix}. \quad (41)$$

Magnetomechanický jev udává, jak velká mechanická napětí vzniknou ve struktuře účinkem magnetostrikce. Jednotlivé složky napětí jsou reprezentovány tenzorem napětí. Koeficienty magnetostrikce κ se zjišťují měřením, avšak zde v případě deformace lokální oblasti jsou prakticky neměřitelné.

Tenzory lze popsat jako fyzikální veličiny, k jejichž identifikaci je potřeba více složek. Počet P těchto složek musí vyhovovat podmínce $P = D^{n'}$ (42)

kde: D ...je rozměr prostoru 1,2,3...

n' ...řád tenzoru.

Má-li tenzor určitou souměrnost, počet jeho složek se adekvátně tomu snižuje. Tenzor napětí T_{ij} podle rovnice je druhého řádu, má tedy 9 složek, tenzor koeficientů magnetostrikce κ_{ijm} je třetího řádu, pokud se neuváží souměrnosti, pak má 27 složek. Vektor indukce B_m je tenzorem prvního řádu.

4.0 Pohybová rovnice mechanické vlny

Další vztah mezi působením magnetického pole a vznikem mechanické vlny vyjadřuje pohybová rovnice vlny. Přesněji řečeno, popisuje vztah mezi Lorentzovou silou a akustickým zrychlením vlny, má tedy dynamický charakter. Pohybová rovnice je řešena pro případ rovinné, příčné harmonické vlny, která se šíří ve směru souřadné osy x .

Rovnici mechanické vlny lze předpokládat ve tvaru:

$$u(x,t) = U \cdot \cos[\omega(t \pm \frac{x}{c})], \quad (43)$$

kde: Uje amplituda výchylky částic z rovnovážné polohy,

ω ...úhlová frekvence,

cfázová rychlost šíření vlny.

Rovnici vlny lze uvažovat za platnosti následujících předpokladů:

1) předmět, v němž se vlna šíří, není na koncích upevněn,

2) nedochází k interferenci vln.

Ve skutečnosti je však vlna při svém šíření materiálem tlumena, je tedy třeba přistoupit k vyjádření vlny zohledňující útlum, čili:

$$u(x,t) = U \cdot e^{-\alpha x} \cdot \cos[\omega(t \pm \frac{x}{c})], \quad (44)$$

kde α je koeficient útlumu, U je netlumená amplituda výchylky.

$$\text{Pak lze psát: } F_L = m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad (45)$$

kde: m ...je hmotnost uvažovaného objemu rozkmitané oblasti,

u ...výchylka atomů z rovnovážné polohy,

tčas.

Diferenciální výraz na pravé straně představuje akustické zrychlení, tedy zrychlení částic pohybujících se kolmo na směr fázové rychlosti vlny. Lorentzovu sílu lze uvažovat ze vztahu (36) a po dosazení do pohybové rovnice (45) a úpravách vyjde:

$$j_0 e^{-\xi x} B = -mU\omega^2 \cos[\omega(t \pm x/c)] \quad (46)$$

kde j_0 ...hustota vířivých proudů na povrchu materiálu

ξ ... koeficient útlumu vířivých proudů.

Ze vztahu (46) je možné spočítat maximální amplitudu výchylky vlny pro zvolenou frekvenci z již určeného frekvenčního spektra. Zároveň je zřejmé, že příslušná amplituda

vlny závisí na hmotnosti uvažovaného objemu, frekvenci, magnetické indukci (tedy na hloubce pod povrchem) a na hustotě vířivých proudů.

Tímto je ukázán teoretický aparát pro možné stanovení amplitudy vlny. Může platit pouze čistě teoreticky, poněvadž nelze přesněji stanovit velikost Lorentzových sil, hmotnost uvažovaného rozkmitaného objemu a obtížně lze stanovit dominantní frekvenci.

4.1 Útlum vln ve struktuře

V reálných materiálech, které jsou polykrystalické, anizotropní a nehomogenní, dochází při šíření mechanických vln ve struktuře k jejich útlumu, a to vlivem těchto tří činitelů:

- 1) absorpcí – jejím vlivem dochází k pohlcování energie vnitřním třením a elastickou hysterezí a následnou přeměnou energie vlny např. na tepelnou energii.
- 2) rozptylem – při němž dochází k odrazu vlny ve struktuře (vlivem např. pórů, zrn, fázových změn) materiálu, k difrakci a lomu ve směru šíření vlny na rozhraní.
- 3) divergence – tedy rozbíhavostí a též disperzí způsobené různou rychlostí šíření vlny podle jejího módu a frekvence.

V případě struktury materiálů, jež jsou nehomogenní, polykrystalické a anizotropní, je koeficient útlumu α roven součtu útlumu absorpcí α_p a rozptylem

$$\alpha_r: \alpha = \alpha_p + \alpha_r \quad (47)$$

Amplituda výchylky exponenciálně klesá s dráhou uraženou od okamžiku vzniku vlny podle vztahu: $u(x) = Ue^{-\alpha x}$ (48)

Intenzita útlumu vln ve struktuře závisí především na frekvenci vlny. Maximálních hodnot dosahuje, pokud se vlnová délka vln přibližuje např. u litin velikosti útvarů grafitu. Je-li vlnová délka značně odlišná, pak útlum dosahuje malého významu.

5.0 Experimentální část

Cílem této experimentální části práce je pokusit se o experimentální snímání akustické emise magnetických impulsů metody magnetického bodového pólu pro přístroj typu

DOMÉNA. V případě záznamu přítomnosti mechanických vln v materiálu pořídit akusticko-emisní spektrogram a nakonec zhodnotit možnosti aplikací a dalšího vývoje.

5.1 Vzorky materiálu

Pro potřebu snímání mechanických vln byly zajištěny vzorky materiálu v podobě plochých tenkých tyčí, přičemž dvě tyče byly litinové a jedna ocelová. Litinové tyče jsou vyrobeny ze šedé litiny tavby A s lupínkovým grafitem, ocelová tyč z oceli 12 050.1, normalizačně žíhané. Dále byla k dispozici sada litinových destiček taveb č. 1, 2, 3, 4, a 5 z litiny s kuličkovým grafitem. Destičky byly vyřezány z masivních bloků odlitých ve slévárně FOCAM Olomouc s r.o., chemické složení jednotlivých taveb těchto destiček bude uvedeno v tabulkách dále.

Rozměry vzorků jsou následující:

litinová tyč 160 x 43 x 3 mm

ocelová tyč 200 x 40 x 3 mm.

Sada destiček 40x40 mm o tloušťkách v rozmezí 4-12 mm.

Tabulka 1

Chem. prvek	C [%]	Mn [%]	Si [%]	S [%]	Cu [%]	Cr [%]	Mg [%]
konečná tavba	3,41	0,25	2,20	0,014	1,00	0,06	0,045

Chemické složení tavby č. 1 odpovídá tvárné litině s kuličkovým grafitem, označené GGG 70 podle normy DIN, podle ČSN jde o litinu 42 2307. Litina vykazuje perlitickou strukturu matrice, pevnost v tahu činí přibližně $R_m=700$ MPa.

Tabulka 2

Chem. prvek	C [%]	Mn [%]	Si [%]	S [%]	P [%]	Cu [%]	Cr [%]	Mg [%]
konečná tavba	3,30	0,25	2,45	0,016	0,02	0,04	0,05	0,046

Chemické složení tavby č. 2 odpovídá tvárné litině označené GGG 40 podle normy DIN, podle ČSN jde o litinu 42 2304. Litina vykazuje feritickou strukturu matrice, pevnost v tahu činí přibližně $R_m=400$ MPa.

Tabulka 3

Chem. prvek	C [%]	Mn [%]	Si [%]	S [%]	P [%]	Cu [%]	Cr [%]	Mg [%]
konečná tavba	3,46	0,26	2,12	0,014	0,02	0,05	0,07	0,019

Chemické složení tavby č. 3 odpovídá tvárné litině s feritickou strukturou matrice.

Tabulka 4

Chem. prvek	C [%]	Mn [%]	Si [%]	S [%]	P [%]	Cu [%]	Cr [%]	Mg [%]
konečná tavba	3,63	0,26	2,44	0,022	0,03	1,01	0,04	0,016

Chemické složení tavby č. 4 odpovídá tvárné litině s perlitickou strukturou matrice.

Tabulka 5

C	C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Ni [%]	Cu [%]
obsah	0,42-0,50	0,50-0,80	0,17-0,37	max.	max.	max.	max.	max.
				0,040	0,040	0,25	0,30	0,30

Chemické složení tavby č. 5 odpovídá oceli 12 050.1.

Litiny tavby č. 1 a 2 jsou oproti ostatním tavnám legovány mědí, přičemž tato přísada zvyšuje tvrdost litiny a významně zvyšuje remanentní intenzitu magnetického pole.

5.2 Měřicí přístroje a pomůcky

Měření bylo realizováno pomocí magnetického strukturuometru DOMÉNA B3.b, jenž sloužil jako zdroj magnetovacích impulsů a následně ke generování mechanických vln. Vlastní akustická emise byla snímána pomocí těchto zařízení:

Piezelektrický snímač: miniaturní PZT (průměr 3 mm)

citlivý na všechny typy vln

frekvenční rozsah 30 kHz-1,2 MHz

Předzesilovač: frekvenční rozsah 0-2 MHz

Zobrazovač: DSO LeCroy Waverunner 2350 MHz, 8 bits, 1 GS/s.

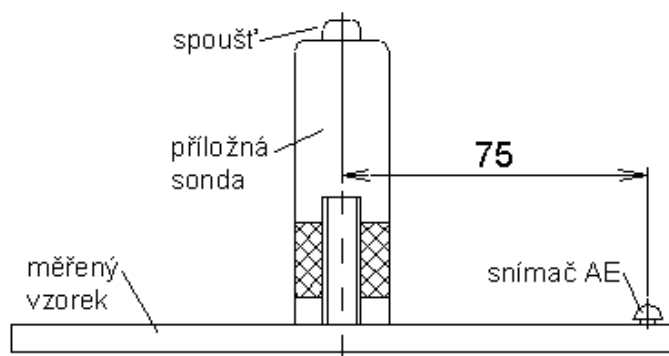
Použité zesílení při snímání akustické emise bylo v rozsahu 60 až 80 dB.

5.3 Postup měření

Po zapnutí magnetického strukturuometru Doména B3.b byla nastavena úroveň magnetizace na nejvyšší stupeň, tedy na M8. Následovalo nastavení režimu dlouhé magnetizace, při němž je do příslušného materiálu vysíláno pět po sobě jdoucích proudových impulsů. Jednotlivé impulsy jsou od sebe odděleny časovým intervalem přibližně jedna sekunda. Tímto byl přístroj připraven k magnetování.

Poté byl k povrchu měřeného vzorku přilepen snímač akustické emise, přičemž akustická vazba mezi čelem snímače a povrchem materiálu byla zajištěna vazelínou. Vzájemné rozmístění příložené sondy strukturuometru a snímače AE při měření dlouhých tyčí ukazuje obr. 33. Nakonec bylo nutné vzájemně propojit snímač AE

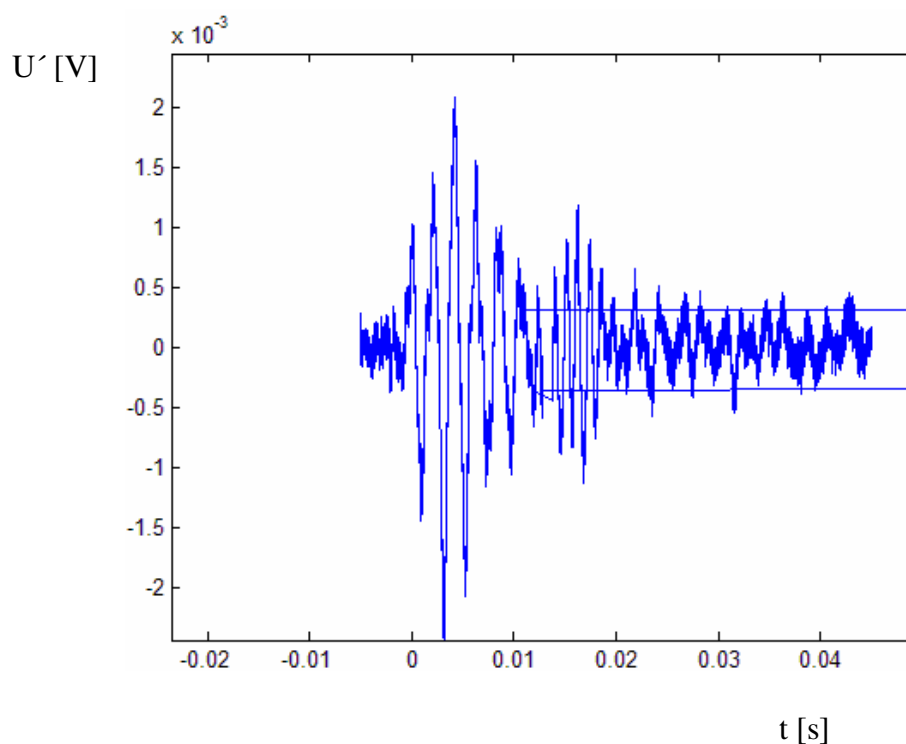
s předzesilovačem a zobrazovačem ve finální soustavu ke snímání akustické emise. Následně bylo provedeno snímání všech vzorků.



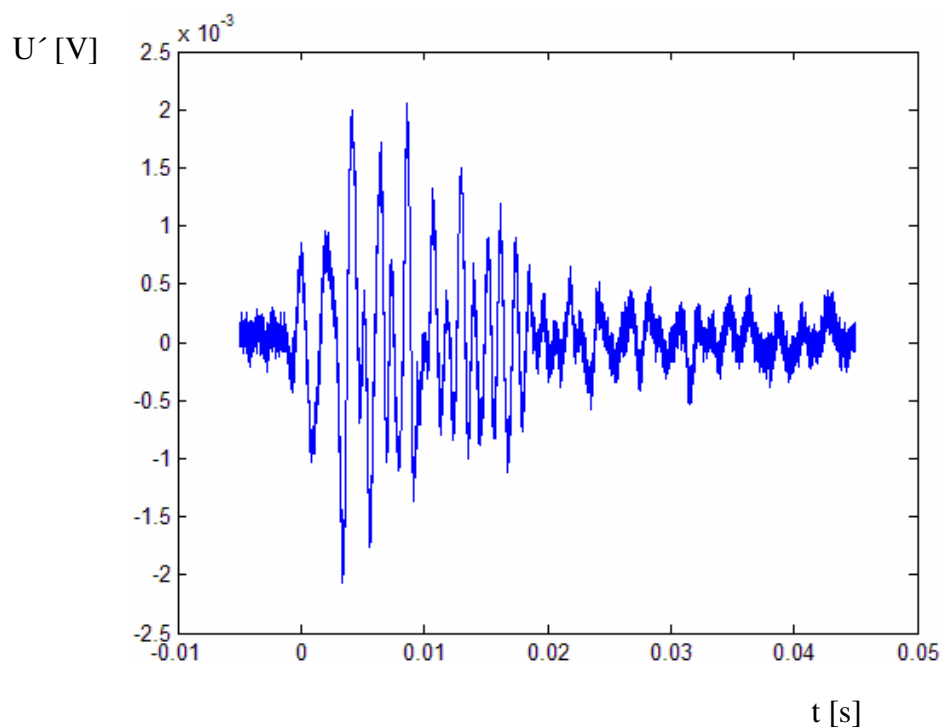
Obr. 33-Poloha příložné sondy a snímače AE

5.4 Akusticko-emisní spektrogramy

Ze souborů naměřených hodnot pořízených piezoelektrickým snímačem AE byly pomocí programu Matlab vyhotoveny akusticko-emisní spektrogramy, jež zachycují průběhy emisních událostí.

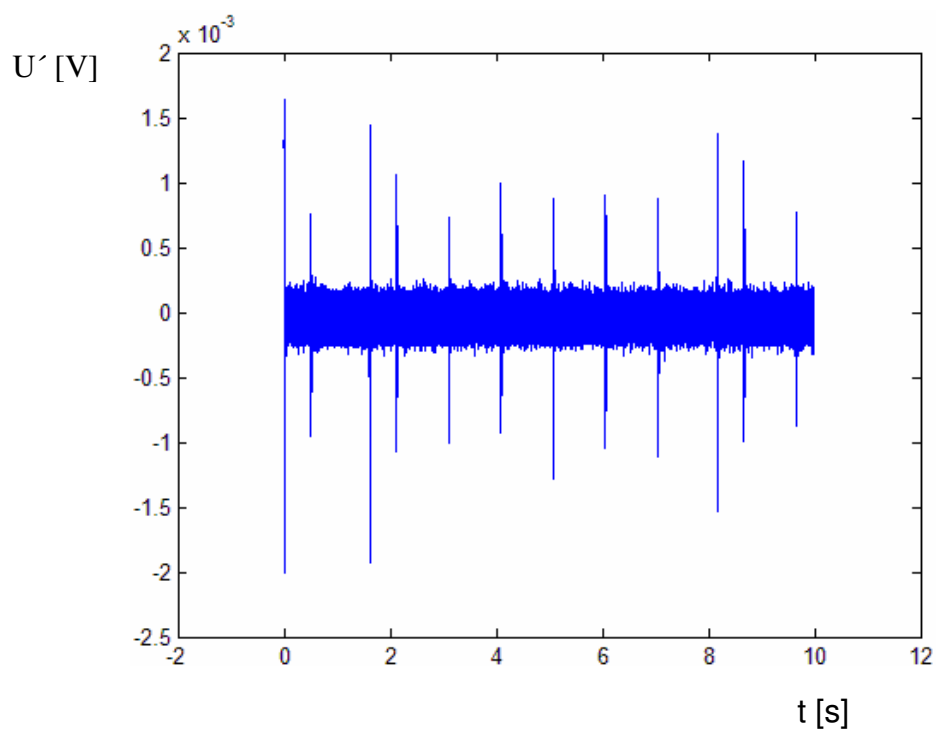


Obr. 34-Spektrogram dlouhé litinové tyče

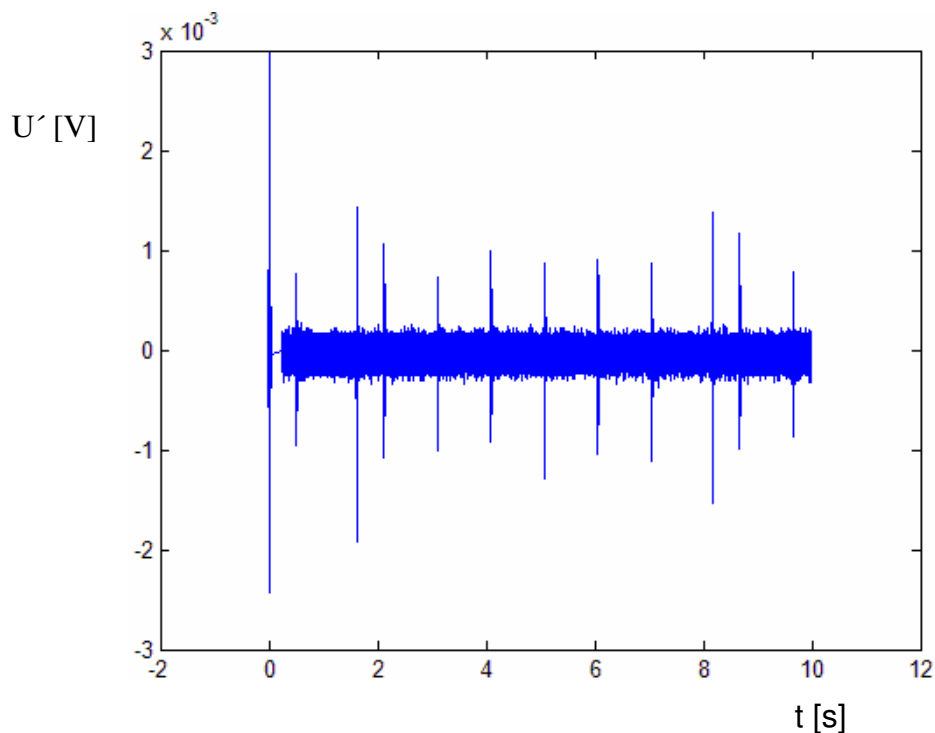


Obr. 35-Spektrogram dlouhé ocelové tyče

Na obrázcích 35 a 36 jsou uvedeny spektrogramy pořízené z měření dlouhé ocelové a litinové tyče, přičemž oba zachycují průběh snímání po celou dobu pěti po sobě vyslaných magnetovacích impulsů.



Obr. 36-Průběh snímání u dlouhé litinové tyče



Obr. 37-Průběh snímání u dlouhé ocelové tyče

Poznámka

Akusticko-emisní spektrogramy jednotlivých vzorků vypadají z vizuálního hlediska identicky, rozdíly nejsou vizuálně patrné. Z tohoto důvodu uvádím záznamy pořízené z měření na dlouhé litinové a ocelové tyči, rozdíly mezi spektrogramy pořízených na ostatních vzorcích budou diskutovány v následujícím závěru.

6.0 Vyhodnocení a závěr

Účelem experimentální části této práce bylo pokusit se o snímání akustické emise v materiálu vzniklé působením magnetických impulsů strukturuometru Doména typu B3.b. V případě kladného výsledku podat návrhy na zdokonalení tohoto přístroje, aby umožňoval generovat akustickou emisi ultrazvukových frekvencí.

Nyní k hodnocení parametrů naměřených emisních událostí. Celková doba trvání emisní události činí u všech měřených vzorků 20 ms, což přesně odpovídá periodě kondenzátorově vybíjeného proudového impulsu. Intenzitu emisních událostí je vhodné vyjadřovat formou elektrického napětí, poněvadž energie mechanických vln se v piezoelektrickém snímači AE transformuje na elektrické napětí. Maximální amplituda

emisních událostí činí u všech vzorků 2 mV, přičemž amplituda okolního nízkofrekvenčního šumu se pohybuje kolem 0,3 mV. Maximální amplitudy by mělo být teoreticky dosaženo v době, kdy proud impulsu nabývá max. hodnoty, protože max. proud má směrodatný vliv na maximum Lorentzovy síly. Zajímavé je, že amplituda dosahuje maxima v čase podstatně delším. U litinové tyče je tato doba 7 ms, zatímco u ocelové tyče 5 ms. Tato skutečnost může souviset s možným rychlejším zmagnetováním oceli oproti litině v důsledku vyšší konduktivity, ovšem toto tvrzení není jisté. V případě destiček z tvárné litiny s feritickou maticí činí doba do dosažení max. amplitudy 5 ms, u litiny s perlitickou maticí 7 ms. Ferit je magneticky měkčí než perlit, může docházet k rychlejšímu zmagnetování.

Podle frekvenčního spektra přísluší proudovému impulsu rozsah frekvencí 0-2 450 Hz, přičemž převážně významný je do 550 Hz. Okolní nízkofrekvenční šum vykazuje frekvence kolem 100 Hz. Tomuto rozsahu pak odpovídá spektrum frekvencí emisních událostí. Jedná se tedy o emisi v pásmu slyšitelného zvuku. Jelikož emisní události nevykazují ultrazvukové frekvence, nesplňují proto kritérium standardní akustické emise. Z tohoto důvodu není možné oddělit emisní události od nepříznivých, rušivých jevů.

Vzhledem k rozsahu významných frekvencí emisních událostí se vlnové délky mechanických vln pohybují řádově v metrech, tudíž velmi vysoce přesahují velikost útvarů grafitu v litinových vzorcích. Z toho vyplývá, že útlum vln není významný. Útlum vln závisí krom frekvence na tvaru a rozložení grafitu v matici, na obsahu nečistot, vměsků a celkově na heterogenitě litiny.

V průběhu snímání AE se ukázalo, že velmi nežádoucí vliv na průběh emisních spektrogramů mají vibrace způsobené stiskem tlačítka na sondě a ručním přidržováním sondy na povrchu materiálu. Tyto vibrace se projevovaly vnášením nežádoucích mechanických kmitů do emisních událostí. Podle obr. 36 a 37 odpovídá emisním událostem pátý až devátý výkmit zleva, ostatní výkmity jsou od vibrací. Amplitudy jsou mírně proměnné, což je opět způsobeno vnesenými vibracemi. Z tohoto důvodu není snímání příliš objektivní. Pro opravdu přesné snímání je třeba strukturuometr vybavit dálkovým ovládáním a polohu sondy na materiálu pevně zajistit mechanickým přípravkem. Měření též prokázalo, že magnetizace Domény B3.b je příliš slabá pro generování ultrazvuku. Bylo by třeba dosáhnout základní frekvence vln 80-100 kHz, čemuž odpovídají periody proudového impulsu 10 až 12,5 μ s. Horní hranici frekvencí je vhodné omezit na 2 MHz, aby nedocházelo k příliš velkému útlumu vln. Pro buzení ultrazvuku na základě magnetostrikce je nutné, aby cívkou procházel co největší proud, přičemž není podstatný způsob, jak se toho dosáhne. Pro dosažení proudu několika desítek A je třeba zvýšit nabíjecí napětí na kondenzátoru, řekněme z 16 na 600 V a

snížit odpor magnetovacího obvodu na řádově desetiny ohmu. Změna odporu je však silně omezena impedancí magnetovací cívky. Periodu proudového impulsu lze snadno měnit změnou kapacity kondenzátoru. Čím nižší kapacita, tím kratší perioda pulsu a rychlejší vybití. Z výše uvedených skutečností vyplývá, že metoda kondenzátorového vybíjení je pružná, levná, spolehlivá a tedy vhodná k magnetování materiálu za účelem generování mechanických vln. Pro dosažení ultrazvuku by bylo třeba snížit indukčnost cívky řádově na μH , což bohužel není prakticky realizovatelné.

Metoda bodového pólu se zatím u nás používá k nedestruktivnímu měření tvrdosti u odlitků, v Rusku slouží ke kontrole ocelových plechů. Umožňuje měřit také pevnost či hloubku prokalení. Pokud by se podařilo po úpravách dosáhnout emise ultrazvuku, mohla by sloužit v oblasti ultrazvukové defektoskopie. Tuto otázku a dále optimalizaci obvodu strukturuometru je však nutno podrobit rozsáhlému výzkumu ve spolupráci s odborníky elektrotechnického a magnetického zaměření.

7.0 Seznam literatury

- [1] M. Kreidl, R. Šmíd: Technická diagnostika. BEN 2006, ISBN 80-7300-158-6
- [2] J. Pluhař, J. Koritta: Strojírenské materiály. SNTL Praha 1977, č. p. 04-208-82
- [3] L. Sodomka: Fyzikální vlastnosti pevných látek a polymerů. VŠST Liberec 1975, č. p. 55-807-75
- [4] L. Sodomka: Fyzika kondenzovaných látek II. TU Liberec 2002, ISBN 80-04-21904-7
- [5] J. Alaxin: Fyzikální metalurgie. VŠST Liberec 1986, č. p. 55-820-86
- [6] L. Haňka: Teorie elektromagnetického pole. SNTL Praha 1975, č. p. L25-C3-IV-41/58 135
- [7] L. Dědek, L. Dědková: Elektromagnetismus. VUTIUM Brno 1998, ISBN 80-214-1106-6
- [8] A. Angot: Užitá matematika pro elektrotechnické inženýry. SNTL Praha 1977.
- [9] L. Sodomka, J. Valíček, P. Wyslych, M. Kušnerová: Základy fyziky pro aplikace, 2007, ISBN 978-80-254-0153-8
- [10] B. Skrbek: Lokální magnetická strukturoskopie. Vědecké pojednání, TU Liberec 2005, ISSN 1801-1128

- [11] B. Skrbek: Využití interakce struktury litiny s akustickými vlnami. Vědecké pojednání, TU Liberec 2001, ISBN 80-7083-496-X
- [12] J. Ullmann, B. Sivek: Použití kondenzátorového zdroje pro cirkulární magnetizaci trubek. Sborník konference Defektoskopie 95, Tábor 1995.
- [13] P. Turek: Sborník konference Defektoskopie 2005, ISSN 1213-3825
- [14] J. Rez: Defektoskopie. Učební text k přednáškám. FEI VUT Brno, 1996.

