

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní



Michal Teršl

Defektoskopie slitin na bázi FeAl a Fe₃Al vířivými proudy.

**The Alloy Materiology based on FeAl and Fe₃Al of
eddy currents.**

Diplomová práce

2005



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jméno a příjmení

Michal T E R Š L

studijní program

M 2301 Strojní inženýrství

obor

2303 T 002 Strojírenská technologie

zaměření

Materiálové inženýrství

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje diplomová práce na téma:

Defektoskopie slitin na bázi FeAl a Fe₃Al vířivými proudy

Zásady pro vypracování:

(uveďte hlavní cíle magisterské práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Proveďte rešerši stavu defektoskopie intermetalik s ohledem na hledání vnitřních a povrchových plošných vad.
2. Stanovte základní fyzikální vlastnosti (nezbytné pro stanovení podmínek NDT) navrženého aluminidu.
3. Homogenní vzorek aluminidu opatřete náhradními vadami ke kvantifikaci výsledků nedestruktivního testování a proveďte měření metodou vířivých proudů.
4. Získané výsledky vyhodnoťte a formulujte závěry.

Forma zpracování diplomové práce:

- průvodní zpráva v rozsahu 30 - 40 stran
- přílohy

Seznam literatury (uveďte doporučenou odbornou literaturu):

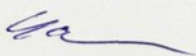
- [1] MÍŠEK,B.,PTÁČEK,L.: Defektoskopie a provozní diagnostika, VUT Brno, 1992
- [2] ČSN 05 1179 Nedestruktivní zkoušení svarů vířivými proudy
- [3] literatura, příp.www stránky o slitinách FeAl

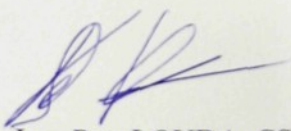
Vedoucí diplomové práce:
Konzultant diplomové práce:

doc.Ing. Břetislav Skrbek,CSc.
Ing.Adam Hotař

L.S.




prof. RNDr.Petr ŠPATENKA,CSc.
vedoucí katedry


doc. Ing. Petr LOUDA, CSc.
děkan

V Liberci dne 31.10. 2003

Platnost zadání magisterské práce je 15 měsíců od výše uvedeného data. Termíny odevzdání magisterské práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní obor M 2301 – Strojní inženýrství

Strojírenská technologie

Zaměření materiálové inženýrství

Katedra materiálů

Defektoskopie slitin na bázi FeAl a Fe₃Al vířivými proudy.

**The Alloy Materiology based on FeAl and Fe₃Al of
eddy currents.**

KMT- 184

Michal Teršl

Vedoucí diplomové práce:

doc.Ing. Břetislav Skrbek, CSc.

Konzultant diplomové práce:

Ing. Adam Hotař

Rozsah práce:

Počet stran: 62

Počet tabulek: 10

Počet obrázků: 47

Počet vzorců: 13

UNIVERZITNÍ KNIHOVNA
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBERCI



3146074981

V Liberci, dne 2.11.2004

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra materiálu

ANOTACE

Jméno:.....Michal Teršl

Obor:.....Strojírenská technologie

Zaměření:.....Materiálové inženýrství

Zadání práce:...Defektoskopie slitin na bázi FeAl a Fe₃Al vířivými proudy

Číslo práce:.....184

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

Konzultant:.....Ing.Adam Hotař

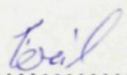
Tématem mé diplomové práce je ověřit funkčnost metody vířivých proudů na slitinách na bázi Fe₃Al a FeAl. Za tímto účelem jsou v této práci zhodnoceny fyzikální vlastnosti těchto slitin, významné pro funkčnost metody a je provedeno měření náhradních vad na zkušebním vzorku. Získané výsledky jsou porovnány s materiály, na nichž jsou vířivé proudy již běžně aplikovány.

The main theme of my dissertation work is to prove function of eddy current method of alloy based on FeAl a Fe₃Al. In order to reach this aim in my work there are appraised alloy physical features, significant for method function and further, there is done measurement of spare defects of the trial sample. Received results are compared with materials that the eddy currents are ordinarily adopted on.

Místopřísežné prohlášení:

„Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vykonal samostatně s použitím uvedené literatury a pod vedením vedoucího diplomové práce a konzultanta.“

V Liberci, dne 2.listopadu 2004

.....


Michal Teršl

Poděkování:

Na tomto místě bych chtěl poděkovat doc.Ing. Břetislavu Skrbkovi a Ing. Adamovi Hotařovi za jejich odborné vedení. Mé poděkování patří rovněž všem, kteří mi svými radami pomohli při vypracování mé diplomové práce, zvláště pak Ing. Petru Tichému z ATG s.r.o. za jeho pomoc při tvorbě experimentu. V neposlední řadě má vděčnost patří mým rodičům stejně jako prarodičům za jejich psychickou a hmotnou podporu v průběhu celého mého studia.

OBSAH

1. ÚVOD.....	9
2. INTERMETALICKÉ SLOUČENINY.....	11
2.1. Intermetalické sloučeniny obecně.....	11
2.1.1. Základní poznatky o intermetalikách.....	11
2.1.2. Vlastnosti intermetalických fází.....	14
2.2. Slitiny na bázi aluminidu železa Fe_3Al	15
2.2.1. Fyzikálně metalurgické poznatky o aluminidu železa Fe_3Al	15
2.2.2. Vlastnosti a technologie zpracování	17
2.2.3. Použití aluminidu železa.....	19
3. DEFEKTOSKOPIE.....	21
3.1. Vady materiálu.....	21
3.2. Přehled defektoskopických metod.....	22
3.3. Metoda vířivých proudů	23
3.3.1. Povrchový jev.....	24
3.3.2. Metoda s průchozí cívkou.....	26
3.3.3. Metoda s příložnou cívkou.....	29
3.3.3.1. Rozložení vířivých proudů pod příložným snímačem.....	31
3.3.3.2. Hranice účinnosti příložné sondy.....	33
3.3.3.3. Vyhodnocení signálu při zkouškách vířivými proudy.....	34
4. PRAKTICKÁ ČÁST.....	36
4.1. Zkušební vzorek	36
4.1.1. Permeabilita zkušebního vzorku.....	37
4.1.2. Elektrická vodivost aluminidů železa.....	37
4.1.3. Získání elektrické vodivosti zkušebního vzorku.....	38
4.1.3.1. Měření elektrického odporu, čtyřbodová metoda.....	38
4.1.3.2. Vzorky pro měření elektrického odporu.....	40
4.1.3.3. Naměřené a spočítané hodnoty.....	40
4.2. Náhradní vady na zkušebním vzorku.....	41
4.3. Měřicí aparatura.....	43
4.3.1. Přístroj ZETEC MIZ-21 SR.....	43
4.3.2. Použité sondy.....	44

4.4. Optimální nastavení pro zkušební vzorek.....	45
4.4.1. Hledání optimální frekvence.....	46
4.4.2. Hodnocení optimálního nastavení.....	48
4.5. Měření náhradních vad.....	49
4.5.1. Hodnocení měření náhradních vad.....	51
4.6. Porovnávací vzorky.....	51
4.6.1. Měření náhradních vad na hliníku.....	52
4.6.2. Měření náhradních vad na austenitu.....	54
4.7. Porovnání naměřených hodnot.....	56
4.8. Hodnocení porovnaných výsledků.....	59
5. ZÁVĚR.....	60
6. POUŽITÁ LITERATURA.....	63

1. ÚVOD

Slitiny na bázi FeAl a Fe₃Al či jednodušeji aluminidy jsou součástí skupiny materiálu jež se nazývají intermetalickými sloučeninami.

Intermetalika jako takové nejsou novými materiály a jejich používání je známe již ze starého Egypta 2500 let před našim letopočtem. K podrobnějšímu prostudování se však intermetalika dostaly až v padesátých letech minulého století. Nepodařilo se však překonat jejich značnou křehkost, která bránila tomu aby se tento materiál dostal do širšího podvědomí konstruktérů a tak byl tento směr výzkumu koncem šedesátých let opuštěn. Později bylo ale zjištěno, že tvárnost a zpracovatelnost intermetalik je možné výrazně zvýšit využitím poznatků fyzikální metalurgie. Tak se tyto materiály dostaly opět do centra zájmu a byly započaty nové výzkumné programy s úkolem vyvinout materiály na bázi intermetalických fází s pevností keramik a plasticitou kovů.

Velký a dlouhodobý zájem o intermetalika je zatím v USA a Japonsku. V Evropě lze najít snahy o použití intermetalik, popřípadě o aplikovaný výzkum zejména v Německu, ve Francii a v Anglii. V České republice nejsou s technologií výroby intermetalických fází zatím velké zkušenosti. Pokud jde o aplikovaný výzkum, velká část rozhodujících informací není publikovaná, a proto se i u nás začalo se získáváním vlastních zkušeností a znalostí. Ty se ovšem nemohou týkat pouze vlastního materiálu, ale i všech výrobních technologií a jiných technických odvětvích, které mohou tento materiál provázet ve výrobním procesu. Nedílnou součástí takového procesu je i kontrola výrobku.

V celkovém souboru kontrolních zkoušek mají ve výrobě význačné místo zkoušky defektoskopické. Nedestruktivní zkoušení materiálu se zabývá zjišťováním skrytých vad takovými metodami, při nichž se výrobky neporuší. Výrobky takto zkoušené mohou tedy při provozní nezávadnosti skrytých vad sloužit účelům, pro něž byly vyrobeny, to má samozřejmě velký ekonomický význam. Další význam nedestruktivního zkoušení je v jeho působení na technologii výroby. Příčiny vzniku vad, které se u výrobku systematicky vyskytují, jsou v technologických závadách. Většinou tedy při důkladné kontrole a správném rozboru vadnosti výrobku lze již v ověřovacích seriích zjistit technologickou nezávadnost.

V první části této práce se tedy věnuji samotnému materiálu. Snažím se ho popsat z metalurgického hlediska a nastínit jeho mechanické vlastnosti. Nebezvýznamný je i popis možných zpracovatelských technologií a konstrukčních použití ve strojírenství.

Každá technologie je svým způsobem charakterizována i možnými vadami, které při ní mohou vzniknout. Tak např. u slévání se může jednat o bubliny, póry, bodliny atd. a naopak u tváření se dají předpokládat spíše plošné vady. Už z tohoto je možné usuzovat na vhodnou volbu metody zkoušení.

V druhé tématické části teorie již popisují užitou defektoskopickou metodu. Stručné rozdělení vad a popis všech nedestruktivních zkoušek a jejich uplatnění má za úkol nastínit stupeň významnosti metody vířivých proudů a ukázat její místo v celkovém souhrnu nedestruktivních zkoušek. Princip metody jsem pak popsal na zkoušce z průchozí cívkou, zatímco na metodě s příložnou cívkou, která byla použita u experimentu, jsem se pokusil popsat spíše některé praktičtější záležitosti, jež se týkají měření touto metodou.

V experimentální části práce jsem v první řadě představil vzorek materiálu, který byl k měření využit. Jde především o jeho chemické složení a fyzikální vlastnosti, které jsou významné pro metodu vířivých proudů. V této části práce jsem nakonec přistoupil i ke změření elektrické vodivosti zkušebního vzorku. Dále jsou popsány náhradní vady, které byly vytvořeny v testovaném vzorku, využitá měřicí aparatura a nakonec i porovnávací měrky s nimiž jsou naměřené výsledky zkušebního vzorku srovnávány.

Všechny výsledky měření jsou zobrazeny jednotlivě a nakonec jsou pak některé hodnoty porovnány společně, jde o výsledky na různých materiálech, ale drážky jsou rozměrově shodné. V závěru jsou shrnuty jak teoretické poznatky, tak veškeré výsledky experimentu.

2. Intermetalické sloučeniny

2.1 Intermetalika obecně

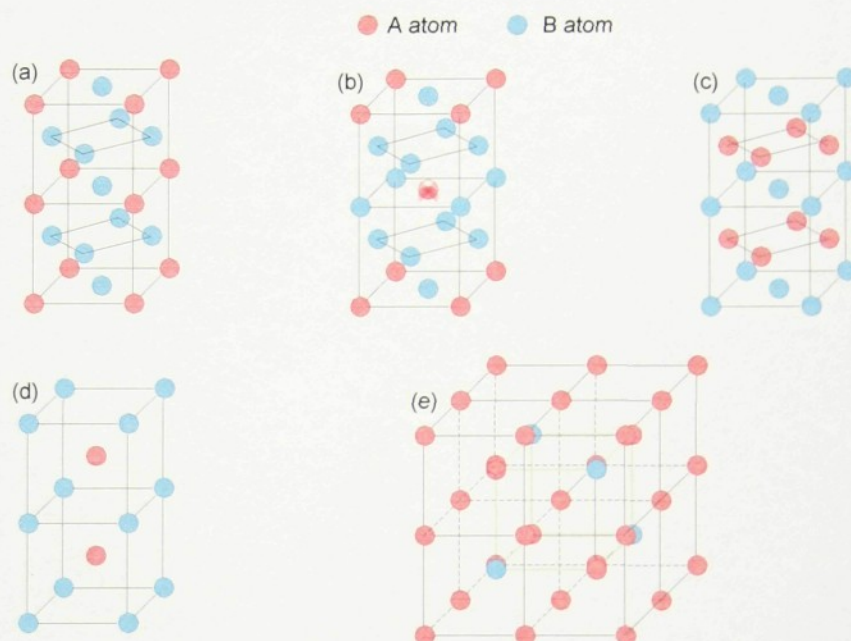
Intermetalika jsou z hlediska struktury tuhé roztoky nebo sloučeniny, ve kterých jsou jednotlivé atomy pod určitou kritickou teplotou T_c uspořádány na dlouhou vzdálenost. Většinou existují v relativně úzkém rozmezí koncentrací kolem jednoduchých stechiometrických složení. [3]

Struktura intermetalik souvisí s velmi silnou, do určité míry defacto homeopolární vazbou mezi nestejnými atomy a odtud se odvozují i mechanické vlastnosti intermetalik. Jejich tvrdost a vysoká pevnost při vysokých teplotách tvoří z intermetalik slibnou variantu při vývoji nových materiálů pro použití za vysokých teplot.

2.1.1 Základní poznatky o intermetalikách

Za modelové uspořádané tuhé roztoky, jak se také Intermetalické fáze často nazývají, se považují fáze Cu_3Au a CuAu , které vznikají při teplotách pod 400°C v binárním systému $\text{Cu} - \text{Au}$. Tyto fáze mají strukturu $L1_2$ resp. $L1_0$. Struktura $L1_2$ je typická také v systému Ni-Al . Např. intermetalikum Ni_3Al bylo původně známo jen jako vytvrzující fáze γ v superslitinách. Také od tuhých roztoků s krychlovou prostorově středěnou mřížkou se odvozují intermetalické fáze. Takovou strukturou jsou např. B2 známa u NiAl a FeAl a dále struktura DO_3 , jejímž typickým příkladem je právě Fe_3Al . Jednotlivé typy struktur jsou znázorněny na obr.1.

Materiály se strukturou $L1_2$ jsou zajímavé zejména proto, že vykazují tzv. teplotní anomálii, tj. obrácenou teplotní závislost smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$. U Ni_3Al roste $R_{p0,2}$ s rostoucí teplotou k maximu okolo 650°C a pak teprve klesá. Podobný jev je znám i u Fe_3Al .



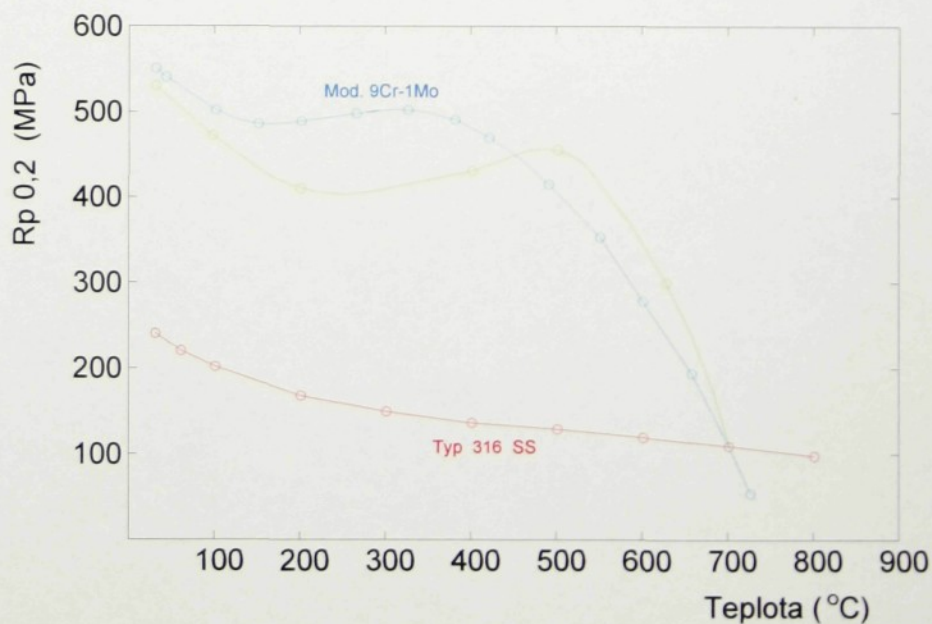
Obr.1 Uspořádání tuhých roztoků s krychlovou plošně středěnou mřížkou [3]

(a) Struktura $L2_1$ (např. Ni_3Al , Cu_3Au)

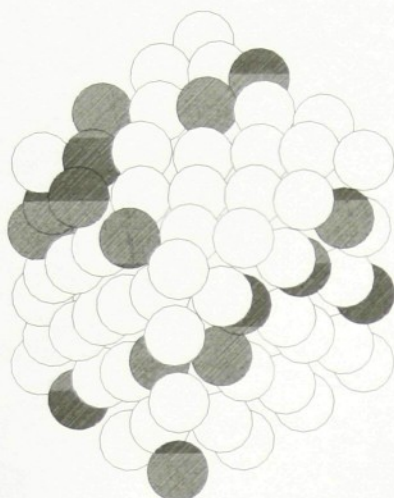
(b) Struktura $D0_{22}$ (např. $TiAl_3$)

(c) Struktura $L1_0$ (např. $CuAu$, $NiTi$)

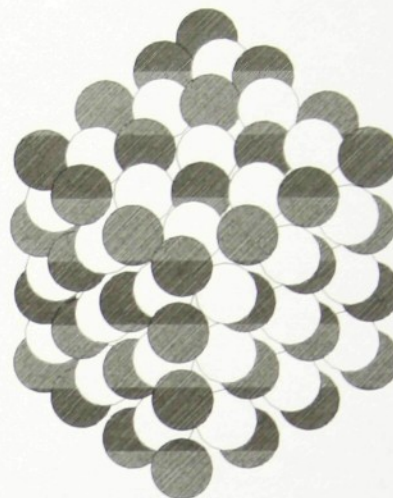
(d) Struktura $B2$ (např. Fe_3Al)



Obr.2. Porovnání teplotní závislosti meze kluzu $Rp_{0,2}$ aluminidu železa a ocelí (feritická chromová a austenitická nikelchromová) [8]



(a)



(b)

Obr.3. Rozmístění atomů v krystalové mříži [3]

a) neuspořádaná struktura běžných slitin

b) pravidelné uspořádání atomů v intermetalických fázích

Křehkost při běžných teplotách je zatím hlavní závadou při výběru vhodného intermetalika. Existují hlavně tři příčiny.

- a) skluzové napětí je veliké ve srovnání s lomovým napětím
- b) nedostatek aktivních skluzových systémů
- c) malá pevnost podél rozhraní zrna

V některých případech nestačí ani potřebný počet skluzových systémů.

Polykrystalická slitina se láme po velmi malé deformaci. Malá tvárnost souvisí s interkrystalickým lomem. Nevlastní křehkost souvisí s nežádoucími příměsemi jako S, P, Sn, Sb, které vzhledem ke své vysoké elektronegativitě odčerpávají náboj z kovové vazby na rozhraní, snižují tak kohezi a dochází k interkrystalickému lomu. K potlačení tohoto vlivu se používá přídavek boru do 1 % at, ale mechanismus tohoto efektu, i když byl mnohokrát potvrzen nebyl jednoznačně vysvětlen.

Řada intermetalik si zachovává uspořádanou strukturu až do teploty tání ($T_c > T_m$). U jiných intermetalik dochází k přechodu do neuspořádaného stavu při nižší teplotě ($T_c < T_m$). Slitina Fe_3Al např. prochází před přechodem do neuspořádaného stavu dokonce dvěma uspořádanými stavy D0_3 a B_2 . (viz. tab.I)

2.1.2. Vlastnosti intermetalických fází

Intermetalické fáze mají řadu vlastností, pro které jsou jako konstrukční materiály pro použití za vysokých teplot velice atraktivní:

a) Intermetalika jsou pevná: jejich pevnost se zvyšující teplotou neklesá tak rychle jako u běžných slitin. Intermetalika se strukturou $L1_2$ a některé i se strukturou $D0_3$ vykazují dokonce anomální růst kritického skluzového napětí s teplotou.

a) Intermetalika vytvořené různými kombinacemi Al, Ti a Si (tj. aluminidy, titanidy a silicidy) mají nízkou až velmi nízkou hustotu (viz. Tab.I). Tyto materiály mají vysoký měrný modul (E/p), který je mimořádně důležitý pro transportní aplikace (vesmírné projekty, letecká i povrchová doprava) a pro snížení hmotnosti rotujících součástí strojů.

b) Elastické moduly intermetalik jsou samy o sobě vysoké a stejně jako u pevnosti dochází k pomalejšímu poklesu jejich hodnot s teplotou než u neuspořádaných slitin.

c) Intermetalické fáze s vysokým obsahem hliníku mají dobrou odolnost proti oxidaci za vysokých teplot.

d) Díky uspořádané struktuře vykazují intermetalika výrazně nižší koeficienty difuze, což se projevuje v nižší rychlosti tečení, velmi obtížně rekrytalizaci i ve zvýšené odolnosti proti korozi. V tabulce I. jsou uvedeny i některé další základní vlastnosti intermetalik.

Slitina	Krystalová struktura	T_c [°C]	T_m [°C]	ρ [g*mm ⁻³]	E [GPa]
Ni ₃ Al	$L1_2$	1390	1390	7,5	179
NiAl	B2	1640	1640	5,86	294
Fe ₃ Al	$D0_3$	540	1540	6,72	141
	B2	760	1540		
FeAl	B2	1250	1250	5,56	261
Ti ₃ Al	$D0_{19}$	1100	1600	4,2	145
TiAl	$L1_0$	1460	1460	3,91	176
TiAl ₃	$D0_{22}$	1350	1350	3,4	

Tab.I Základní vlastnosti aluminidů niklu, železa a titanu. [3]

2.2 Slitiny na bázi aluminidu železa Fe_3Al

Mezi skupinu materiálů nazývajících se intermetalické sloučeniny patří i tzv. aluminidy železa.

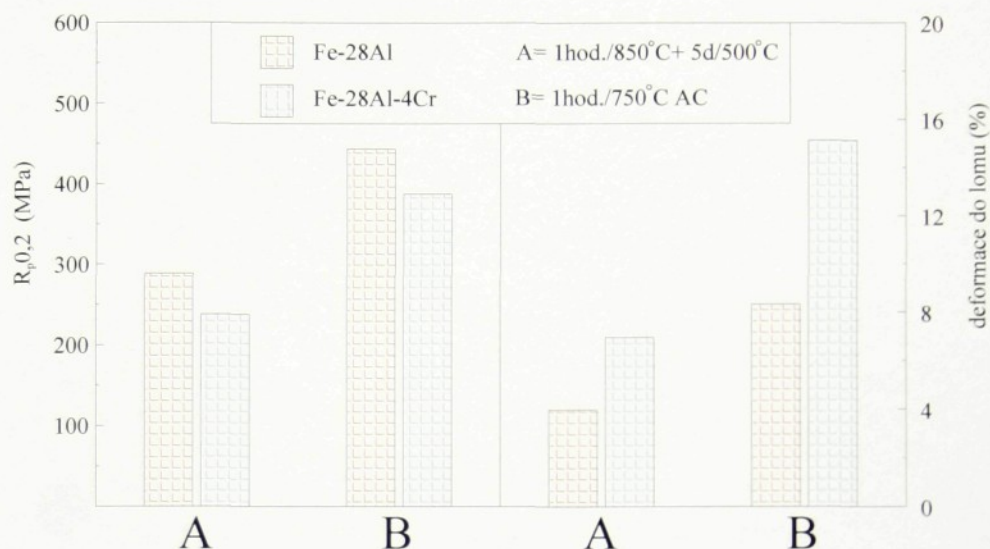
2.2.1 Fyzikálně metalurgické poznatky o aluminidu železa Fe_3Al

Fázový diagram Fe-Al na obr.5. dokládá závislost kritické teploty transformace $\text{D0}_3 \leftrightarrow \text{B2}$ na obsahu hliníku. Dále je patrné, že právě při stechiometrickém složení Fe_3Al prochází materiál při ohřevu a při ochlazování řadou fázových rozhraní (od nízkých teplot): $\text{D0}_3 \leftrightarrow \text{D0}_3 + \alpha \leftrightarrow \text{B2} + \alpha \leftrightarrow \text{B2} \leftrightarrow \alpha$. Proto se složení slitiny upravuje do nestechiometrického složení Fe-28 at.% Al. To zajišťuje jednoduchou situaci s jediným rozhodujícím fázovým přechodem v pevném stavu $\text{D0}_3 \leftrightarrow \text{B2}$. Jiné základní složení se již nepoužívá a slitina se modifikuje dále jen dalšími aditiva.

Za nejvhodnější legury se považují chrom a dále pak molybden, zirkon, vanad, niob. Vliv legování těmito prvky je shrnut v Tab.II.

Prvek	Max. množství (at. %)	Mikrostruktura	Užitečný vliv
Cr	6	tuhý roztok	plasticita při pokojové teplotě
Nb	2	precipitát	vysokoteplotní pevnost
Mo	2	tuhý roztok	vysokoteplotní pevnost
Zr	0.2	precipitát	vysokoteplotní pevnost
V	2	tuhý roztok	vysokoteplotní creepová odolnost

Tab.II. Vliv legování různými prvky na vlastnosti aluminidů. [3]



Obr.6. Vliv přídavku chromu na mechanické vlastnosti Fe-28 at.% Al při pokojové teplotě. Žihání označené A vede k uspořádání DO_3 , zatímco při žihání B vzniká částečně uspořádání B2. [8]

Jako speciální aditiva zjemňující zrna a mající tedy za následek lepší tvárnost (při všech teplotách přicházejících v praxi v úvahu) se používají zejména TiB_2 a v poslední době též Ce.

Zlepšení tvárnosti aluminidů na bázi Fe_3Al bylo dosaženo také vysokým stupněm deformace při teplotách 900 až 1000 °C, např. při válcování, po němž následuje nízkoteplotní tepelně mechanické zpracování (válcování a žihání) v oblasti teplot 650 až 850 °C. V těchto případech je tvárnost podstatně větší než bezprostředně po tváření. Pevnost a mez kluzu po takovém zpracování příliš neklesají a konečným výsledkem je velmi pevný materiál s podstatně zlepšenou tvárností.

Vliv obsahu chromu je patrný na obr.6. Vliv nízkoteplotního (500°C) a vysokoteplotního (750°C) žihání na tvárnost, mez kluzu 0,2 a pevnost různých modifikovaných slitin je patrný z tabulky III.

K nedostatečné plasticitě aluminidů železa přispívá křehnutí v různých prostředích. Tvárnost v suchém prostředí, jako je vakuum a suchý kyslík, je podstatně větší než na vzduchu. Již dříve bylo upozorněno, že vlhkost ve vzduchu je zdrojem křehnutí, jehož příčinou je vodík. To se podařilo překonat přídavky chromu. Typickou představu o vlivu chromu dává tabulka III.

Žihání na vzduchu a kalení do oleje	850°C/1h+500°C/150h			750 °C/1h		
Složení slitiny	R _{p0,2} (MPa)	R _m (MPa)	A ₅ (%)	R _{p0,2} (MPa)	R _m (MPa)	A ₅ (%)
Fe-28Al	279	514	3,7	434	716	8,0
Fe-28Al-4Cr	228	554	8,2	382	752	14,6
Fe-28Al-5Cr-0,1Zr-0,05B	312	546	7,2	480	973	16,4
Fe-28Al-5Cr-0,5Nb-0,2C	320	679	7,8	384	930	16,9
Fe-28Al-5Cr-0,5Nb-0,5Mo-0,1Zr-,2B	379	630	5,0	589	965	10,2

Tab.III. Vliv žihání a složení na vlastnosti slitin typu Fe₃Al při pokojové teplotě.[8]

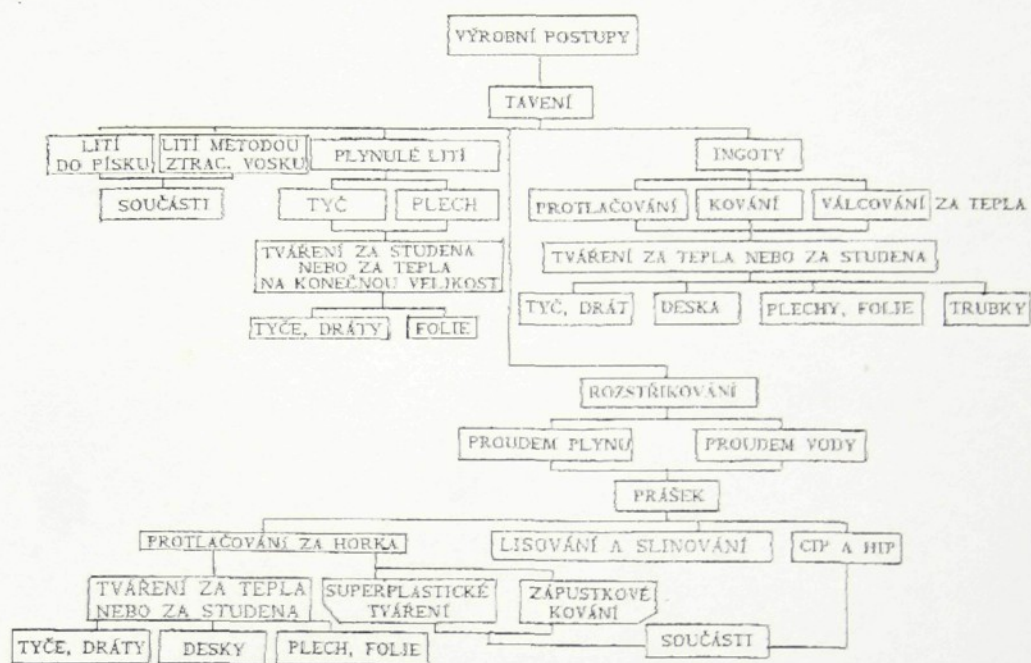
Deformační prostředí	Deformace do lomu (%)	R _m (MPa)	R _{p0,2} (MPa)
	při pokojové teplotě		
na vzduchu	4,1	387	559
ve vakuu 10 ⁻⁴ Pa	12,8	387	851
v kyslíku 6,7*10 ⁻⁴ Pa	12,0	392	867
vodní pára	2,1	387	475

Tab.IV. Vliv prostředí na plasticitu aluminidů železa. [3]

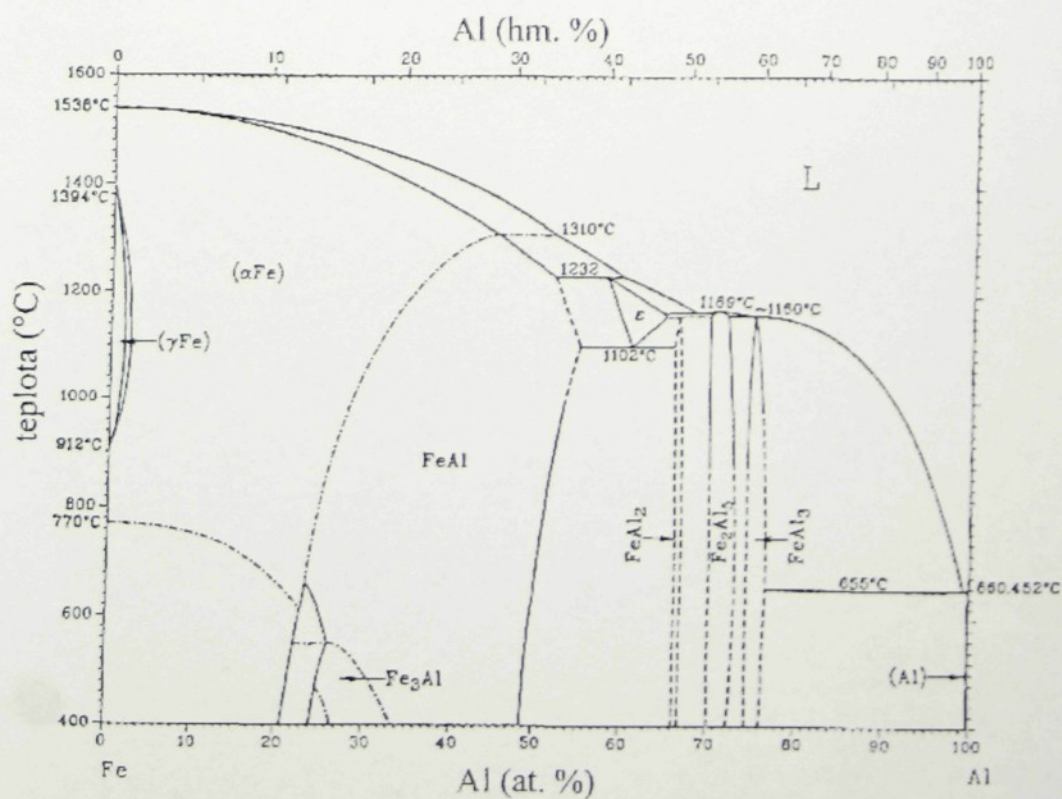
2.2.2. Vlastnosti a technologie zpracování

Aluminidy železa jsou dobře známy pro jejich vynikající odolnost vůči vysokoteplotním sulfidačním a oxidačním prostředím. Hlavním problémem aplikací byla jejich špatná tvářitelnost při pokojové teplotě a nízká vysokoteplotní pevnost. Vliv prostředí byl také identifikován jako hlavní příčina malé plasticity aluminidů při pokojové teplotě. Bylo navrženo několik postupů, jak tomu zamezit nebo potlačit tyto efekty. Jako nejúčinnější se prokázalo legování chromem.

Možné způsoby zpracování aluminidů železa a výrobků z nich, jsou shrnuty ve schématu na obr.4



Obr.4. Schéma možných postupů výroby aluminidů železa a výrobků z nich. [3]



Obr.5 Stavový diagram Fe-Al. [10]

Ze všech možných způsobů zpracování aluminidů jsou nejúspornější ty, které využívají jako výchozí operaci tavbu. Výběr postupu tavby pro aluminidy železa je spojen s řadou problémů:

a) Použití vlhké navážky nebo vlhkost v blízkosti tavicího kelímku může mít za následek vznik velkého množství vodíku, který nemůže během tuhnutí uniknout a vznikají velké dutiny. Při tavení na vzduchu se dá vodíková pórovitost odstranit použitím suchých vsázek nebo probubláváním taveniny argonem. Často se proto používá tavenina ve vakuu nebo přetavování ve vakuové obloukové peci. To však zvyšuje cenu slitiny.

b) Vznik Fe_3Al ze základních prvků železa a hliníku je exotermická reakce. Konvenční způsob roztavení železa a přidání hliníku způsobuje vzrůst teploty taveniny o několik stovek stupňů. To způsobí oxidaci taveniny, prodloužení doby před litím a obtížné nastavení požadovaného složení z důvodů oxidace prvku. Úprava geometrie vsázky, známa nyní pod obchodní registrační značkou Exomeh využívá tepla tvořícího se při vzniku Fe_3Al a umožňuje dosáhnout lící teploty s minimální oxidací. Navíc se používá při tavení na vzduchu ochranná vrstva argonu. Doporučuje se také použít liti čistého kovu pod struskou (tzv. „tea kettle“)

c) Existují také další jevy spojené se zpracováním a použitím odlitků aluminidu železa. Základní složení slitin typu aluminidu železa Fe_3Al tíhnou k tvorbě velkých zrn při liti ingotů a liti do písku. Veliká zrna mají dramatický účinek na tváritelnost slitin typu Fe_3Al a znemožňují zpracování odlitků za studena. Proto je nezbytné snižovat velikost zrna pomocí očkovacích aditiva.

2.2.3. Použití aluminidu železa

Aluminidy železa soutěží s nerezavějícími ocelmi tříd 300 a 400 a některými niklovými slitinami. Specifické výhody slitin typu Fe_3Al jsou:

- vynikající odolnost vůči síře
- oxidační odolnost
- nízká měrná hmotnost
- dobrá otěruvzdornost
- odolnost vůči kavitaci při erozi
- nízká cena materiálu

Na těchto výhodách jsou založeny některé aplikace, které se pro slitiny typu Fe_3Al očekávají:

1) **Slitinové pórovité (plyno-kovové) filtry v zařízení pro zplyňování uhlí:** V této aplikaci jsou filtry používány k odstranění určité látky z plynu vznikajícího při zplyňování uhlí a při dalších procesech, kde plyn obsahuje vysoké procento síry. Využívá se výhody sulfidační odolnosti aluminidu železa ve srovnání s jakýmkoliv jiným běžně dostupným materiálem. Filtry se připravují slinováním prášku na zvolenou hodnotu pórovitosti.

2) **Topné elementy, ponorné vařiče:** Při této aplikaci se využívají dráty pro topná tělesa v topinkovačích, pecích a sušičkách. Využívá se vysoké resistivity, která je konstantní do 1000°C a vynikající oxidační odolnost. Výroba drátů je komplikovaná omezenou svařitelností při pokojové teplotě. Tyče válcované za tepla lze použít jako topná tělesa v pecích.

3) **Součásti pecí:** Využívá se oxidační odolnosti pro takové komponenty jako retorty, válečky, tyče apod. Předpokládá se výroba různými způsoby odlévání.

4) **Katalytické vrstvy konvertorů:** Využívá se oxidační odolnost. Folie pro tyto aplikace se vyrábějí především válcováním za tepla s následným válcováním za studena.

5) **Regenerátorové desky:** Slitina se používá jako výměník tepla v plynové turbíně pro vynikající oxidační sulfidační odolnost. Podmínky při výrobě jsou stejné jako v předešlém případě.

6) **Součásti pro aplikace v roztavených solích a nádoby pro chemickou výrobu:** Aluminidy železa se dobře snášejí s okysličujícími a uhlíkatými solemi. Možnosti využití se očekávají pro výrobu nádob, transportních a rotujících součástí. Výroba zahrnuje kombinaci lití, zpracování ingotů za tepla a svařování.

7) **Stínění:** Zejména se předpokládá stínění trubek proti oxidaci v elektrárnách. Typicky se jedná o výstelky trubek tloušťky 3 až 4 mm. Měly by se vyrábět ohýbáním za tepla válcovaných plechů požadované tloušťky.

8) **Výfukové systémy a jiné součásti benzinových a naftových motorů:** Využívá se jednak odolnosti proti korozi jako v bodech 2, 5 a 6, navíc je možno využít vzniku dobře difúzní vrstvy mezi aluminidem a součástmi motoru z hliníkových slitin.

3. Defektoskopie

3.1 Vady materiálu

Vadou výrobku se rozumí každá odchylka rozměrů, váhy, vzhledu, struktury nebo jiných vlastností od příslušných norem nebo sjednaných technických podmínek.

Vady se rozdělují na a) zjevné

b) skryté

ad a) Zjevná vada výrobku je vada, kterou je možno zjistit při vizuální prohlídce nebo jednoduchými pomocnými měřidly.

ad b) Skrytá vada výrobku je vada, kterou je možno zjistit buď rozřezáním výrobku nebo speciálními přístroji.

Z defektoskopického hlediska by bylo možno dělit vady podle jejich uložení takto:

a) povrchové vady

b) vady těsně pod povrchem

c) vnitřní vady

Dalším hlediskem by mohly být vlastnosti materiálu zkoušeného předmětu, např.: měrná hmotnost, krystalická stavba, stav povrchu (hrubost, členitost), magnetické a elektrické vlastnosti.

Konečně třetím hlediskem je tvar a velikost vady. Vady které se zjišťují nedestruktivními zkouškami, lze rozdělit podle technologických hledisek.

1) přerušení souvislosti : trhliny

praskliny

zdvojeniny plechu

2) dutiny: bubliny, póry

mikrostaženiny

bodliny

mikrobubliny

staženiny

řediny

3) vměstky : broky

kovové vměstky

4) vady struktury: strukturální vruby

odmíšeniny

5) nesprávné fyzikální nebo mechanické vlastnosti

Zjišťování vad defektoskopickými zkouškami je většinou nepřímé. Prostředníkem je fyzikální veličina, která v interakci s prostředím mění své parametry.

3.2. Přehled defektoskopických metod

V celkovém souboru materiálových zkoušek zaujímají defektoskopické zkoušky význačné místo zejména ve výrobě. Zkoušený vyhovující výrobek je možno dále použít, což má velký ekonomický význam.

Další význam nedestruktivního zkoušení materiálu je v jeho působení na technologii výroby. Příčiny vzniku vad, které se u výrobku systematicky vyskytují, jsou v technologických závadách. Většinou při důkladné kontrole a správném rozboru vadnosti výrobku lze již v ověřovacích sériích zjistit technologickou nezávadnost.

Důležitým prvkem v nedestruktivní kontrole výrobku je správné použití metody. Některé typy vad nelze určit prozářením, jiné se nedají zjistit ultrazvukem. Pro správnou kontrolu daného výrobku je třeba uvažovat technologicky možný charakter vad a místo jejich výskytu spolu s možnostmi zvolené defektoskopické metody. Použitelnost jednotlivých defektoskopických metod pro vady vyskytující se obecně ve všech výrobcích strojírenské technologie je uvedena v Tab.V.

Veličina použitá ke zkoušení				Přerušení souvislosti					Dutiny					Vměstky			Vady struktury						
				Povrchové trhliny	Vnitřní trhliny	Povrchové praskliny	Vnitřní praskliny	Závojeniny	Studny spoj	Bubliny, póry	Bodliny	Sraženniny	Řediny	Mikrosraženniny	Mikrobubliny	Strukturní vlnitost	Nekovové vměstky	Broky	Kovové vměstky	Strukturální vruby	Odměšenniny	Nesprávné fyz. vlast.	
Energie	Elektrická energie	Elektromagnetické záření	Rentgenové záření																				
			Záření gama																				
		Elektromagnetické pole	Magnetický tok																				
			Magnetická síla																				
			Vířivé proudy																				
Elektrický proud	Elektrický proud	Střídavý proud																					
		Stejněsměrný proud																					
Mechanická energie	Elastické vlny	Slyšitelný zvuk																					
		Ultrazvuk																					
Hmoty	Kapalina	Pasivní	Barevná kapalina																				
			Fluorescenční kapalina																				
		Aktivní	Kyselina																				
Spolehlivá indikace				Meně spolehlivá indikace a nespolehlivá indikace omezený rozsah použití																Nemožná indikace			

● Spolehlivá indikace

○ Meně spolehlivá indikace a nespolehlivá indikace omezený rozsah použití

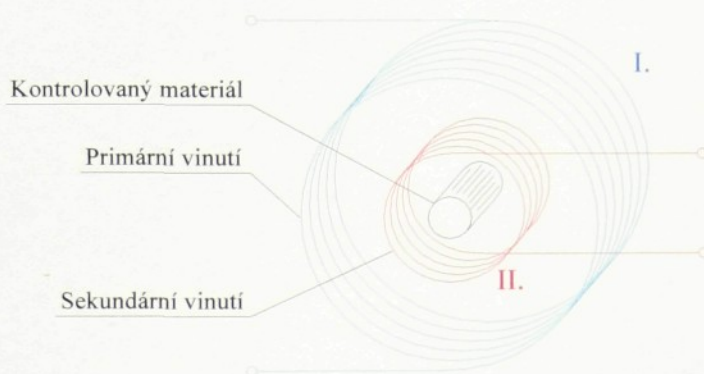
○ Nemožná indikace

Tab. V. Použitelnost jednotlivých defektoskopických metod. [1]

3.3 Metoda vířivých proudů

Metoda vířivých proudů je založena na zjišťování změn fyzikálních vlastností vzorku pomocí magnetického střídavého pole. Prakticky to znamená, že vzorek, který má určitou elektrickou vodivost, permeabilitu a určité rozměry, se vloží do magnetického střídavého pole vytvořeného cívkou, protékanou střídavým proudem. Toto střídavé magnetické pole indukuje ve vzorku vířivé proudy, které svými magnetickými účinky působí zpětně na pole původní – budící

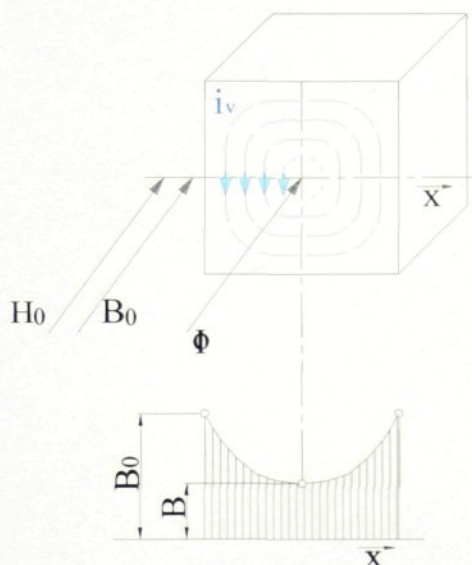
Při metodě vířivých proudů vznikají tedy dvě magnetická pole: jedno od magnetizační cívky, druhé od vířivých proudů, indukovaných ve vzorku. Tato dvě magnetická pole se vektorově skládají a výsledné pole závisí kromě frekvence magnetizačního proudu též na elektrických a magnetických vlastnostech vzorku a jeho rozměrech. Jeden z možných způsobů uspořádání měření je na obr.7.



Obr.7. Možný způsob uspořádání měření. Kontrolovaný materiál prochází měřicí cívkou s dvojitým vinutím- magnetizačním (primární) a snímacím (sekundární).[2]

3.3.1. Povrchový jev

Vznik a účinek vířivých proudů ve vodivém feromagnetickém materiálu znázorňuje obr.8. Střídavý magnetický tok Φ indukuje elektrické pole, jehož silové čáry jsou uzavřené křivky, obepínající tok Φ nebo jeho část ležící v rovinách kolmých ke směru magnetické indukce. Podle Lenzova zákona působí indukované proudy proti příčině svého vzniku, tj. potlačují střídavý magnetický tok. Největší zeslabení toku nastane ve střední části průřezu, která je obepínána všemi vlákny indukovaných vířivých proudů i_v . Zde je hustota, tj. magnetické indukce B , nejmenší. Místa ležící blíže k povrchu jsou obepínána menším proudem, zeslabení toku je zde menší a indukce větší. Povrchová vrstva není obepínána žádným proudem a je zde největší indukce B , která odpovídá intenzitě magnetického pole H_0 na povrchu vzorku. To znamená, že hustota magnetické indukce od povrchu vzorku k jeho středu klesá. Tyto děje jsou ve skutečnosti složitější, než naznačuje uvedený výklad. Indukce v jednotlivých místech průřezu se liší nejen co do velikosti, ale i co do časového průběhu. Vířivé proudy způsobí nejen zmenšení střídavé indukce ve středové části celého průřezu. Vlivem nelineárnosti charakteristiky feromagnetických materiálů liší se průběhy indukce v různých místech průřezu i tvarem křivky. Ve střídavě magnetovaných obvodech zmenšují tedy vířivé proudy celkový tok tím, že zmenšují indukci ve střední části průřezu.



Obr.8. Vznik a účinek vířivých proudů ve feromagnetickém tělese. [1]

K vyjádření povrchového jevu se udává tzv. hloubka vniku. Je to vzdálenost pod povrchem, kde indukce je e -krát menší než na povrchu vzorku ($e = 2,718$). [1]

Pro případ materiálu rovinného povrchu s velkou tloušťkou při sinusovém průběhu magnetické indukce a uvažujeme –li konstantní permeabilitu zkoušeného materiálu, je hloubka vniku:

$$s = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \mu_r \sigma}} \quad (\text{Vzorec č.1}) [1]$$

Kde $\omega = 2\pi f$ je kruhová frekvence střídavého magnetického pole [s^{-1}]

μ_r relativní permeabilita

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – permeabilita vakua [Hm^{-1}]

σ - měrná vodivost [Sm^{-1}]

Ze vztahu je patrné, že v tomto případě hloubka vniku závisí na permeabilitě, elektrické vodivosti a na frekvenci střídavého proudu. Volbou frekvence tedy dosáhneme určitého požadovaného rozložení magnetického pole v průřezu vzorku.

Podle uspořádání snímacích cívek vzhledem ke vzorku rozeznáváme:

metodu s průchozí cívkou

metodu s příložnou cívkou

3.3.2. Metoda s průchozí cívkou

Kontrolovaný materiál prochází měřicí cívkou s dvojím vinutím: magnetizačním a snímacím, tak jak již bylo naznačeno na obr.7. Primární magnetizační vinutí je napájeno střídavým proudem, vytvářejícím střídavé magnetické pole. Zpětným působením tohoto magnetického pole vířivých proudů na pole původní vzniká magnetické pole výsledné, které indukuje ve snímací cívkce napětí, jehož velikost je dána fyzikálními vlastnostmi materiálu, geometrickým tvarem cívek a budicí frekvencí. Matematický výpočet indukovaného napětí vychází z teorie vířivých proudů a je odvozen za určitých zjednodušujících předpokladů.

- Vodivost σ a relativní permeabilita μ_r jsou fyzikálními konstantami materiálu, určujícími jeho magnetické a elektrické vlastnosti.
- Délka cívky i délka kontrolovaného materiálu je uvažovaná jako neomezeně velká.
- Budicí proud má sinusový průběh o kruhové frekvenci ω

Nerovnoměrné rozložení intenzity magnetického pole ve válcovém tělese vlivem vířivých proudů lze vyjádřit Besselovými funkcemi.

$$H(r) = H_0 \frac{J_0(kr)}{J_0(kr_0)} \quad (\text{Vzorec č.2}) [1]$$

kde $H(r)$ je intenzita magnetického pole ve vzdálenosti r od středu,

H_0 - intenzita magnetického pole na povrchu válcového vzorku,

$J_0(kr)$, $J_0(kr_0)$ – Besselova funkce nultého řádu argumentu kr a kr_0 .

$$k = \sqrt{\omega \mu_0 \mu_r \sigma} \quad (\text{Vzorec č.3}) [1]$$

kde r_0 je poloměr válcového vzorku.

Souhlasně s intenzitou magnetického pole se mění též magnetická indukce uvnitř vzorku v závislosti na poloměru r podle vztahu

$$B(r) = \mu_0 \mu_r H(r) \quad (\text{Vzorec č.4}) [1]$$

Podle Förstra [4] můžeme při výpočtu indukce B postupovat formálně také tak, že necháme v celém průřezu vzorku působit povrchovou intenzitu magnetického pole H_0 , přičemž ale přisoudíme celému vnitřnímu průřezu vzorku konstantní efektivní

permeabilitu μ_{ef} , které odpovídá hypotetické magnetické pole o konstantní hodnotě v celém průřezu vzorku a které má stejné účinky na snímací cívku, jako má ve skutečnosti radiálně rozložené magnetické pole. Efektivní permeabilita je komplexní veličina s modulem $|\mu_{ef}| < 1$. Závisí na elektrických a magnetických vlastnostech vzorku a na zkušební frekvenci.

Položíme li ve vztahu 5 argument Besselovy funkce $kr_0 = 1$, dostaneme výraz pro tzv. mezní frekvenci:

$$f_g = \frac{1}{2\pi r_0^2 \mu_0 \mu_r \sigma} \quad (\text{Vzorec č.5}) [1]$$

Když místo r_0 zavedeme průměr vzorku $D_p = 2r_0$ v cm, dosadíme-li do tohoto vzorce elektrickou vodivost σ v $\text{m}\Omega^{-1}\text{mm}^{-2}$ a $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-9} \text{ A cm}^{-1}$, dostaneme často uváděný vztah pro f_g :

$$f_g = \frac{5066}{\sigma \mu_r D_p^2} [\text{Hz}] \quad (\text{Vzorec č.6}) [1]$$

Argument Besselovy funkce kr_0 lze pak též vyjádřit poměrem f/f_g , neboť platí

$$|kr_0|_f = \sqrt{\frac{f}{f_g}} \quad (\text{Vzorec č.7}) [1]$$

Poněvadž se podle vztahu č.6 dá f_g spočítat pro každý válcový vzorek a měřicí frekvence je dána, lze lehce určit poměr f/f_g . Tím je taky dána efektivní permeabilita a rozdělení intenzity pole ve vzorku Obr. 9. Pro indukované napětí ve snímací cívce bez vzorku platí:

$$E_0 = n \frac{d\Phi}{dt} = \frac{1}{2} \pi^2 f n \mu_0 H_0 D_s^2 \quad (\text{Vzorec č.8}) [1]$$

kde n je počet závitů snímací cívky (sekundární)

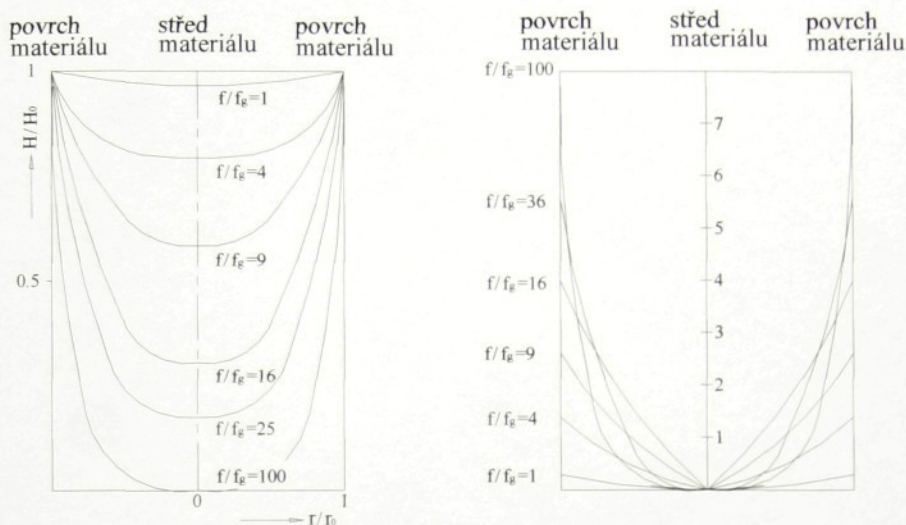
D_s - průměr snímací cívky

Po vložení válcového vzorku se indukuje napětí:

$$E = E_0 (1 - \eta_D - \eta \mu_r \mu_{ef}) \quad (\text{Vzorec č.9}) [1]$$

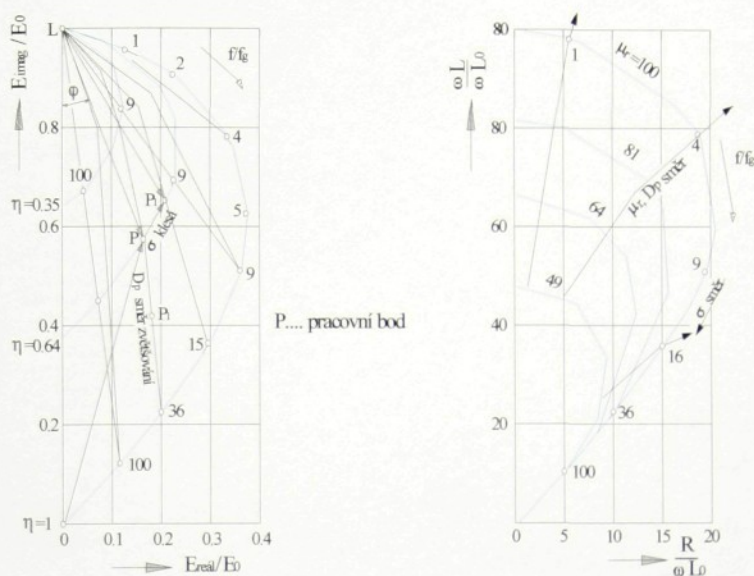
Přičemž $\eta = (D_p/D_s)^2$ je činitel plnění snímací (sekundární) cívky. Ze vztahu č.9 vyplývá, že při vložení vzorku do snímací cívky závisí napětí na permeabilitě a

elektrické vodivosti vzorku (zahrnuto v efektivní permeabilitě), dále na průměru vzorku a na měřicí frekvenci.



Obr.9. Rozložení intenzity magnetického pole H a hustoty vířivých proudů po příčném průřezu válcového tělesa při různých poměrech f/f_g . [2]

Poněvadž v rovnici č.9 vystupuje μ_{ef} , která je komplexní veličinou, má indukované napětí E rovněž komplexní charakter. Jeho průběh, tj. spojnicí koncových bodů vektorů napětí, si můžeme zobrazit v komplexní rovině na obrázku 10. Zde jsou zobrazeny pro neferomagnetické materiály průběhy poměrného napětí v závislosti na poměru f/f_g pro různé činitele plnění $\eta=1$, $\eta=0.64$, $\eta=0.35$. V bodě P jsou pak vyznačeny směry změn napětí při změně vodivosti a při změně průměru vzorku. Vidíme, že při vhodně zvoleném poměru f/f_g působí průměrové a vodivostní změny v komplexní rovině v různých směrech a je tedy možné je od sebe oddělit použitím fázové selekce. Docházíme ke zjištění, že změny průměru a vodivosti u nízkých hodnot f/f_g působí téměř totožně, s přibývajícím poměrem f/f_g se úhel mezi σ a D_p zvětšuje. U feromagnetických látek ($\mu_r \ll 1$) dostaneme v komplexní rovině tvar křivky, odpovídající průběhu na obr.10. Zjistíme, že se průměrový a permeabilitní „směrový efekt“ znázorní v komplexní rovině indukovaného napětí nebo impedance ve stejném směru. Z toho plyne, že se nedá rozlišit změna permeability μ_r od změny průměru válcového materiálu. Naproti tomu vodivostní směr σ , totožný se směrem f/f_g , nespadá do směru μ_r , D_p a dá se tedy změna vodivosti od změn průměru a permeability vzorku dobře oddělit. Totéž platí o trhlkách ve feromagnetickém materiálu, neboť jejich efekt je podobný jako efekt vodivostní.

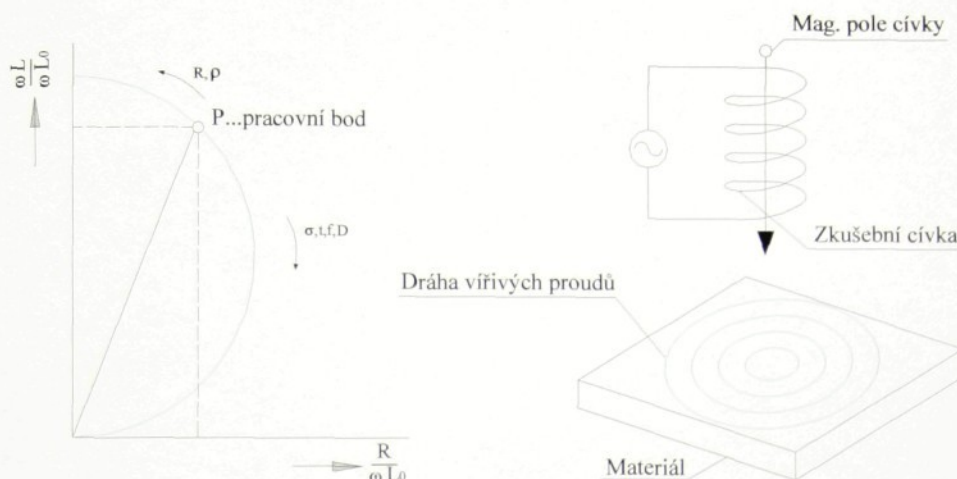


Obr.10. Průběh koncových bodů vektoru poměrného napětí v komplexní rovině pro neferomagnetické (vlevo) a feromagnetické (vpravo) válcové těleso. [1]

3.3.3. Metoda s příložnou cívkou

Dosavadní úvahy platily pro sondu s průchozí cívkou, která zkoušený předmět obklopovala (předmět se nacházel v cívkě). V případě příložné sondy se jedná o jiné geometrické uspořádání vzhledem k povrchu zkoušeného předmětu. Příložná cívka je na testovanou plochu přiložena, to znamená, že cívka zkoušený předmět „nevyplňuje“ polem úplně, ale její pole, pronikající povrchovou plochou kolmo do testovaného předmětu, slábne s přibývajícím vzdáleností od okraje cívky. Vířivé proudy pak protékají přibližně jako zrcadlový obraz cívky směrem dovnitř testovaného předmětu a zdánlivě z něho „vykrajují“ jakési redukované těleso kuželovitého tvaru. Největší hustotu dosahují vířivé proudy bezprostředně pod vinutím cívky a až k nule klesají pod jejím středem. Samozřejmě se vířivé proudy rozšiřují i do prostoru mimo zrcadlový obraz cívky (obrázek 10).

Výpočty funkčních průběhu analogické těm, které byly provedeny pro „obklopující“ cívku, vedou k impedančnímu diagramu znázorněnému na obr.10.



Obr.11 Impedanční rovina pro příložnou cívku.[2]

Impedanční rovina poskytuje tedy pro příložnou cívku relativně málo možností pro optimalizaci proměnných. Většinou si zde musíme vypomáhat hodnotami „ze zkušeností“ nebo experimentálně získanými diagramy. Podle Deedse a Dodda můžeme všechny významné veličiny zahrnout do jediného parametru, který pak označujeme jako „charakteristický parametr“ P_C .

$$P_C = \frac{D^2 f \sigma}{500} \quad (\text{Vzorec č.10}) [2]$$

kde D [mm] je střední průměr cívky

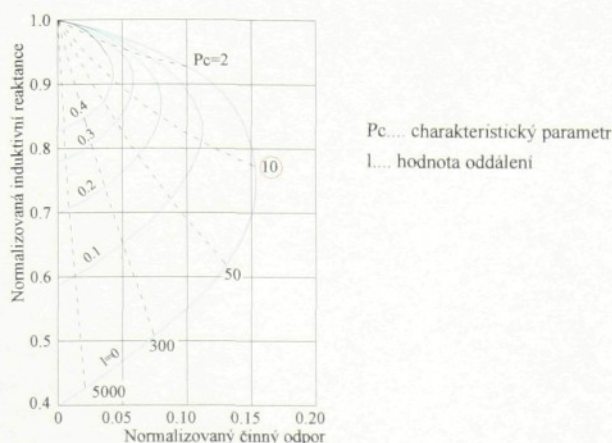
f [kHz] je frekvence

σ [m/Ωmm²] je vodivost

Když vyneseme charakteristický parametr do impedanční roviny, dostaneme obrázek 12. Z něho plyne:

- optimální citlivost je při $P_C=10$
- optimální nastavení pro odlišení signálů je při $P_C= 50$

To jsou důležité orientační body, když testujeme příložnou sondou různé materiály. Podle principu podobnosti nabízí charakteristický parametr také možnost přenášet závěry učiněné za určitých testovacích podmínek na podmínky jiné. Tak je například možné nízkou frekvenci vyrovnat větším průměrem cívky, čímž se P_C nemění a zkušební podmínky zůstávají stejné.



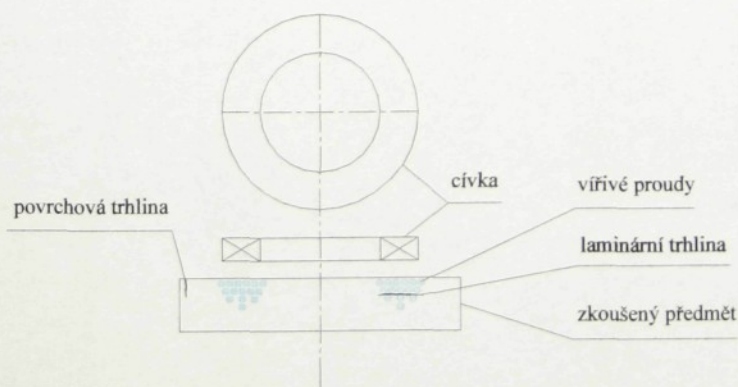
Obr.12. Charakteristický parametr v impedanční rovině. [2]

3.3.3.1. Rozložení vířivých proudů pod příložným snímačem:

Příložný snímač plní dva důležité úkoly:

- indukuje vířivé proudy ve zkušebním vzorku
- registruje poruchy toku vířivých proudů, například vlivem vady materiálu.

Citlivost sondy na vady v materiálu může záviset na rozměrech a konstrukci cívky. Jednoduchý příložný snímač se skládá z budící a měřicí cívky, které se umísťují co nejbližše povrchu zkoušeného tělesa. Vířivé proudy, které jsou pak indukovány v testovaném dílu představují - hrubě řečeno - již zmíněný zrcadlový obraz proudů, které protékají vinutím budící cívky (obr.13). Vířivé proudy vytvářejí koncentrické uzavřené smyčky, které leží v různých rovinách směrem do „hloubky“ předmětu.



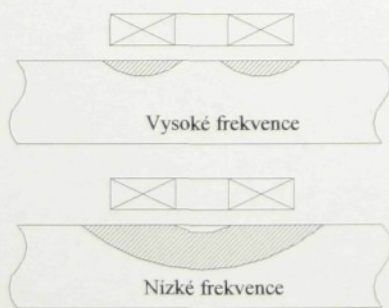
Obr.13. Průběh vířivých proudů v testovaném předmětu pod dotykovou sondou. [2]

Lze vymezit tři oblasti šíření vířivých proudů:

- pod vnitřkem (středem) cívky
- za okrajem cívky
- ve směru do hloubky testovaného tělesa

Hranice šíření vířivých proudů závisejí především na rozložení magnetického toku, který budící cívka v testovaném předmětu vytváří. Při velmi vysokých frekvencích se koncentruje tento magnetický tok v podstatě pod cívkou a vířivé proudy jsou kopií proudů v cívce. Při nízkých frekvencích proniká magnetický tok do většího objemu – do šířky i do hloubky. „Stranový“ průměr oblasti která ještě přispívá k signálu se označuje D_{eff} . Tento efektivní průměr cívky je měřítkem, jak dlouhé (velké) materiálové vady je právě možné prokázat (prokazovací citlivost, citlivost) a jaká je nejmenší vzdálenost sousedních defektu, aby byly ještě vzájemně rozlišitelné (rozlišovací schopnost). Pro malá D_{eff} je citlivost i rozlišovací schopnost velká. To znamená, že vysoká frekvence a malý průměr cívky zvyšují citlivost a rozlišovací schopnost pro povrchové vady.

Větší průměr cívky a nízké frekvence zvětšuje oblast ve zkoušeném předmětu, ve kterém jsou vířivé proudy vybuzené (obr.14). Citlivost a rozlišovací schopnost však klesají. Protože se však zároveň zvětšuje hloubka, do níž vířivé proudy pronikají zvětšuje se prokazovací schopnost do hloubky s klesající frekvencí tak dlouho, dokud hustota vířivých proudů vlivem slabšího buzení nepoklesne příliš.



Obr.14. Objem vybuzený vířivými proudy (vliv frekvence) [2]



Obr.15. Možné polohy trhliny v záběru příložného snímače [2]

3.3.3.2 Hranice účinnosti příložené sondy

Průměr cívky

Čím menší je průměr měřicí cívky, tím vyšší je její citlivost na malé vady. Proč hraje průměr měřicí cívky roli, je možné odvodit z obrázku 15. Signál od vady vznikne, když tok vířivých proudů je rušen vadou materiálu. To znamená v případě, že proudová vlákna „naráží“ pod určitým úhlem na defekt.

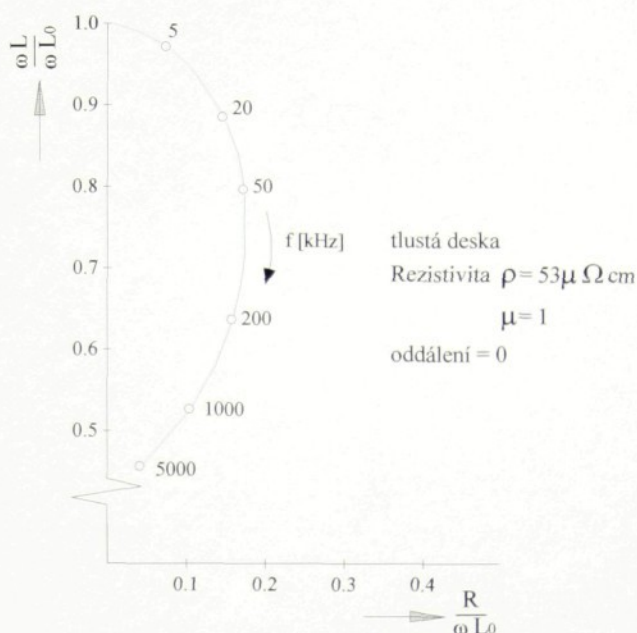
Na obrázku 15A je ukázán mezní případ: Cívka je vedena přes malou materiálovou vadu (trhlinu), která je dlouhá, jako polovina průměru cívky. pohyb cívky probíhá ve směru kolmém k trhlině (její délce), takže proudová vlákna pod okrajem cívky leží rovnoběžně s orientací trhliny, která se při dalším pohybu cívky ocitne pod jejím středem. Má-li trhлина pouze nepatrnou šířku, nevyvolá tedy žádnou odezvu (signál). Je-li vada větší, než je průměr cívky, pak je i při tomto uspořádání bezpečně prokazatelná.

Hloubka citlivosti

K obzvláště drastickému poklesu hustoty vířivých proudů ve zkoušeném tělese dochází, když je cívka od povrchu tělesa oddálena, nadzvednuta (tzv. efekt oddálení). Tento efekt je tím výraznější, čím menší je průměr cívky. Vzhledem k tomu, že citlivost prokazování povrchových vad klesá se snižováním frekvence, je také automaticky omezena detekce hloubkových vad. V praxi je hranice použitelnosti příložené sondy pro objemové zkoušení omezena na tloušťku stěny 5 mm.

Volba frekvence

Kromě průměru cívky je pracovní frekvence důležitým parametrem, který uživatel může ovlivňovat. Zobrazení vlivu frekvence v impedanční rovině při použití příloženého snímače je na obrázku 15. Tento impedanční diagram platí pro tlustý plech z nemagnetického materiálu s definovanou vodivostí. Z diagramu je zřejmé, že zvyšování frekvence tlačí pracovní bod na křivce v impedanční rovině směrem dolů. Impedanční křivka na obrázku 15. platí vždy pouze pro určitou cívku. Použitím jiné cívky je možné pracovní bod přemístit tak, aby se dosáhlo většího odstupu od veličin ovlivňujících signál.



Obr.16. Impedanční diagram-vliv frekvence u jediného materiálu (tlustá deska). [2]

Krajový efekt

Při testování plochých dílů pomocí příložené sondy vznikají poruchy toku vířivých proudů, když se sonda přiblíží k okraji dílu. Tato geometrická odezva může být lehce zaměněna s odezvou od materiálové vady. Jiné geometrické odezvy mohou být vyvolány také změnami v tloušťce stěny, zakřivením povrchu či zalícovanými vývrty a podobně.

3.3.3.3 Vyhodnocování signálu při zkouškách vířivými proudy

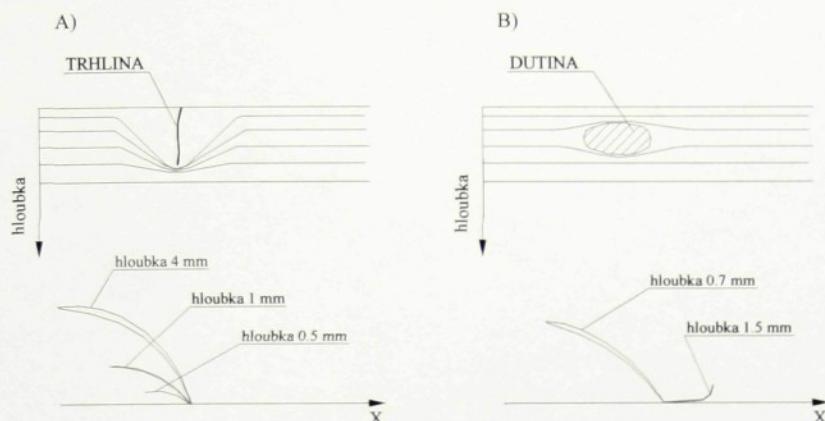
Signály vířivých proudů mohou být vyhodnocovány z hlediska.

- amplitudy
- fáze
- tvaru

Amplituda signálu závisí především na plošném rozměru detekované vady v rovině, ve které vířivé proudy protékají: to je například šířka drážky a délka povrchové trhliny. Amplituda signálu je při nízkých frekvencích ovlivněna také hloubkou, ve které se vada vyskytuje.

Fázový posun proti referenčnímu signálu v podstatě vypovídá o hloubkovém uložení vady. Jeho hodnota kromě toho poskytuje informace o tvaru a permeabilitě. „Směr vyběhnutí“ signálu tak může přispět k rozložení relevantních údajů od nevýznamných při hodnocení kvality výrobku.

Tvar signálu může pomoci určit typ nebo druh vady. Pro tento účel je nutné přesně znát typické odezvy určitých typů vad. Ukázka tvaru signálu takové vady je na obrázku č.17.



Obr.17. Tvary signálu povrchové vady (A) a vnitřní vady (B) při použití absolutní sondy

4. Praktická část.

K ověření funkčnosti metody vířivých proudů na aluminidy železa bylo zapotřebí opatřit homogenní vzorek tohoto materiálu umělými vadami.

4.1. Vzorek a jeho fyzikální vlastnosti

Vzorek k vlastnímu měření byl získán na katedře materiálů. Šlo o válcovaný plech o rozměrech 14*145*450 mm. Zkušební vzorek je na obrázku č.18



Obr.18. Zkušební vzorek aluminidu železa. [autor]

Chemické složení vzorku:

Prvek	Obsah [hmot %]
Al	16,54
Cr	3,51
Ce	0,025
C	0,025
Mn	0,21
Fe	Zbytek

Tab.VI. Chemické složení zkoušeného aluminidu železa.

4.1.1. Permeabilita zkušební vzorku

Zkušební vzorek aluminidu železa Fe_3Al je feromagnetický. To bylo prokázáno jednoduchou zkouškou pomocí magnetu. Dá se tedy předpokládat, že permeabilita vzorku se nebude pohybovat někde kolem hodnoty jedna, jako je tomu u neferomagnetických materiálů, ale bude vysoko nad tuto hodnotu.

4.1.2. Elektrická vodivost aluminidu železa

Jak již bylo řečeno v kapitole 3.3 (Defektoskopie, vířivé proudy) důležitou vlastností materiálu a zároveň parametrem zkoušky je vedle permeability i elektrická vodivost zkoušeného materiálu. Na nevodivé materiály nelze tuto metodu aplikovat. Důvod je zřejmý z předchozích kapitol. Aluminidy jsou známi i svojí špatnou elektrickou vodivostí, proto byla této materiálové konstantě, již před vlastním měřením, věnována zvláštní pozornost.

Neboť intermetalika a tím i aluminidy patří u nás k poměrně ještě ne dobře prozkoumaným materiálům. K první představě sloužila hodnota elektrické vodivosti materiálu ze stejné skupiny intermetalik, ale o jiném chemickém složení.

Chemické složení:

Prvek	Obsah [at.%]
Al	29,94
C	1,22
Si	0,45
Mn	0,19
P	0,34
S	0,033
Fe	Zbytek

Tab. VII. Chemické složení aluminidu železa se známou elektrickou vodivostí. [5]

U této tavby byla zjištěna hodnota měrného elektrického odporu $1,235 \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$

Elektrická vodivost se dá následně zjistit jako převrácená hodnota elektrického odporu.

Vzorec č.11

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (\text{Vzorec č.11}) [13]$$

Pomocí tohoto vzorce se tedy lze dostat k hodnotě elektrické vodivosti tohoto aluminidu $\sigma = 0.81 \text{ S} \cdot \text{m} \cdot \text{mm}^{-2}$. V tabulce VIII. Je pak tato hodnota porovnána s elektrickými vodivostmi několika materiálů.

Materiál	El. vodivost [$S \cdot m \cdot mm^{-2}$]
Aluminid železa	0.81
Ocel	5 až 10
Hliník	37.04
Nikl	14.29
Měď	55.36
Mosaz	12.55
Chromnikl (20%Cr 80% Ni)	0.91

Tab.VIII. *Porovnání elektrické vodivosti aluminidu železa podobné tavby s několika jinými materiály.* [7]

Z porovnání vyplývá, že elektrická vodivost aluminidu železa jiné tavby je až o jeden řád nižší než u oceli a dokonce o dva řády nižší než-li např. u mědi, která je naopak známa jako vynikající vodič. Zajímavé je i porovnání s hliníkem, který je v další části práce použit jako porovnávací měrka při měření náhradních vad.

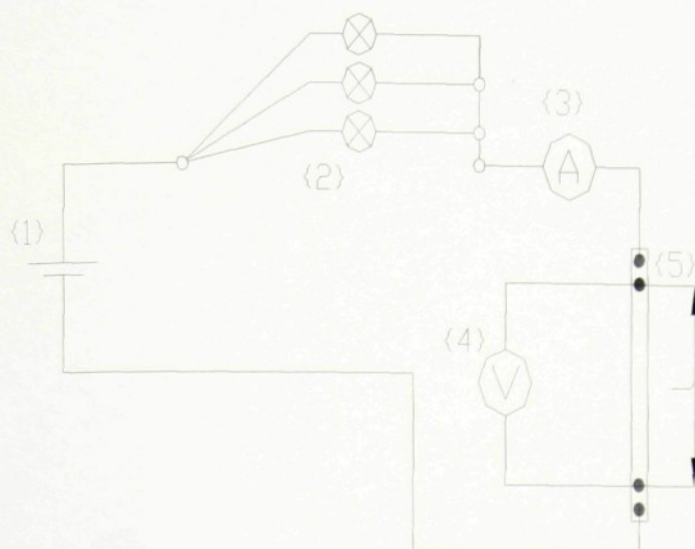
4.1.3. Získání elektrické vodivosti zkušební vzorku

Ikdyž je v tabulce VIII zmiňován materiál ze stejné skupiny intermetalik, jeho chemické složení je přeci jenom odlišné. Proto bylo potřeba elektrickou vodivost zkušební aluminidu železa změřit. Metoda vířivých proudů poskytuje možnost měření elektrické vodivosti, avšak pouze pro neferomagnetické materiály. Dalším, klasičtější způsobem bylo zjistit elektrickou vodivost pomocí ohmova zákona přes elektrický odpor.

4.1.3.1. Měření elektrického odporu, čtyřbodová metoda

Elektrická vodivost lze snadno spočítat pomocí vzorce č.11, známe-li elektrický odpor materiálu. Ten se získat díky tzv. čtyřbodové metodě, jejíž schéma je na obrázku č.19.

Do elektrického obvodu, který je tvořen zdrojem {1}, zátěží {2}, ampérmetrem {3} a voltmetrem {4} se vloží zkušební vzorek materiálu {5} o známém průřezu. Napětí se měří v přesně stanovené délce zkušební vzorku, tak jak je naznačeno na obrázku 19. Ze získaných hodnot elektrického proudu a napětí lze pomocí ohmova zákona (vzorec č.12) získat elektrický odpor daného materiálu.. Ten je však potřeba vztáhnout k délce a průřezu zkušební vzorku, tak aby byl získán tzv. měrný elektrický odpor (vzorec č.13).



Obr.19. Schéma zapojení čtyřbodové metody. [13]

Při realizaci tohoto měření byla jako zdroj {1} využita autobaterie, zátěž {2} byla tvořena třemi paralelně zapojenými žárovkami o celkové spotřebě 200 W. K měření pak byl využit ručičkový ampérmetr {3} s měřicím rozsahem 0 až 15 A a digitální multifunkční voltmetr {4}.

$$R = \frac{U}{I} \quad (\text{Vzorec č.12}) [13]$$

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \Rightarrow \rho = \frac{U}{I} \cdot \frac{S}{l} \quad (\text{Vzorec č.13}) [13]$$

Kde R je elektrický odpor [Ω]

U napětí [V]

I elektrický proud [A]

ρ měrný elektrický odpor [$\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$]

S průřez zkušební vzorku [mm^2]

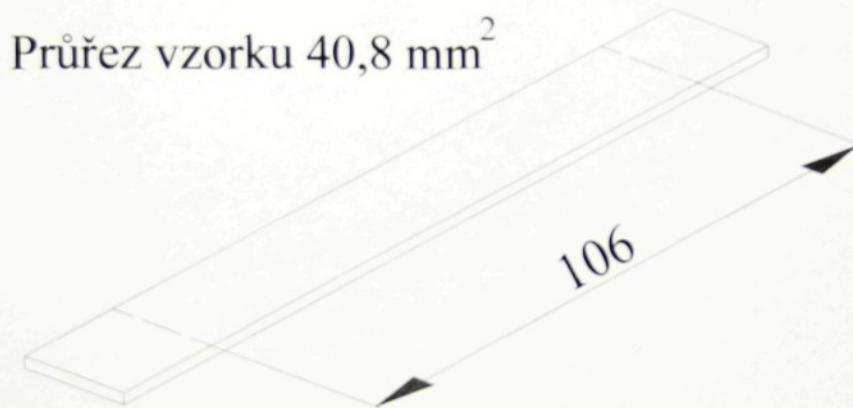
l délka vzorku (měřená)

Užitá čtyřbodová metoda je zajímavá ještě tím, že na jejím principu je založen přístroj zvaný trhlínostest. Tento přístroj je schopen měřit hloubky drážek vodivých materiálů. Zapotřebí jsou k tomu dva vzorky, jeden se zmíněnou drážkou jejíž hloubka

nás zajímá a druhý jež je bez závady. Velice stručně řečeno, z rozdílu potenciálu je pak možno dopočítat hloubku drážky.

4.1.3.2. Vzorky pro měření elektrického odporu

Za účelem měření elektrického odporu zkoušeného aluminidu železa, byly připraveny tři vzorky. Jednalo se o plíšky o rozměrech $3 \times 13,6 \times 140$ mm, které byly odříznuty ze zkoušeného materiálu na obr.18. Na těchto plíškách byly vytvořené dvě rysky, jež od sebe byly vzdáleny 106 mm. Na tyto rysky se pak při měření přikládaly napěťové svorky. Vzorek pro měření elektrického odporu je na obrázku č.20.



Rozměry vzorku: $3 \times 13,6 \times 140$ mm

Obr.20. Zkušební vzorek pro měření elektrického odporu. [autor]

4.1.3.3. Naměřené a spočítané hodnoty

Názorný příklad výpočtu měrného elektrického odporu zkušební vzorku ze získaných hodnot:

$$U = 56,4 \text{ mV}$$

$$I = 12,05 \text{ A}$$

$$S = 13,6 \cdot 3 = 40,8 \text{ mm}^2$$

$$l = 106 \text{ mm}$$

$$\rho = \frac{U}{I} \cdot \frac{S}{l}$$

$$= \frac{0,0564}{12,05} \cdot \frac{40,8}{0,106}$$

$$= 1,80 \text{ } \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

$$\sigma = \frac{1}{1,80}$$

$$\sigma = 0,55 \text{ S} \cdot \text{m} \cdot \text{mm}^{-2}$$

Číslo vzorku	U [mV]	I [A]	R [$\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$]	σ [S.m.mm ⁻²]
1	56,4	12,05	1,80	0,55
2	55,9	12,1	1,77	0,57
3	56,2	12,1	1,78	0,56
Σ				0,57

Tab.IX. Naměřené hodnoty napětí a elektrického proudu a dopočítané hodnoty měrného elektrického odporu a elektrické vodivosti.[autor]

Spočítaná hodnota elektrické vodivosti zkušebního materiálu aluminidu železa je $\sigma = 0,57 \text{ S} \cdot \text{m} \cdot \text{mm}^{-2}$.

Tuto hodnotu však nelze považovat za příliš přesnou. Bylo by možno spočítat chybu měření. Ta by byla ovlivněna nejen chybou měřících přístrojů, ale i všemi veličinami vstupujícími jak do výpočtu tak i do měření. I tak byly však nejslabším místem celého experimentu vzorky. Pro hodnotnější měření by bylo potřeba vzorky mnohem delší a o menším průřezu. Pro účel ke kterému bylo toto měření provedeno, je však získaná hodnota dostačující.

Porovná-li se tedy hodnota elektrické vodivosti zkoušeného aluminidu železa s materiály v tabulce VIII., je možno opět konstatovat, že elektrická vodivost tohoto vzorku je mnohem menší než např. u ocelí, hliníku či mědi. A tyto rozdíly se pohybují dokonce v celých řádech.

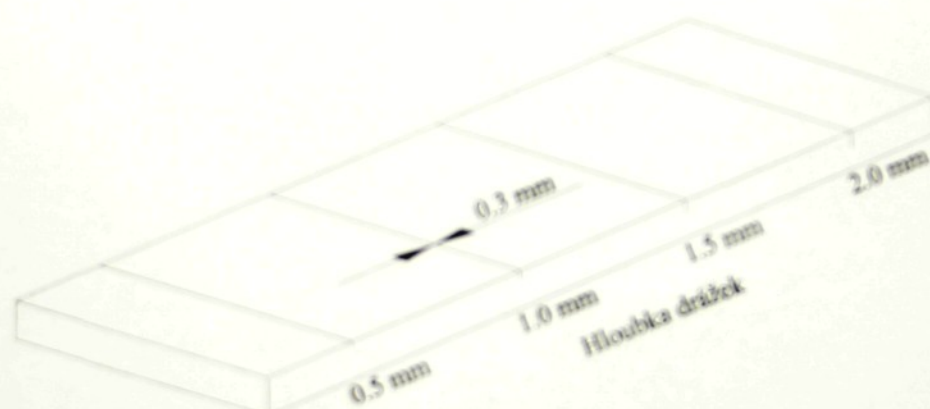
4.2 Náhradní vady na zkušební vzorku

Pro zjištění možnosti detekce vad ve zkoušeném materiálu bylo potřeba vzorek aluminidu železa opatřit náhradními vadami, které by pokud možno co nejvíce simulovali vady skutečné. Jak je patrné z Tab.V metoda vířivých proudů je bezpečně aplikovatelná pouze pro povrchové vady či některé druhy vad struktury. Na základě tohoto jsem se po konzultacích s odborníkem ing. Tichým z firmy ATG s.r.o. rozhodl vytvořit ve vzorku čtyři drážky o rozměrech:

šířka drážek max.0.3 mm

hloubky drážek 0.5 , 1.0 , 1.5 a 2.0 mm

Názorné rozmístění a geometrické tvary drážek jsou zobrazeny na obr.21.



Rozměry vzorku : 14*145*450 mm

Obr.21. Zkušební vzorek aluminidu železa s náhradními vadami.[autor]

Jak je vidno na obrázku č.21 zkušební vzorek obsahoval již na počátku značnou řadu vad. Šlo především o velké povrchové trhliny, které vznikly pravděpodobně již při samotném válcování. Náhradní vady v podobě drážek bylo potřeba umístit tak, aby původní vady v materiálu při měření nijak neovlivňovaly tok vířivých proudů a neznehodnocovaly tak získané výsledky.

4.3. Měřicí aparatura

K měření náhradních vad na zkušebním vzorku aluminidu železa byl firmou ATG s.r.o poskytnut přístroj ZETEC MIZ-21 SR. Firma ZETEC vyrábí kompletní řadu jednofrekvenčních i multifrekvenčních přístrojů pracujících na principu metody vířivých proudů. Tyto přístroje jsou určených k nedestruktivnímu zjišťování necelistvostí v materiálech, měření vodivosti materiálů a tloušťek povlaků, určování tvrdosti atd.

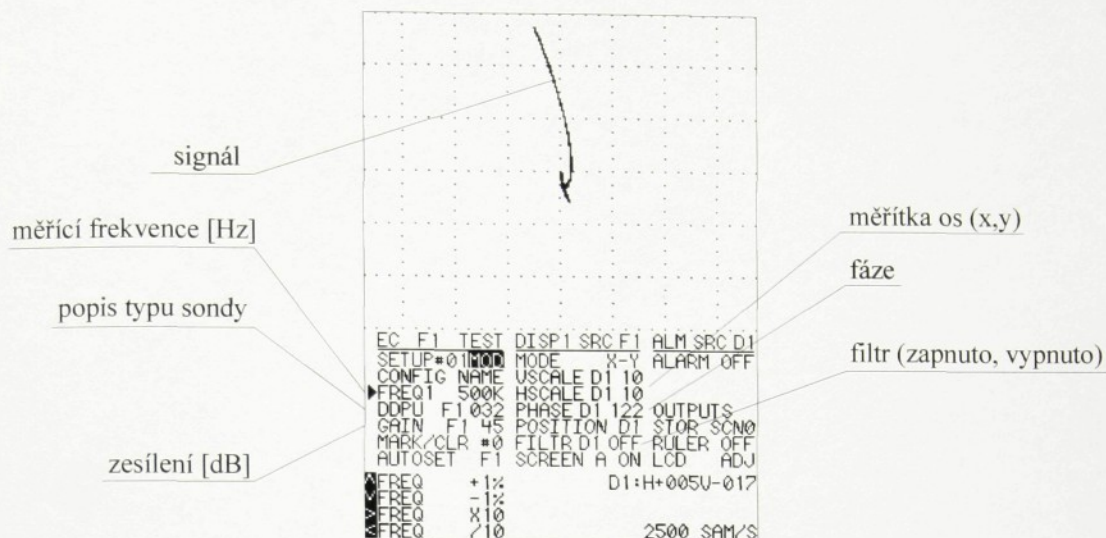
4.3.1. ZETEC MIZ-21 SR



Obr.22. Přístroj ZETEC MIZ-21SR [11]

Přenosný digitální přístroj zejména pro aplikace v leteckém průmyslu, nachází však uplatnění i v jiných průmyslových odvětvích.

- 2 zkušební frekvence s možností mixu
- Digitální měření elektrické vodivosti
- Výstup pro pohon rotačních sond
- 2 moduly zkoušení akustickými metodami
 - Rezonanční metoda
 - Impedanční metoda
- Rozměry 28*13*6 cm
- Hmotnost 1.6 kg



Obr.23. Popis display přístroje ZETEC MIZ-21 SR. [autor]

4.3.2. Použité sondy

K celému měření bylo použito několik typů sond. Ty byly voleny obsluhou přístroje na základě její zkušenosti. K měření zkušebního vzorku aluminidu železa byla použita křížová sonda, která je popsána na obrázku č.24. Při měření porovnávacích vzorku byla pro hliník použita pravoúhlá sonda (obrázek č.25) a pro austenit absolutní sonda INDETEC, která byla však bez označení. Jednalo se zřejmě o prototyp sondy.



Křížová sonda

Frekvenční rozsah 100 - 900 kHz

Označení DTX PP10B WELD

SCAN PROBE - 3P

Číslo 910 - 5820 - 100

Obr.24. Křížová sonda. [12]



Pravoúhlá sonda

Frekvenční rozsah 50 - 500 kHz

Označení 39DT136S

Číslo 909 - 0136 - 000

Obr.25. Pravoúhlá sonda. [12]

4.4. Optimální nastavení pro zkušební vzorek

Význačnými parametry metody vířivých proudů, které ovlivňují výsledky měření touto metodou je elektrická vodivost zkoušeného materiálu, jeho permeabilita, použitý typ sondy a v neposlední řadě měřicí frekvence. V případě prvních dvou se jedná o materiálové konstanty, které průběhem zkoušky nelze nijak ovlivnit. Typ sondy, jak už bylo řečeno byl volen obsluhou přístroje, na základě zkušeností. Jediným zbývajícím parametrem je tedy měřicí frekvence. Proto před samotným měřením náhradních vad bylo zapotřebí najít tu neoptimálnější frekvenci pro měření.

V teoretické části bylo naznačeno, že existují dva významné orientační body při testování různých materiálů. Jde o optimální citlivost a optimální nastavení pro odlišení signálu. V praxi je význačnější parametr druhý, neboť jak už plyne z názvu jde o nastavení kdy je nejlépe oddělitelný signál vady od jiných vlivů, které narušují či negativně ovlivňují tok vířivých proudů.

Bylo tedy provedeno jednoduché měření, kdy nejmenší drážka o hloubce 0,5 mm byla testována řadou frekvencí v celém měřicím rozsahu sondy. Měření bylo započato frekvencí 100 kHz a postupovalo po 200 kHz až k hodnotě 900 kHz. Záznam tohoto měření je na obrázcích M1 až M5. Hodnocení výsledků je v tabulce X.

4.4 Hledání optimální frekvence :

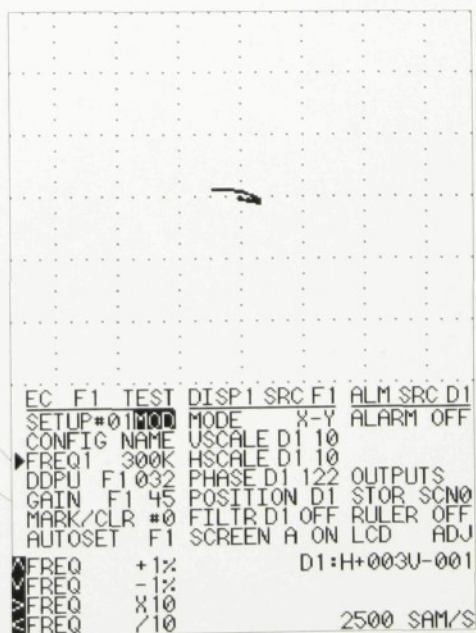
Materiál- aluminid, drážka 0.5 mm.

frekvence $f=100\text{ kHz}$

zesílení 45

Obr.M1. Drážka 0.5 mm, frekvence $f = 100\text{ kHz}$.frekvence $f = 300\text{ kHz}$

zesílení 45



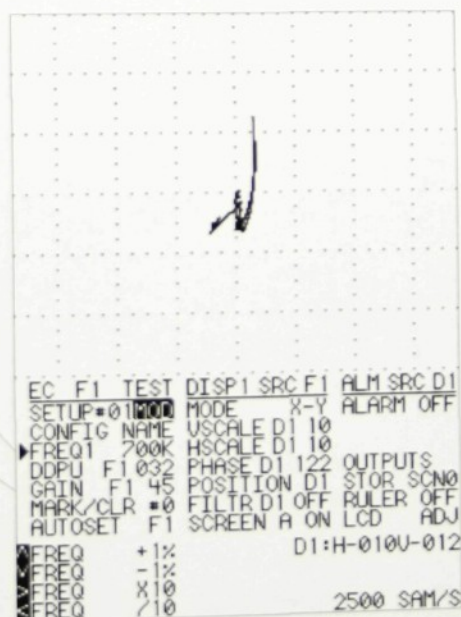
Obr.M2. Drážka 0.5 mm, frekvence 300 kHz.

frekvence $f = 500 \text{ kHz}$

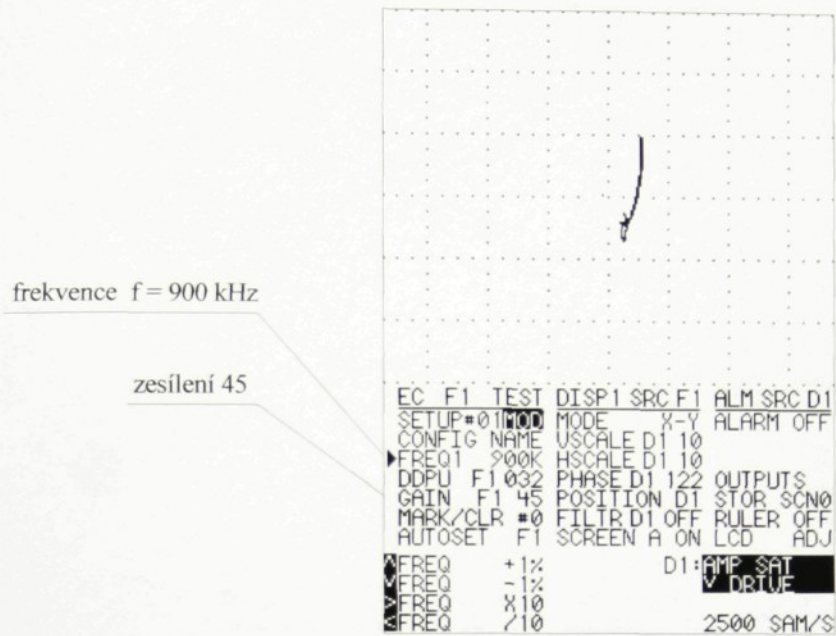
zesílení 45

Obr.M3.Drážka 0.5 mm, frekvence $f = 500 \text{ kHz}$.frekvence $f = 700 \text{ kHz}$

zesílení 45



Obr.M4 Drážka 0.5 mm, frekvence 700 kHz.



Obr.M5. Drážka 0.5 mm, frekvence $f = 900 \text{ kHz}$.

4.4.1. Hodnocení optimálního nastavení

Číslo měření	Měřicí frekvence [kHz]	Hodnocení výsledku
1.	100	žádný signál
2.	300	signál zřetelný, ale stále ještě malý
3.	500	výborně zřetelný signál
4.	700	signál stále dobrý, ale zmenšující se
5.	900	signál stále patrný, ale stále se zmenšující

Tab.X. Hodnocení naměřených výsledků při hledání optimální frekvence. [autor]

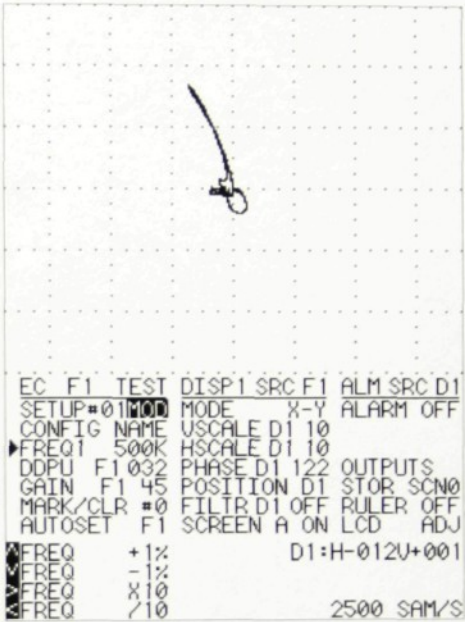
Z tabulky č.X, ale hlavně z obrázku M1 až M5 je zřetelné, že při užití frekvence 100 kHz není signál patrný. S rostoucí frekvencí se signál zlepšuje až k hodnotě 500 kHz. Při dalším navyšování frekvence je signál sice též dobře patrný, ale jeho velikost se pomalu zmenšuje. Na základě popsané teorie v části 3.3.3 lze předpokládat, že nastavení frekvence pro optimální citlivost bude menší než 500 kHz.

4.5 Měření náhradních vad na aluminidu železa

V další části experimentu byly proměřeny i zbývající drážky hloubek 1.0, 1.5, a 2.0 mm. Tyto drážky už byly však testovány pouze frekvencí 500 kHz, kterou dle předešlého měření považují pro tento materiál za optimální vzhledem k odlišení signálu. Výsledky měření jsou zobrazeny na obrázcích M6. až M9.

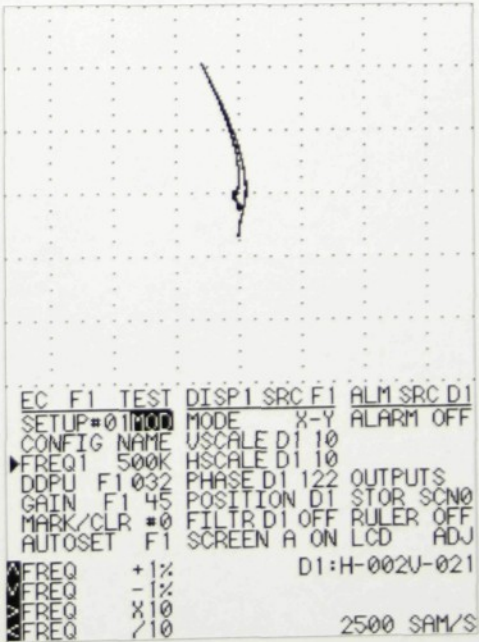
Šířka drážek 0.3 mm, hloubky drážek 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 mm, měřící frekvence 500 kHz

Hloubka drážky 0.5 mm
Měřící frekvence 500 kHz
Zesílení 45



Obr.M6. Výsledek měření drážky o hloubce 0.5 mm.

Hloubka drážky 1.0 mm
Měřící frekvence 500 kHz
Zesílení 45

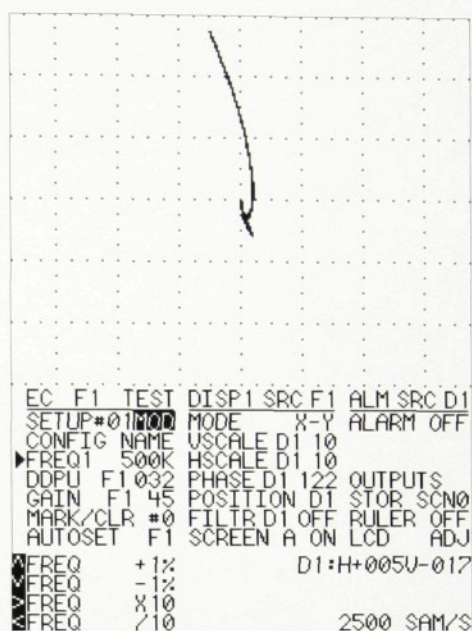


Obr.M7. Výsledek měření drážky o hloubce 1 mm.

Hloubka drážky 1.5 mm

Měřicí frekvence 500 kHz

Zesílení 45

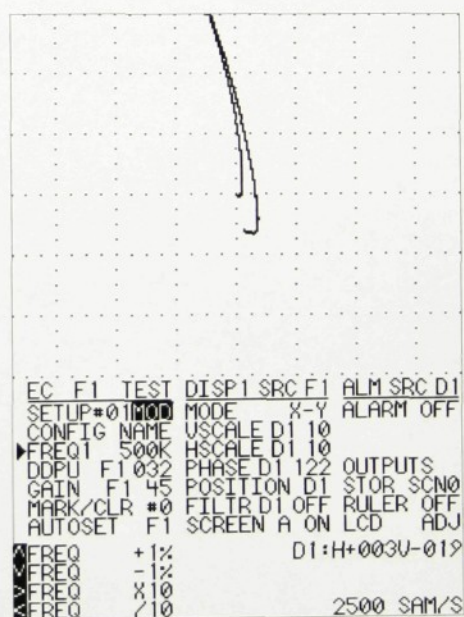


Obr.M8. Výsledek měření drážky o hloubce 1.5 mm

Hloubka drážky 2.0 mm

Měřicí frekvence 500 kHz

Zesílení 45



Obr.M9. Výsledek měření drážky o hloubce 2 mm.

4.5.1 Hodnocení měření náhradních vad

Na obrázcích M6 až M9 je vidno, že signál byl při měření všech čtyřech drážek dobře patrný. Navíc velikost signálu od vady se ze zvětšující hloubkou drážky, též zvětšovala. U měření drážky o hloubce 2,0 mm se zdá, že se již signál nevešel na display. Ve snaze zachovat pro jeden druh materiálu jedno nastavení přístroje, bylo zesílení ponecháno na 45 dB, stejně jako u měření předchozích třech drážek.

4.6. Porovnávací vzorky

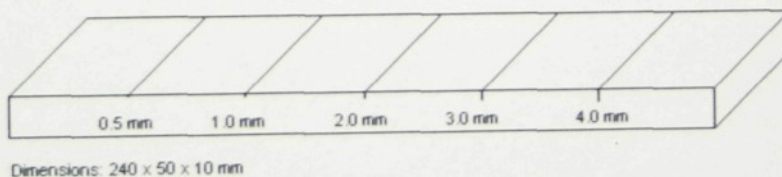
Samotné výsledky měření zkušebního aluminidu železa by neodborníkovi přes metodu vířivých proudů nepřinesly celkový obrázek o dobré či špatné aplikovatelnosti vířivých proudů na tento materiál. Získané výsledky je tedy zapotřebí porovnat s materiálem, na němž se vířivé proudy již běžně aplikují.

K tomuto čelu byly využity zkušební měrky, které náleží přímo k metodě vířivých proudů. Tyto měrky s definovanými vlastnostmi běžně slouží k nastavení parametrů na přístroji pro správné a přesné provedení zkoušky.

Z několika typů měrek byly vybrány přímo měrka pro určování hloubky drážek. A použity byly dva materiály, hliník a austenit. Každá tato měrka je opatřena drážkami o rozměrech:

-šířka 0.3 mm

-hloubky drážek 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0



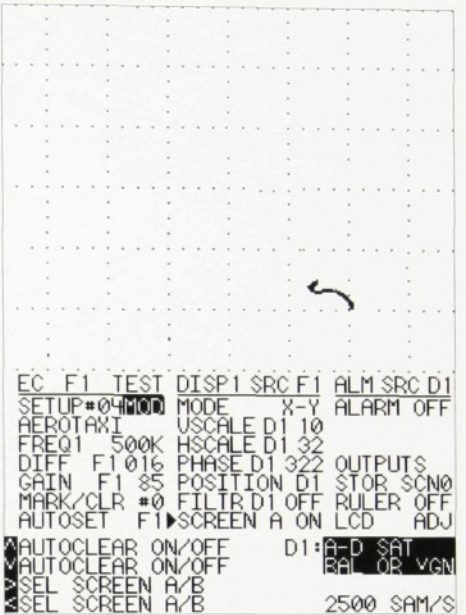
Obr.26. Kalibrační a referenční měrka ATG VP 32 Nr.004. [9]

K měření těchto materiálů byly použity sondy, které byly opět voleny obsluhou přístroje. Jednalo se o již zmiňované typy, pravoúhlá sonda pro hliník (obrázek č.25) a absolutní sonda INDETEC pro austenit.

4.6.1. Měření náhradních vad na hliníku:

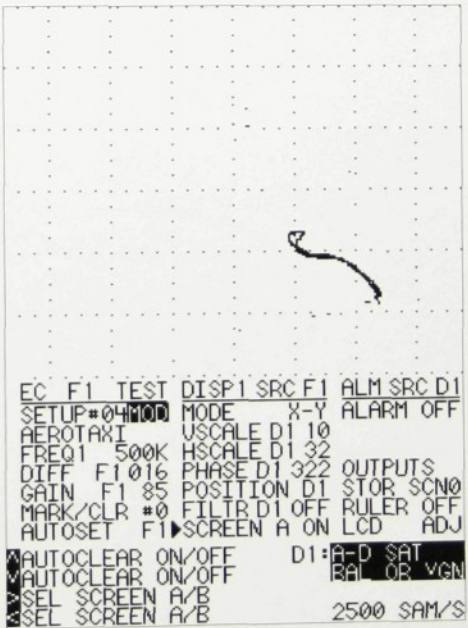
Materiál hliník, šířka drážek 0.3 mm, hloubky drážek 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 mm

Materiál-hliník
Drážka 0.5 mm
Frekvence 500 kHz
Zesílení 85



Obr.M10. Výsledek měření drážky o hloubce 0.5 mm. (Hliník)

Materiál-hliník
Drážka 1.0 mm
Frekvence 500 kHz
Zesílení 85



Obr.M11. Výsledek měření drážky o hloubce 1.0 mm. (Hliník)

4.6.2 Měření náhradních vad na austenitu

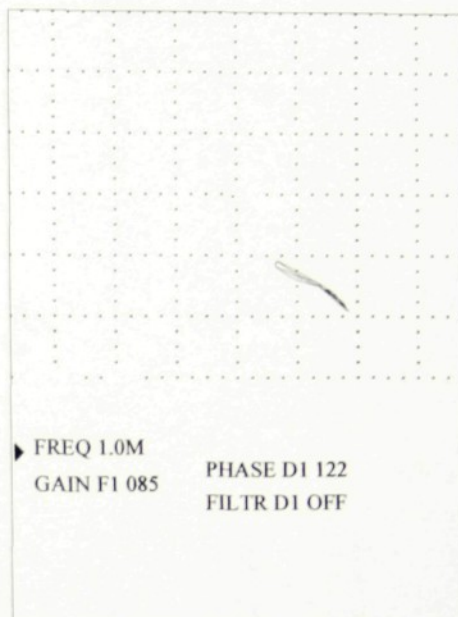
Materiál austenit, šířka drážek 0.3 mm, hloubky drážek 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 mm

Materiál-Austenit

Drážka 0.5 mm

Frekvence 1.0 MHz

Zesílení 85



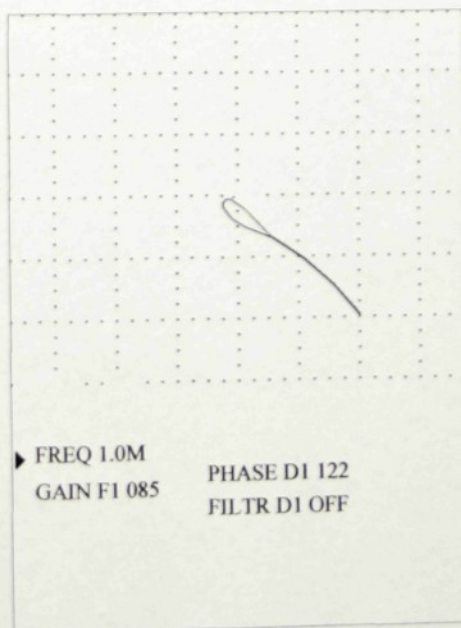
Obr.M14. Výsledek měření drážky o hloubce 0.5 mm. (Austenit)

Materiál-Austenit

Drážka 1.0 mm

Frekvence 1.0 MHz

Zesílení 85



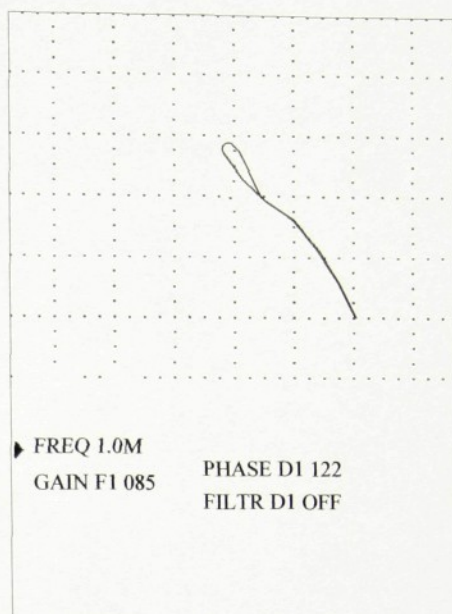
Obr.M15. Výsledek měření drážky o hloubce 1.0 mm. (Austenit)

Materiál-Austenit

Drážka 2.0 mm

Frekvence 1.0 MHz

Zesílení 85



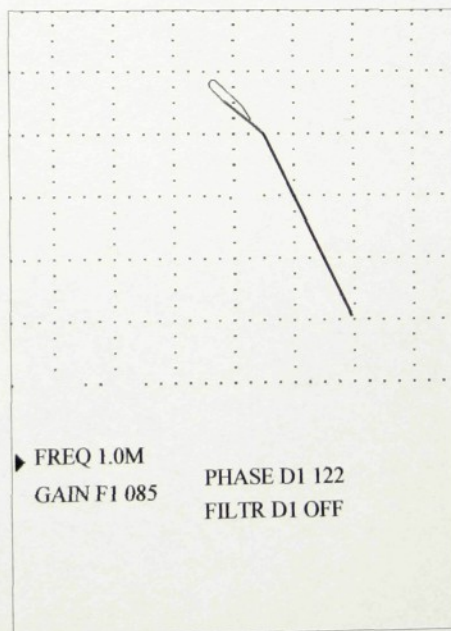
Obr.M16. Výsledek měření drážky o hloubce 2.0 mm. (Austenit)

Materiál-Austenit

Drážka 3.0 mm

Frekvence 1.0 MHz

Zesílení 85



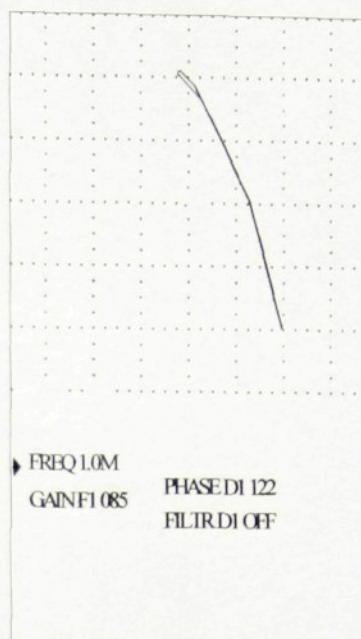
Obr.M17. Výsledek měření drážky o hloubce 3.0 mm. (Austenit)

Materiál-Austenit

Drážka 4.0 mm

Frekvence 1.0 MHz

Zesílení 85



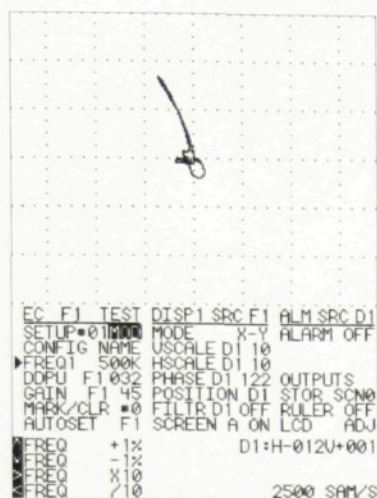
Obr.M18. Výsledek měření drážky o hloubce 4.0 mm. (Austenit)

U měření austenitu bylo z technických důvodů možno pořídít pouze ruční záznam. Výsledky měření pak byly pro přehlednost přeneseny v přesném měřítku do podoby, v které jsou prezentovány i předešlá měření. Jde o obrázky číslo M14 až M18. U těchto měření jsou též zaznamenána pouze data, jež jsou pro měření a jeho případné opakování nezbytná. (frekvence měření, zesílení, fáze, filtr-vypnut)

4.7. Porovnání naměřených výsledků

Na posledních obrázcích (čísla M19 až M22) jsou porovnány výsledky měření drážek o stejných hloubkách, ale na různých materiálech. Jde o porovnání aluminidu železa s hliníkem a drážek o hloubkách 0,5 a 2,0 mm a aluminidu železa s austenitem a opět drážek o hloubkách 0,5 a 2,0 mm.

Aluminid železa



Křížová sonda
Drážka 0.5 mm
Frekvence 500 kHz
Zesílení 45

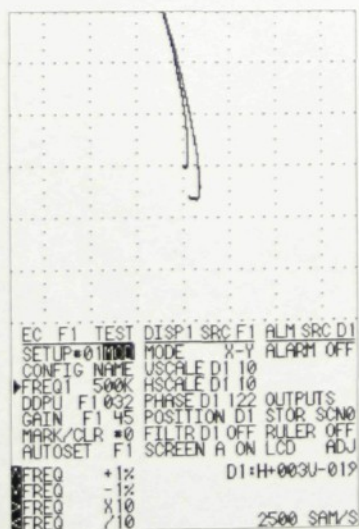
Hliník



Pravoúhlá sonda
Drážka 0.5 mm
Frekvence 500 KHz
Zesílení 85

Obr.M19. Porovnání zkušebního vzorku a hliníku, drážka 0,5 mm

Aluminid železa



Křížová sonda
Drážka 2.0 mm
Frekvence 500 kHz
Zesílení 45

Hliník



Pravoúhlá sonda
Drážka 2.0 mm
Frekvence 500 kHz
Zesílení 85

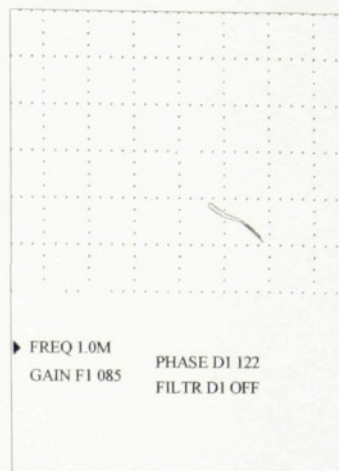
Obr.M20. Porovnání zkušebního vzorku a hliníku, drážka 2,0 mm

Aluminid železa



Křížová sonda
 Drážka 0.5 mm
 Frekvence 500 kHz
 Zesílení 45

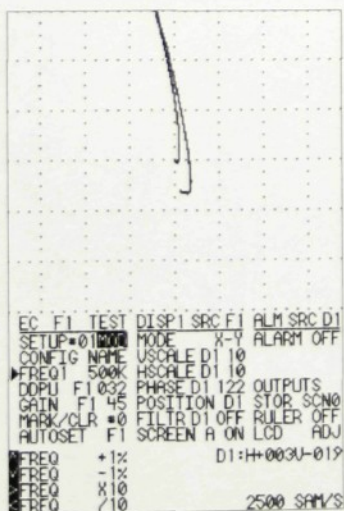
Austenit



Absolutní sonda INDETEC
 Drážka 0.5 mm
 Frekvence 1.0 MHz
 Zesílení 85

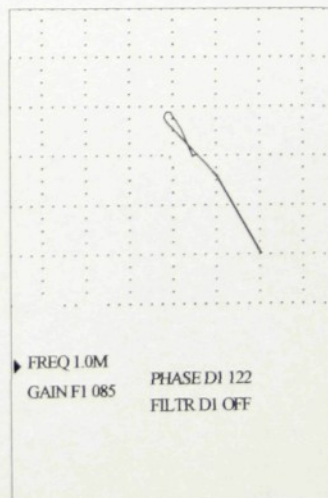
Obr.M21. Porovnání aluminidu železa a austenitu, drážka 0,5 mm

Aluminid železa



Křížová sonda
 Drážka 2.0 mm
 Frekvence 500 kHz
 Zesílení 45

Austenit



Absolutní sonda INDETEC
 Drážka 2.0 mm
 Frekvence 1.0 MHz
 Zesílení 85

Obr.M22. Porovnání zkušebního vzorku s austenitem, drážka 2,0 mm

4.7.1 Hodnocení porovnaných výsledků.

Na obrázcích M19 až M22 je vidno, že při optimálním nastavení metody pro aluminid železa jsou drážky detekovány stejně dobře jako drážky shodných hloubek na porovnávacích vzorcích. Zdá se, že u drážky 0,5 mm u hliníku je odezva na vadu dokonce menší než u zkušebního vzorku. Signál by bylo možno však zvětšit pomocí zesílení. To však opět zůstalo pro jeden typ materiálu stejné, stejně jako celé nastavení metody-

5. Závěr

Tato diplomová práce si kladla za cíl ověřit aplikovatelnost metody vířivých proudů na slitiny na bázi Fe_3Al a FeAl .

Za tímto účelem je v první teoretické části práce, která je nazvána intermetalické sloučeniny, popsán zkoušený materiál. V této kapitole je věnována pozornost nejen konkrétním slitinám na bázi FeAl či Fe_3Al , ale nejprve i celé skupině materiálu do nichž tyto slitiny náleží. Vedle metalurgických poznatků jsou popsány mechanické vlastnosti těchto materiálů a nakonec i možné technologie zpracování a aplikace pro něž jsou dnes aluminidy železa již využívány. Právě v přehledu možných postupů výroby aluminidů a výrobku z nich je možno nalézt technologie, při jejichž použití mohou vzniknout na výrobku povrchové vady. Ty jsou, jak vyplývá z druhé teoretické části práce, nazvané defektoskopie, velice dobře detekovatelné defektoskopickou metodou vířivých proudů.

V části práce popisující metodu vířivých proudů je nejprve tato metoda zařazena do celkového výčtu všech metod nedestruktivního testování. Z něho je patrné, že metody které jako veličiny ke zkoušení používají elektrický proud, elektromagnetické pole či kapaliny jsou vhodné k testování povrchových trhlin a prasklin. Do této skupiny metod patří i vířivé proudy. Naopak metody využívající elektromagnetické či mechanické vlnění jsou vhodné zejména pro vnitřní objemové vady. Představiteli těchto metod jsou prozařovací metody či ultrazvuk.

V této kapitole práce jsou též definovány důležité parametry ovlivňující měření metodou vířivých proudů. Jde o magnetickou permeabilitu a elektrickou vodivost měřeného materiálu a u samotné metody pak frekvenci měření a použitý typ sondy.

Ve čtvrté, již experimentální části práce, jsem se nejprve věnoval zkušebnímu vzorku aluminidu železa. Vzorek materiálu na bázi Fe_3Al je feromagneticky, to bylo prokázáno jednoduchým pokusem pomocí magnetu. Dá se tedy předpokládat, že permeabilita zkušební vzorku se nebude pohybovat v blízkosti hodnoty jedna, ale bude umístěna vysoko nad tuto hodnotu.

I když permeabilita svým vlivem převyšuje vliv elektrické vodivosti, s ohledem na špatnou elektrickou vodivost aluminidů železa, byla větší pozornost věnována právě elektrické vodivosti. Nejprve jsem pomocí dostupné literatury našel hodnotu elektrické vodivosti, též aluminidu železa, ale i jiném chemickém složení. Elektrická vodivost tohoto materiálu byla $\sigma = 0.81 \text{ S.m.mm}^{-2}$. Když jsem tuto hodnotu porovnal se skupinou vybraných materiálů, dospěl jsem k závěru, že elektrická vodivost tohoto materiálu je o

jeden až dva řády nižší než u ocelí, hliníku či mědi. V zápětí jsem provedl měření jehož účelem bylo zjistit alespoň přibližnou elektrickou vodivost zkoušeného vzorku. Jelikož zkoušený aluminid železa byl feromagnetický, nebylo možné k tomuto využít metodu vířivých proudů, kterou lze měřit vodivost pouze u neferomagnetických materiálů. Na tomto místě je nutné podotknout, že zkušební vzorek Fe_3Al je sice feromagnetický, ale materiály na bázi FeAl , jež ovšem nebyly pro měření k dispozici, jsou materiály neferomagnetické. Je možno se tedy domnívat, že u těchto materiálů by bylo možno elektrickou vodivost zjistit přímo pomocí metody vířivých proudů. Elektrická vodivost zkušebního vzorku byla však zjištěna pomocí tzv. čtyřbodové metody a ohmova zákona, přes elektrický odpor. Přestože výsledek měření nelze považovat za příliš přesný a to zejména kvůli nevhodným vzorkům, považuji zjištěnou hodnotu $\sigma = 0,57 \text{ S.m.mm}^{-2}$, s ohledem k účelu tohoto experimentu, za dostatečně přesnou. Hlavním smyslem tohoto měření totiž nebylo zjistit přesnou hodnotu elektrické vodivosti aluminidu železa. Ale porovnat tento zkušební vzorek na základě elektrické vodivosti se skupinou jiných materiálů a potvrdit, tak domněnku, že elektrická vodivost aluminidu železa je ve srovnání s materiály jako ocel, hliník či měď o jeden či až o dva řády nižší. To se nakonec i tímto měřením potvrdilo.

Závěrečná část experimentu je věnována již samotnému měření vířivými proudy. K tomu byl připraven zkušební vzorek materiálu se čtyřmi drážkami o šířce 0.3 mm a hloubkách 0.5, 1.0, 1.5 a 2 mm. S ohledem na vysokou tvrdost aluminidu železa je potřebné dodat, že příprava jakéhokoliv vzorku, je na užití zařízení a čas poměrně náročná.

V dalším postupu je stanoveno optimální nastavení metody pro zkušební vzorek. Zde jsem se soustředil především na určení měřicí frekvence. Ta byla hledána s ohledem na nejlepší odlišení signálu. Měření prokázalo, že nejvhodnější hodnota měřicí frekvence se pohybuje okolo 500 kHz. Frekvence pro optimální citlivost bude nižší než 500 kHz.

Následně byly frekvencí 500 kHz proměřeny všechny čtyři drážky na zkušebním vzorku aluminidu železa. K porovnání s těmito výsledky byly dále změřeny drážky na zkušebních měrkách z hliníku a z austenitu. Nastavení metody pro tyto materiály, především tedy měřicí frekvence a zvolený typ sondy byly pochopitelně odlišné od zkušebního vzorku. Společným pojítkem celého měření, na jehož základě si dovoluji získané výsledky porovnat je to, že nastavení bylo pro každý materiál optimální. Z porovnání naměřených výsledků na drážkách o shodných hloubkách pak vyplývá, že

při vhodně zvolené měřicí frekvenci, v tomto případě 500 kHz a při dobře zvoleném typu sondy, je detekce povrchových náhradních vad na zkušebním vzorku aluminidu stejně dobrá jako u hliníku či austenitu, tedy u materiálu na nichž jsou vířivé proudy již běžně aplikovány.

I když v práci bohužel nejsou měřeny žádné reálné vady, dá se předpokládat, že i přes malou elektrickou vodivost aluminidu železa by jejich měření bylo možné. To by také mohl být další směr testování vířivých proudů na slitinách na bázi FeAl a Fe₃Al.

Použitá literatura:

- [1] Ing. Bohumil Míšek, Ing. Luděk Ptáček, Zkoušení materiálů a výrobků bez porušení, SNTL, Praha 1973
- [2] Ing. Šnajberk, přednáška ET II (MS1), E-ET2 GE 177.151. ATG s.r.o. Praha 1990
- [3] Prof. RNDr. Petr Kratochvíl, DrSc. Slitiny na bázi aluminidu železa, základní fyzikálně metalurgické poznatky a konstrukční použití ve strojírenství, hutnické listy č.7-8/ 1997.
- [4] Förster: Theoretische und experimentale Grundlagen der zerstörungsfreien werkstoffprüfung mit Wirbelstromverfahren. Instituts-Bericht Nr 28, 1954
- [5] Výzkumná zpráva č.z-53-136, Náhradní materiál pro krakování zemního plynu, 1953
- [6] Ing. Jaromír Fiala, Adolf Bebr, Zdeněk Matoška, Strojnické tabulky, materiály pro strojírenskou výrobu, SNTL 1990
- [7] RNDr. Jiří Mikulčák, CSc. a kol., Matematické, fyzikální a chemické tabulky, Státní pedagogické nakladatelství, n.p. Praha 1988.
- [8] McKamey C.G. : in „ Physical Metallurgy and Processing of Intermetallic Compounds“, eds. N.S. Stoloff, V.K. Sikka, Chapman & Hall, 1996, s.351.
- [9] Propagační materiál ATG s.r.o., měrky pro metodu vířivých proudů
- [10] Binary Alloy Phase Diagrams, ed. T.B. Massalski, 2nd Edition, ASM International, 1992, Vol.2, str. 147
- [11] [www//ZETEC.com](http://www.ZETEC.com)
- [12] Materiály ATG s.r.o. Praha, katalog sond pro metodu vířivých proudů
- [13] Ing. Petr Kroha, CSc, Doc. Ing. Jiří Tolar, CSc., Karel Šustr, Elektrotechnika, SNTL, 1985.

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo) a § 35 (o nevýdělečném užití díla k vnitřní potřebě školy).

Beru na vědomí, že TUL, která má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé práce a prohlašuji, že **souhlasím** s případným užitím mé práce (prodej, zapůjčení apod.)

Jsem si vědom toho, že užití své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mě vyžadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Datum: 31. října 2004

Podpis.....