



AKUSTICKÁ A MAGNETICKÁ NEDESTRUKTIVNÍ STRUKTUROSKOPIE ALUMINIDŮ, SLITIN MĚDI A KOBALTU

Diplomová práce

Studijní program: M2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 – Strojírenská technologie
Autor práce: **Mirek Toth**
Vedoucí práce: doc. Ing. Břetislav Skrbek, CSc.





ACOUSTIC AND MAGNETIC NON-DESTRUCTIVE STRUCTUROSCOPY OF IRONE ALUMINIDES AND COPPER AND COBALT ALLOYS.

Diploma thesis

Study programme: M2301 – Mechanical Engineering
Study branch: 2303T002 – Engineering Technology
Author: **Mirek Toth**
Supervisor: doc. Ing. Břetislav Skrbek, CSc.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jméno a příjmení	Mirek T O T H
studijní program	M2301 Strojní inženýrství
obor	2303T002 Strojírenská technologie
zaměření	Materiálové inženýrství

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

Akustická a magnetická nedestruktivní strukturoskopie aluminidů, slitin mědi a kobaltu

Zásady pro vypracování:

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

1. Prostudujte publikace o akustické a magnetické nedestruktivní strukturoskopii slitin železa.
2. Informujte se o vlastnostech, složení a struktuře aluminidů, Al bronzů a stelitů.
3. Proveďte cílené experimenty, TZ a měření dodaných vzorků.
4. Formulujte základní poznatky jako podklad pro další výzkum, námět projektu.



Forma zpracování diplomové práce:

- průvodní zpráva v rozsahu 40 - 50 stran
- přílohy

Seznam literatury (uved'te doporučenou odbornou literaturu):

- [1] KRATOCHVÍL, P.: *Slitiny na bázi aluminidu železa...*, Hutnické listy č. 7-8, 1997.
- [2] SKRBEK, B.: *Nedestruktivní materiálová diagnostika litinových odlitků*. Kandidátská disertační práce, VŠST LIBEREC, 1988.
- [3] ASM Handbook. Nonferrous Alloys. Volume 2, pdf version 1.4., 2004.

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Břetislav Skrbek, CSc.

Konzultant diplomové práce:

Ing. Adam Pazourek, Ph.D.

L.S.

prof. Ing. Petr LOUDA, CSc.
vedoucí katedry

doc. Ing. Miroslav MALÝ, CSc.
děkan

V Liberci dne 18.10.2013

Anotace

Téma práce: Akustická a magnetická nedestruktivní strukturoskopie aluminidů, slitin mědi a kobaltu.

Tato diplomová práce se zabývá průzkumem využití akustické a magnetické nedestruktivní strukturoskopie aluminidů železa, slitin mědi a kobaltu. Úkolem je na základě naměřených hodnot posoudit vhodnost akustického a magnetického testování aluminidů železa, slitin mědi a kobaltu. Cílem práce je na základě vypracovaných výsledků a poznatků vytvořit podklady pro další výzkum relativně opomíjené nedestruktivní strukturoskopie těchto slitin.

Klíčová slova: nedestruktivní strukturoskopie, aluminidy železa, slitiny mědi, slitiny kobaltu.

Annotation:

Thesis: Acoustic and magnetic non-destructive structuroscopy of irone aluminides and copper and cobalt alloys.

This thesis explores the use of acoustic and magnetic non-destructive structuroscopy of irone aluminides and copper and cobalt alloys. The mean task of this work is to assess the suitability of acoustic and magnetic testing irone aluminides and copper and cobalt alloys on the base of the measured values. The aim of this thesis is to use obtained results and findings to create a basis for further research of relatively neglected non-destructive structuroscopy of these alloys.

Keywords: non-destructive structuroscopy aluminide alloys, copper alloys, cobalt alloys.

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 mé diplomové práce a konzultantem.

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

Datum:

Podpis:

Poděkování:

Na tomto místě bych chtěl poděkovat panu doc. Ing. Břetislavu Skrbkovi, CSc. za jeho odborné vedení mé diplomové práce, za jeho ochotu, rady a připomínky.

Dále bych velmi rád poděkoval panu Ing. Adamu Pazourkovi, Ph.D. za jeho cenné rady, ochotu a trpělivost během zpracování této práce.

V neposlední řadě bych rád poděkoval panu RNDr. Peteru Slámovi z firmy COMTES FHT a.s., Dobřany a firmě Tedom a.s., Jablonec nad Nisou za poskytnutí vzorků do mé diplomové práce.

Velké poděkování patří i mé rodině za dlouholetou psychickou i finanční podporu během studia.

Obsah

1. ÚVOD	14
2. TEORETICKÁ ČÁST	15
2.1. Nedestruktivní strukturoskopie	15
2.1.1 Ultrazvuk.....	15
2.1.1.1 Fyzikální podstata ultrazvuku	16
2.1.1.2 Rychlost šíření ultrazvukových vln.....	18
2.1.1.3 Odraz a lom rovinné vlny.....	19
2.1.1.4 Útlum ultrazvuku	20
2.1.2 Akustické metody zkoušení	21
2.1.2.1 Akustické vlastnosti	21
2.1.2.2 Metody zkoušení	22
2.1.3 Magnetismus	23
2.1.3.1 Magnetické pole.....	23
2.1.3.2 Zdroje magnetického pole.....	23
2.1.3.3 Veličiny užívané v magnetismu.....	24
2.1.3.4 Magnetické vlastnosti látek.....	25
2.1.4 Magnetické metody zkoušení.....	27
2.1.4.1 Podmínky pro použití magnetických strukturoskopických metod.....	29
2.1.4.2 Veličiny měřené v magnetické strukturoskopii	30
2.1.4.3 Principy strukturoskopických metod.....	32
2.1.4.4 Principy se stejnosměrným či kvazistatickým magnetickým polem.....	32
2.1.4.5 Principy se střídavým magnetickým polem	33
2.1.4.6 Princip metody magnetické skvrny	35
2.1.4.7 Přístroj DOMENA B3.b.....	36
2.2 Intermetalické fáze	38

2.2.1 Struktura intermetalik a jejich vlastnosti.....	38
2.2.2 Vlastnosti intermetalik	40
2.2.3 Aluminidy železa	40
2.2.5 Uspořádanost struktury	42
2.2.6 Vliv vakancí na aluminidy železa	43
2.2.7 Vliv legur	43
2.2.7.1 Vliv legur na mechanické vlastnosti	43
2.2.7.2 Vliv legur na elektrické vlastnosti.....	44
2.2.7.3 Bór.....	44
2.2.7.4 Uhlík.....	45
2.2.7.5 Titan	46
2.2.7.6 Chróm.....	46
2.2.7.7 Zirkonium.....	47
2.2.8 Způsoby zpracování aluminidů železa	48
2.2.9 Využití aluminidů železa	48
2.3 Slitiny mědi	50
2.4 Slitiny kobaltu	51
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	52
3.1 Zkušební vzorky.....	52
3.1.1 Příprava vzorků pro měření.....	53
3.1.2 Analýza struktury materiálů	53
3.2 Použitá měřicí technika	54
3.3 Popis měření.....	55
3.3.1 Měření magnetizace vzorků	55
3.3.2 Měření ultrazvukové tloušťky vzorků.....	56
3.4 Aluminidy železa	57
3.4.1 Vzorek FeAlCr1	57

3.4.1.1 Měření magnetizace vzorků FeAlCr1	58
3.4.1.2 Měření ultrazvukové tloušťky vzorků FeAlCr1	58
3.4.2 Vzorek FeAlCr2	59
3.4.2.1 Měření magnetizace vzorku FeAlCr2	59
3.4.2.2 Měření ultrazvukové tloušťky vzorku FeAlCr2	60
3.4.3 Vzorek FeAlCr3	60
3.4.3.1 Měření magnetizace vzorku FeAlCr3	61
3.4.3.2 Měření ultrazvukové tloušťky vzorku FeAlCr3	61
3.4.4 Vzorek FeAlTi	61
3.4.4.1 Měření magnetizace vzorků FeAlTi	62
3.4.4.2 Měření ultrazvukové tloušťky vzorků FeAlTi	63
3.4.5 Vzorek FeAlC	63
3.4.5.1 Měření magnetizace vzorku FeAlC	64
3.4.5.2 Měření ultrazvukové tloušťky vzorku FeAlC	64
3.4.6 Vzorek FeAl	65
3.4.6.1 Měření magnetizace vzorků FeAl	65
3.4.6.2 Měření ultrazvukové tloušťky vzorků FeAl	66
3.5 Slitiny mědi - hliníkové bronzy	67
3.5.1 Struktura materiálu CuAl10Ni5Fe4	67
3.5.2 Mechanické vlastnosti slitiny CuAl10Ni5Fe4 po tepelných zpracováních	68
3.5.3 Měření magnetizace vzorků slitiny CuAl10Ni5Fe4	70
3.5.4 Měření ultrazvukové tloušťky vzorků slitiny CuAl10Ni5Fe4	73
3.6 Slitiny kobaltu	76
3.6.1 Stellite 6	76
3.6.2 Stellite 12	77
3.6.3 Měření magnetizace sacích sedel (Stellite 6)	78
3.6.4 Měření magnetizace výfukových sedel (Stellite 12)	79

3.6.5 Měření magnetizace výfukového sedla č. 9 (Stellit 12).....	81
3.6.6 Identifikace materiálů výfukových sedel (Stellit 12).....	83
3.6.7 Závislost magnetizace a tvrdosti Stellitu 6 a Stellitu 12 na době žíhání.....	85
4. DISKUZE VÝSLEDKŮ	86
4.1 Výsledky měření aluminidů železa	86
4.2 Výsledky měření hliníkových bronzů (slitiny CuAl10Ni5Fe4).....	87
4.3 Výsledky měření kobaltových slitin (Stellitu 6 a Stellitu 12).....	88
5. ZÁVĚR	89
6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	91

Seznam použitých veličin:

Symbol veličiny	Jednotka	Název veličiny
A	[m]	Amplituda (maximální výchylka)
T	[s]	Perioda (dobu kmitu)
f	[Hz]	Frekvence (kmitočet)
y	[m]	Okamžitá výchylka
t	[s]	Čas
ω	[rads^{-1}]	Úhlová rychlost
ϕ	[rad]	Fázový úhel
λ	[m]	Vlnová délka
c	[ms^{-1}]	Rychlost šíření zvuku
c_L	[ms^{-1}]	Rychlost šíření podélných vln
E	[Pa]	Youngův modul pružnosti
ρ	[kgm^{-3}]	Hustota prostředí
μ'	[-]	Poissonova konstanta
c_T	[ms^{-1}]	Rychlost šíření příčných vln
c_{L0}	[ms^{-1}]	Rychlost zvuku v oceli ($c_{L0} = 5920 \text{ m.s}^{-1}$)
G	[Pa]	Modul pružnosti ve smyku
Z	[-]	Akustický vlnový odpor
R	[-]	Součinitel odrazu
D	[-]	Součinitel průchodu
α	[°]	Úhel dopadu vlny
β	[°]	Úhel lomu příčné vlny
δ	[°]	Úhel lomu podélné vlny
c_{L1}	[ms^{-1}]	Rychlost šíření dopadající podélné vlny
c_{L2}	[ms^{-1}]	Rychlost šíření lomené podélné vlny
c_{T2}	[ms^{-1}]	Rychlost šíření lomené příčné vlny
α'	[dBm^{-1}]	Součinitel útlumu
α_1'	[dBm^{-1}]	Součinitel útlumu pohlcováním
α_2'	[dBm^{-1}]	Součinitel útlumu rozptylem
f_r	[Hz]	Vlastní rezonanční frekvence

Symbol veličiny	Jednotka	Název veličiny
L	[m]	Skutečná tloušťka stěny
L_u	[m]	Ultrazvuková tloušťka stěny
B	[T]	Magnetická indukce
S	[m ²]	Plošný obsah
Φ	[Wb]	Magnetický indukční tok
u_i	[V]	Indukované napětí v závitě
H	[Am ⁻¹]	Intenzita magnetického pole
H_e	[Am ⁻¹]	Intenzita vnějšího magnetického pole
H_r	[Am ⁻¹]	Remanentní intenzita magnetického pole
H_o	[Am ⁻¹]	Intenzita impulzního magnetického pole
N	[-]	Demagnetizační činitel
I	[A]	Elektrický proud
r	[m]	Vzdálenost od vodiče
π	[-]	Ludolfovo číslo
μ	[Hm ⁻¹]	Permeabilita prostředí
μ_0	[Hm ⁻¹]	Permeabilita vakua
μ_r	[-]	Poměrná (relativní) permeabilita prostředí
M	[Am ⁻¹]	Magnetizace
R_m	[H ⁻¹]	Magnetický odpor (reluktance)
J	[T]	Polarizace
J_r	[T]	Remanentní magnetická polarizace
κ	[-]	Magnetická susceptibilita
η	[-]	Magnetické stínění
r_1	[m]	Vnitřní poloměr trubky
r_2	[m]	Vnější poloměr trubky

1. ÚVOD

Úkolem této diplomové práce je prozkoumat využití akustické a magnetické nedestruktivní strukturoskopie pro aluminidy železa, slitiny mědi a kobaltu. Doposud byly tyto metody používány pro testování ocelí a litin.

Aluminidy železa jsou předmětem výzkumu na katedře materiálu Technické univerzity v Liberci. Hliníkové bronzy a kobaltové slitiny, zejména stellity, nacházejí uplatnění např. na vysoce namáhaných komponentech pístových spalovacích motorů díky jejich výborným mechanickým a korozním vlastnostem, které si zachovávají i za vysokých teplot. V dnešní době jsou poměrně přísné požadavky kontroly strukturních a mechanických vlastností i v hromadné výrobě, což vyžaduje rychlé a spolehlivé nedestruktivní testování materiálů. Proto je snaha vytvořit databázi informací získaných akustickou a magnetickou nedestruktivní strukturoskopií těchto slitin.

V této práci bude magneticky a ultrazvukově testováno šest vzorků aluminidů železa rozdílného chemického složení, slitina mědi CuAl10Ni5Fe4 (hliníkový bronz) a kobaltové slitiny typu Stellite 6 a Stellite 12. Výsledkem by mělo být konstatování, zda je ultrazvuková a magnetická metoda vhodná pro testování daných slitin.

Cílem této diplomové práce není určit přesné, konkrétní vztahy mezi magnetickou a akustickou nedestruktivní strukturoskopií a aluminidy železa, slitinami mědi a kobaltu. Snahou je vytvořit podklady pro další výzkum nedestruktivního testování těchto slitin. Pro jednu diplomovou práci je to velmi rozsáhlé téma, ale na základě získaných poznatků a výsledků by mohla vzniknout další nová témata absolventských prací, které by se podrobněji zabývaly vztahy akustické a magnetické nedestruktivní strukturoskopie jednotlivých slitin.

2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1. Nedestruktivní strukturoskopie

Nedestruktivní testování materiálů tvoří obor defektoskopie a strukturoskopie. Defektoskopie se zabývá odhalováním geometrických vad vnitřních a povrchových, zatímco strukturoskopie se zabývá nedestruktivním měřením vlastností struktury (např. množství perlitu, tvar grafitu, tvrdost, pevnost, apod.). Tato věda zahrnuje také strukturuometrii, která slouží ke zjišťování chemického složení materiálu. [1]

Lze ji rozčlenit na následující metody:

- Akustické metody zkoušení
- Metody vířivých proudů
- Magnetické metody
- Metody RTG difrakce

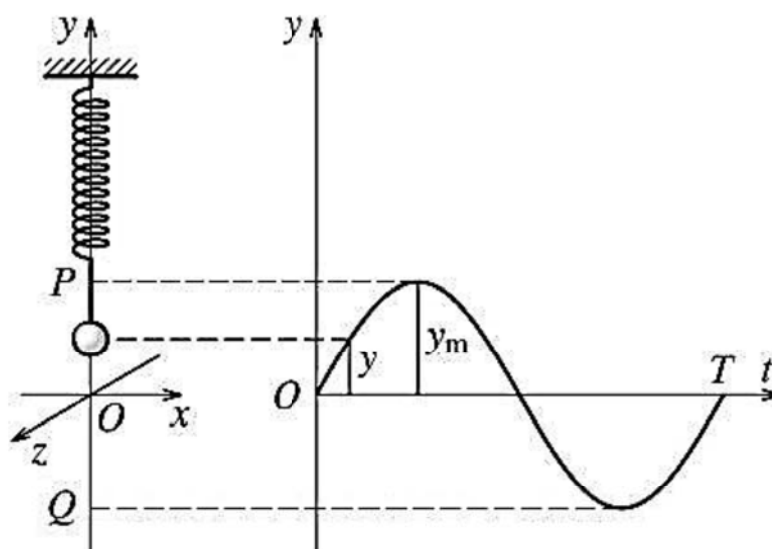
2.1.1 Ultrazvuk

Ultrazvuk je mechanické vlnění s frekvencemi nad 20 kHz (frekvence pro lidské ucho neslyšitelné). Energie, výkon a intenzita vlnění závisí na čtverci (úhlové) frekvence, ultrazvuk se tudíž projevuje vysokým přenosem energie a tlaků. [2] Zvuková energie se při frekvencích nad 100 kHz šíří ve svazku, který se může ohýbat, odrážet, lámat i absorbovat. Využívají se vlny podélné i příčné. Podélné vlny se mohou šířit v pevném, kapalném i plynném prostředí. Při velmi vysokých frekvencích, dosahujících řádů MHz, se zvukové vlny příčné vzduchem již nešíří, jsou silně tlumeny. Mohou se ovšem šířit v pevných látkách (kovy), čehož se využívá například v ultrazvukové strukturoskopii a defektoskopii.

Při nedestruktivním zkoušení materiálů slouží pro vysílání, přijímání a zpracování ultrazvukových signálů ultrazvukový přístroj se sondou. Přístroj vytváří krátký elektrický impulz, který v měniči ultrazvukové sondy vybudí mechanické kmity s frekvencemi ultrazvukového pásma. Vybuzené kmity se šíří v podobě zvukových vln, které se na rozhraní dvou prostředí (fází) lámou či odrážejí a jsou přijímány zpět. Přijatý signál se po elektronickém zpracování zobrazí na displeji či obrazovce ultrazvukového přístroje (defektoskopu). [3]

2.1.1.1 Fyzikální podstata ultrazvuku

V přírodě je řada jevů charakteristická tím, že mají kolem své neutrální osy minima a maxima, periodicky se opakující. Základní periodický děj odvozený od bodu pohybujícího se na pružině nebo od rovnoběžného průmětu bodu na kotouči otáčejícím se konstantní rychlostí, se nazývá harmonický kmitavý pohyb. Grafické znázornění tohoto pohybu je sinusoida (obr.1) [4]



Obr. 1 Harmonický kmitavý pohyb [5]

Definujeme:

- amplituda (maximální výchylka - A [m])
- perioda (doba kmitu) - T [s]
- frekvence (kmitočet) - f [Hz]

Kolem rovnovážné polohy kmitá bod úhlovou rychlostí (kruhovou frekvencí) $\omega = 2\pi f$.

Okamžitá výchylka bodu je dána vztahem:

$$y = A \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

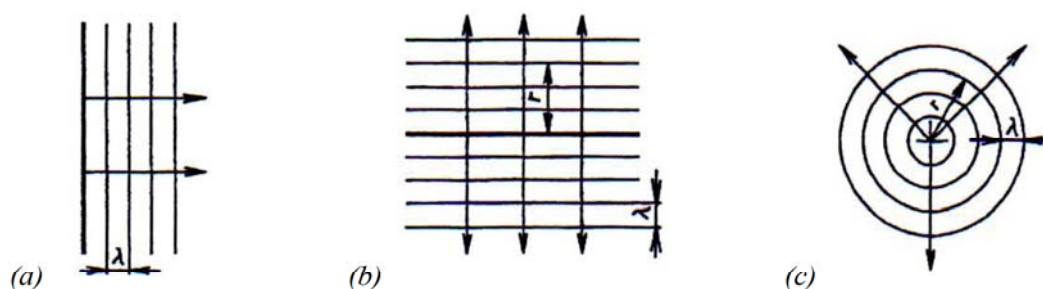
Doba kmitu (perioda) je časový interval, ve kterém proběhne celý kmit bodu. Z doby kmitu je odvozena frekvence (počet kmitů za 1 sekundu). Závislost mezi frekvencí a dobou kmitu dána vztahem $f = 1/T$.

Šíření kmitavého pohybu v prostoru se nazývá mechanické vlnění. Zvláštním případem pohybu pružného prostředí, kde jsou částice navzájem vázány pružnými vazebnými silami, je mechanické vlnění šířící se v plynném, kapalném i pevném

skupenství. Rozkmitá-li se některá částice prostředí, dojde vlivem pružných sil k rozkmitání sousední částice. Vlnění se proto šíří prostředím a přenáší energii. Rozruch se šíří prostředím určitou rychlostí c (rychlost zvuku; materiálová konstanta), která je závislá na fyzikálních vlastnostech tohoto prostředí. Z frekvence kmitání f a rychlosti zvuku c vyplývá délka vlny λ , která je definována jako vzdálenost mezi dvěma sousedními body kmitajícími ve fázi (2). [6]

$$\lambda = \frac{c}{f} = cT \quad (2)$$

Všechny sousední částice, kmitající ve stejné fázi, tvoří vlnoplochu. Podle tvaru vlnoplochy rozlišujeme druhy vln. Je-li vlnoplocha tvořena rovinou kolmou na směr šíření, jedná se o vlnu rovinnou (obr.2 a). Lze ji popsat vztahem (1). Kmitá-li nekonečně dlouhý válec se zanedbatelně malým průměrem, vytvoří se kolem něho vlny válcové (obr.2 b). Při kmitání bodového zdroje vznikne všesměrová kulová vlna (obr.2 c). O vlnění ultrazvukovém hovoříme tehdy, je-li frekvence kmitání prostředí vyšší, než 20 kHz. [7]



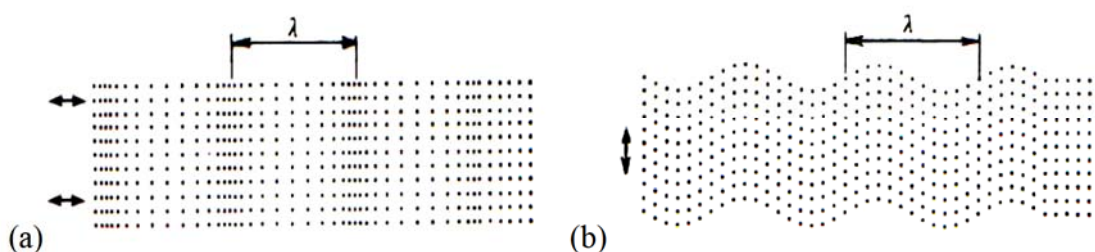
Obr. 2 Tvary mechanických vln [7]

(a) rovinná vlna, (b) válcová vlna, (c) kulová vlna

Při šíření ultrazvukových vln prostředím se částice rozkmitávají v různých směrech vzhledem ke směru postupu vln. Podle toho rozlišujeme druhy ultrazvukových vln (obr. 3) na:

- podélné vlny - částice prostředí kmitají přímočaře ve směru šíření vln. Dochází ke zhušťování a zředění částic prostředí a tudíž ke změně jeho objemu.
- příčné vlny - částice prostředí kmitají v jednom směru v rovině kolmé na směr šíření vlny (vlny jsou polarizovány)
- povrchové vlny - šíří se pouze na povrchu přibližně do hloubky vlnové délky, částice vykonávají eliptický pohyb.

- deskové vlny - šíří se buď jako vlny symetrické nebo asymetrické v závislosti na tloušťce materiálu, úhlu dopadu a frekvenci. [4]



Obr. 3 Druhy ultrazvukových vln [6]

(a) podélná vlna, (b) příčná vlna

V pevných látkách se mohou šířit všechny druhy vln. V kapalných a plynných látkách se mohou šířit pouze vlny podélné. Je to způsobeno tím, že v kapalinách a plynech jsou částice od sebe více vzdáleny, tudíž nemohou přenášet dostatečná smyková zatížení, potřebná ke vzniku příčných, deskových nebo povrchových vln. V ultrazvukové defektoskopii se využívají vlny podélné a příčné, které mají schopnost šířit se celým objemem materiálu.

2.1.1.2 Rychlost šíření ultrazvukových vln

Rychlost šíření je závislá na druhu vlny a závisí na hustotě a elastických konstantách pevné látky.

Rychlost šíření podélných vln v neohraničeném prostředí:

$$c_L = \frac{E}{\rho} \frac{1-\mu'}{(1+\mu')(1-2\mu')} \quad (3)$$

Rychlost šíření příčných vln v neohraničeném prostředí:

$$c_T = \frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\mu')} = \frac{G}{\rho} \quad (4)$$

Poměr rychlostí obou druhů vlnění závisí pouze na Poissonově konstantě:

$$\frac{c_T}{c_L} = \frac{1-2\mu'}{2(1-\mu')} \quad (5)$$

2.1.1.3 Odraz a lom rovinné vlny

Každé rozhraní dvou prostředí ovlivňuje šíření ultrazvukových vln. Dochází na něm k odrazu a při šikmém dopadu k lomu vln. K tomuto jevu dojde ovšem pouze tehdy, jsou-li rozměry překážky či rozhraní větší, než vlnová délka. Jsou-li rozměry rozhraní a vlnová délka řádově stejné, je lom doprovázen ohybem vlnění. Při průchodu vlny prostředím v něm vznikne akustický tlak. Dopadne-li vlna s akustickým tlakem p kolmo na rozhraní dvou prostředí, její část o akustickém tlaku p_1 se odrazí a část vlny o akustickém tlaku p_2 rozhraním projde. Obě sousedící prostředí jsou pak charakterizována svými akustickými vlnovými odpory Z_1 a Z_2 (6).

$$Z = \rho c \quad (6)$$

Pomocí akustických vlnových odporů obou prostředí lze určit tzv. součinitel odrazu R , který lze popsat vtahem (7) a součinitel průchodu D popsáný vztahem (8).

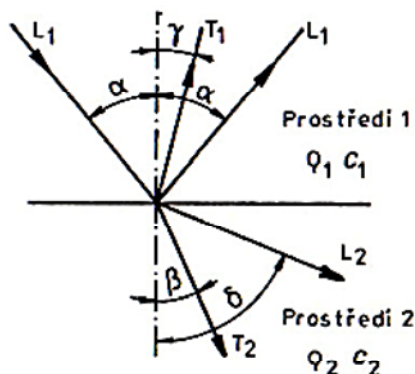
$$R = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (7)$$

$$D = \frac{2\rho_2 c_2}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (8)$$

Vztah mezi součinitelem odrazu a součinitelem průchodu je pak:

$$D = 1 + R \quad (9)$$

Dopadne-li na rozhraní dvou prostředí vlna šikmo, mohou při odrazu a lomu



vzniknout čtyři vlnové složky (obr. 4), šířící se dále pod určitými úhly. Vzájemné úhlové vztahy mezi jednotlivými složkami jsou popsány Snellovým zákonem. V tuhém prostředí mohou být odražené a lomené vlny dvojího druhu - podélné a příčné. Jev, kdy vzniká vlna jiného druhu, než je vlna dopadající, se nazývá vlnová transformace.

Obr. 4 Šikmý dopad vln na rozhraní dvou prostředí [4]

L - podélná vlna, T - příčná vlna

Vznikne-li v prostředí dopadající vlny nová vlna, jedná se o odraz, jestliže vznikne ve druhém prostředí, jde o lom. K vlnové transformaci tak může dojít jak při odrazu, tak při lomu. Znamená to, že nově vzniklá vlna vykazuje jiný způsob kmitání částic, než vlna dopadající.

Určující veličinou pro změnu úhlu při lomu je rychlost šíření ve druhém prostředí. Vztah mezi rychlostmi a úhly lomů v sousedních prostředích popisuje Snellův zákon lomu (podle obr. 4):

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_{L1}}{c_{T2}} \text{ resp. } \frac{\sin \alpha}{\sin \delta} = \frac{c_{L1}}{c_{L2}} \quad (10)$$

Jsou-li známi hodnoty rychlostí šíření jednotlivých druhů vln, lze ze vzorce vypočítat úhly podélné a příčné složky lomené vlny. Ze vztahu (10) vyplývá, že s rostoucí rychlostí šíření vlny v druhém prostředí se zvětšuje úhel lomu. [3]

2.1.1.4 Útlum ultrazvuku

Útlum je z pohledu ultrazvukové defektoskopie nepříznivý jev. Tyto ztráty jsou způsobeny úbytkem energie a poklesem akustického tlaku ultrazvukové vlny při průchodu reálným prostředím. Příčinou je jak pohlcování, tak rozptyl ultrazvukových vln.

Pohlcování je přeměna ultrazvukové energie v tepelnou v důsledku vnitřního tření ve struktuře. Odchylení určité části ultrazvuku od přímého směru v průběhu šíření se pak nazývá rozptyl. Způsobují ho různá rozhraní prostředí (póry, hranice zrn, vnitřní nečistoty), na kterých nastává odraz, lom a ohyb ultrazvukových vln. Kvantitativním vyjádřením je tzv. součinitel útlumu α' , který je dán součtem jednotlivých útlumů:

$$\alpha' = \alpha_1' + \alpha_2' \quad (11)$$

Útlum ultrazvuku je závislý na druhu materiálu, velikosti a orientaci zrna (anizotropii), frekvenci a typu vlny. Obecně jsou nejnižší ztráty (nejnižší hodnoty součinitele útlumu) u kovových materiálů s jemnozrnnou strukturou (u tvářených a tepelně zpracovaných materiálů) a naopak nejvyšší ztráty jsou u materiálů s hrubozrnnou strukturou. Celkové útlumové ztráty rostou exponenciálně s frekvencí vlnění. [3]

2.1.2 Akustické metody zkoušení

Struktura a chemické složení materiálu má značný vliv na některé vlastnosti ultrazvuku při jeho průchodu danou látkou, proto se změn těchto vlastností využívá k posuzování stavu struktury, popř. chemického složení. [1]

2.1.2.1 Akustické vlastnosti

Akustické vlastnosti materiálu jsou popsány rychlostí šíření pružného příčného nebo podélného kmitání atomů kolem jejich rovnovážných poloh a jejich útlumem. Rychlost podélného šíření zvuku závisí na modulu pružnosti, měrné hmotnosti a Poissonově konstantě (součiniteli příčné kontrakce). [1]

$$c_L = \frac{E(1-\mu')}{\rho(1+\mu')(1-2\mu')} \quad (12)$$

Prostupnost akustických vln materiálem klesá s rostoucím útlumem hmoty matrice a zejména s množstvím a velikostí vnitřních nespojitostí. Čím více je v materiálu nespojitostí, tím větší je množství a velikost odrazu tlaku akustické vlny z rozhraní zpět. [1] Například rozhraní matrice - grafit v litině odrazí 80,5 % tlaku akustické vlny. Přímé šíření akustické vlny litinou je po několika odrazech od útvarů grafitu vyčerpáno a rozptýleno. Velikost dráhy akustické vlny matricí závisí na labyrintu grafitických útvarů. Čím více útvary matrici oslabují (čím jsou štíhlejší), tím větší je hodnota akustické dráhy L_u ve srovnání s přímou dráhou L (tloušťkou prozvučované stěny). Rychlost zvuku c_L tak klesá.

$$c_L - c_{L0} \frac{L}{Lu} \quad (13)$$

Dochází-li v rychleji ochlazované části odlitku k metastabilní krystalizaci eutektika (uhlík se nevylučuje ve formě grafitu, ale váže se na železo ve formě karbidu Fe_3C a vylučuje se jako tvrdý ledeburit), existuje v šíření akustické vlny odlitkem méně překážek. Hodnota rychlosti zvuku s rostoucím množstvím ledeburitu ve struktuře roste. [8] Útlum amplitudy akustických kmitů α značně roste, pokud se délka vlny λ blíží velikosti útvarů. Hodnota $\alpha = 0,05$ pro oceli umožňuje prozvučovat i metrové tloušťky stěn. Grafit útlum značně zvyšuje. Velkou řadu odlitků lze charakterizovat vlastní rezonanční frekvencí f_r , která je funkcí modulu pružnosti E (popisuje tvar grafitu), měrné hmotnosti (určuje množství

grafitu) a geometrické štíhlosti $\frac{H}{D}$. Frekvence f_r se z pravidla nachází ve slyšitelném rozsahu.

$$f_r = k_f \frac{E}{\rho}^{0,5} \frac{D}{H^2} \quad (14)$$

Hodnota E je přímo závislá na velikosti rychlosti zvuku c_L a tím tedy na tvaru a množství grafitu.

$$E = \left(K \frac{L}{Lu} \right)^2 \quad (15)$$

2.1.2.2 Metody zkoušení

Jestliže je odlitek testován kmity generovanými aktivními sondami do lokálních průřezů stěn, jedná se o ultrazvukové zkoušení a pokud se hodnotí frekvence a útlum vlastních kmitů vybuzeného odlitku, jde o akustické rezonanční zkoušení. Oba způsoby zkoušení využívají interakce struktury s externě buzeným akustickým vlněním. Na rozdíl od těchto metod zkoušení metoda akustické emise pracuje s pasivními snímači vln, které generuje sama struktura z míst mezního namáhání.

Při ultrazvukové impulzní metodě bývá obvykle zdroj a současně detektor ultrazvukových vln sonda s kruhovým nebo obdélníkovým piezoelektrickým měničem elektrické energie na mechanickou. Ultrazvuková energie je do stěny odlitku vyzařována formou krátkých opakovaných impulzů (opakovací frekvence řádově v kHz) nosné vlny s frekvencí jednotek MHz. Konkrétní hodnota použité nosné frekvence tvoří kompromis mezi přesností (roste s výškou frekvence) měření a prozařitelností stěny odlitku. Pro akusticky heterogenní slitiny Fe (aluminidy, austenitické oceli a grafitické litiny) se používá frekvence maximálně 2 MHz. Vyslaný impulz se odrazí od protějšího povrchu stěny nebo rozhraní a jeho odraz sonda opět přijme. Po elektronickém zpracování se zobrazí jako odrazová echa („píky“) na displeji nebo obrazovce defektoskopu nebo číselným odečtem hodnoty rozteče ech na displeji tloušťkoměru. Jestliže se v akustické dráze vln vyskytne nespojitost větší, než je vlnová délka, odrazí se část energie vln k přijímací sondě a před koncovým echem (KE) se zobrazí jako vadové echo (VE). Velké vady, jejichž rozměry se blíží velikosti akustického měniče, odrazí tolik energie akustické vlny, že se výrazně potlačí, nebo i „zruší“ zobrazení koncového echa. Velikost ech se

vyjadřuje v dB. K přenosu ultrazvukového vlnění mezi čelem sondy a povrchem odlitku musí být navázána tzv. akustická vazba kontaktním kapalným médiem (voda, vazelína). [8, 9]

Zkoušení se týká prozvučovaného sloupce akusticky heterogenní slitiny Fe (aluminidu, austenitické oceli či grafitické litiny), který odpovídá průměru sondy a rozevření svazku vysílaných vln. Pro získání hodnot L a L_u nutných ke stanovení rychlosti zvuku c_L podle (2) je nutno provést měření posuvným měřítkem a ultrazvukem. Specializované ultrazvukové přístroje měří současně posuvným měřítkem a sondou umístěnou v čelisti měřítka. Měření rychlosti povrchových vln dvěma sondami s konstantní roztečí L na jedné straně odlitku může podstatně zvýšit produktivitu zkoušení. Hodnocena je však pouze povrchová část odlitku ovlivněná licí kůrou. Způsob zkoušení je tudíž vhodný pouze pro obrobené plochy odlitků. Reflektor povrchových vln tvoří hrana odlitku. Toho lze využít k měření rychlosti povrchových vln jen jednou sondou.

Rezonanční zkoušení spočívá ve vyvolání (generátorem s proměnným kmitočtem nebo úderem) a měření parametrů vlastních kmitů, které reprezentují celý objem odlitku. Takto lze zkoušet pouze „znějící“ štíhlé tvary. Odlitky musí být geometricky stejné v hmotnostní toleranci 3 %. [8]

2.1.3 Magnetismus

2.1.3.1 Magnetické pole

Magnetické pole je silové pole vznikající v prostoru kolem pohybujících se elektrických nábojů, např. v okolí permanentního magnetu nebo kolem vodiče protékaného elektrickým proudem. Pole je možné charakterizovat magnetickými indukčními siločarami. Siločáry jsou myšlené spojitě křivky, které v případě permanentního magnetu vycházejí ze severního pólu a vstupují do pólu jižního. Magnetické pole je vírové, protože siločáry jsou uzavřené křivky. Tečná magnetické siločáry v jejím libovolném bodě určuje směr vektoru magnetické indukce. [1]

2.1.3.2 Zdroje magnetického pole

Zdrojem magnetického pole permanentního magnetu je pohyb elektronů ve struktuře materiálu. Elektrony se pohybují okolo jádra atomu a zároveň rotují kolem své

osy. Tento pohyb, označovaný jako spin, je příčinou magnetického pole. V látce tak vzniknou elementární magnety, které jsou tvořeny dvěma opačnými spiny elektronů.

Zdrojem magnetického pole elektromagnetu je protékající elektrický proud (usměrněný pohyb volných elektronů). [10]

2.1.3.3 Veličiny užívané v magnetismu

Magnetická indukce B je vektorová veličina, definovaná silou působící na vodič, kterým protéká elektrický proud. Je to indukce homogenního pole, v němž na přímý vodič o délce 1 m působí síla 1 N, je-li vodič kolmý ke směru B a prochází-li jím proud 1 A. Magnetická indukce též udává hustotu magnetického indukčního toku na jednotku kolmé plochy dle vztahu (16). [10]

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (16)$$

Magnetický indukční tok Φ je skalární veličina definovaná napětím u_i indukovaným v závitě při časové změně toku Φ podle vztahu (17). Magnetickému indukčnímu toku 1 Wb (Weber) odpovídá indukované napětí 1 V, které vznikne v závitě obepínajícím tok při rovnoměrném poklesu toku z jednotkové hodnoty na nulu v čase 1 s. [10]

$$u_i = \frac{d\Phi}{dt} \quad (17)$$

Intenzita magnetického pole H je vektorová veličina. Intenzita magnetického pole je ve vzdálenosti r od přímého velmi dlouhého vodiče protékaného proudem I definována vztahem (18). Jednotkou intenzity magnetického pole je 1 Am^{-1} , což je intenzita pole ve vzdálenosti $r = 1/(2\pi) \text{ m}$ od vodiče s proudem 1 A. [10]

$$H = \frac{1}{2\pi r} \quad (18)$$

Mezi intenzitou magnetického pole a indukcí platí vztah:

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (19)$$

Permeabilita prostředí je součin relativní permeability prostředí μ (bezrozměrné číslo udávající kolikrát je magnetická indukce v dané látce větší, než je ve vakuu)

a permeability vakua μ_0 . Látky, kde je $\mu > 1$, se nazývají paramagnetické, látky, u nichž je $\mu < 1$ se označují jako diamagnetické a látky, které mají $\mu \gg 1$ jsou feromagnetické. Pro vakuum a vzduch platí $\mu = 1$. [10]

Magnetizace $\mathbf{M}$ je vektor, představující fyzikálně intenzitu pole uvnitř tělesa vyvolanou jeho magnetickými vlastnostmi. [10]

$$\mathbf{M} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{H} \quad (20)$$

Magnetický odpor (reluktance) R_m je odpor, který objekt klade magnetickému toku podobně jako elektrický odpor elektrickému proudu. [10]

Polarizace $\mathbf{J}$ je vektor, který udává změnu, vyvolanou magnetickými vlastnostmi tělesa. Je způsobena orientací elementárních magnetů (domén) v tělese, vytvořených pohybem elektrických nábojů uvnitř molekuly. [10]

$$\mathbf{J} = \mathbf{B} - \mu_0 \mathbf{H} = (\mu - 1) \mu_0 \mathbf{H} \quad (21)$$

Magnetická susceptibilita κ je koeficient úměrnosti mezi magnetickou polarizací $\mathbf{J}$ a indukcí $\mathbf{B}$. [10]

$$\mathbf{J} = \kappa \cdot \mathbf{B} \quad (22)$$

Kde:

$$\kappa = \mu - 1 \quad (23)$$

2.1.3.4 Magnetické vlastnosti látek

Elektrony v atomární struktuře látky vytváří svým orbitálním pohybem (oběhem kolem jádra atomu) a spinem (rotací kolem své osy) magnetický moment. Na velikost magnetického momentu má vliv především spin elektronů. V každé molekule látky se vytvářejí proudové smyčky s orientovanými magnetickými momenty. Magnetické momenty od jednotlivých molekul se mohou vzájemně kompenzovat, slabě podporovat nebo vytvářet v makro oblastech (v doménách) jednotně orientované magnetické zóny s výrazným magnetickým momentem. [11]

Látky lze na základě tohoto chování v magnetickém poli rozdělit na:

- diamagnetické
- paramagnetické
- feromagnetické

Diamagnetické látky

U diamagnetických látek se vytvářejí dvojice molekulárních proudových smyček, jejichž magnetické momenty jsou stejně velké a působí proti sobě. Při zařazení vnějšího magnetického pole je v molekulárních proudových smyčkách indukováno napětí zesilující proud té proudové smyčky, jejíž moment má opačnou orientaci než vnější pole, zatímco proud druhé smyčky je zeslabován, z čehož vyplývá, že výsledný moment má opačnou orientaci než vnější pole. Z nehomogenního pole jsou proto tyto látky slabě vypuzovány, v homogenním poli se malý váleček z této látky orientuje kolmo ke směru vnějšího pole. Mezi látky diamagnetické patří například zlato, stříbro, měď či sůl kamenná. [11]

Paramagnetické látky

U těchto látek se vyskytuje trvalý magnetický moment atomů (mají částečně nevykompenzovaný spinový magnetický moment). Vnější pole vyvolá diamagnetický efekt, ten však je slabší, než trvalý moment atomů. Paramagnetická látka je proto do gradientního pole slabě vtahována a malý váleček z této látky se orientuje ve směru vnějšího homogenního pole. Síly působící na paramagnetické i diamagnetické látky jsou velmi slabé. Mezi látky paramagnetické patří například hliník, kyslík či platina. [11]

Feromagnetické látky

Látky technicky velmi významné. Magnetizace u feromagnetických látek je mnohem větší než u látek paramagnetických. Zahřejeme-li však feromagnetikum na určitou teplotu, tzv. Curieův bod, ztrácí skokem vlastnosti feromagnetika a stává se z něho paramagnetikum. Při této teplotě (u železa je to 768 °C) se výrazně porušuje uspořádání atomů v krystalické mřížce. Feromagnetické látky si lze představit jako složené z magnetických oblastí, nazývaných domény. Každá doména se magnetuje podél krystalograficky významných směrů. Domény jsou navzájem odděleny přechodovými vrstvami, které se nazývají doménové (Blochovy) stěny. K pohybu Blochovy stěny je zapotřebí zvětšení domény na jedné straně a smrštění domény na straně druhé.

Nezmagnetizované feromagnetické látky mají domény nepravidelně uspořádány tak, že se jejich magnetické účinky ruší. [11]

Ve vnějším magnetickém poli se skokem natáčejí do směru intenzity magnetického pole H ty oblasti, jejichž momenty jsou tomuto směru blízké. Při zvyšování intenzity magnetického pole se postupně natáčejí všechny oblasti (i opačně orientované). Tento stav se nazývá magnetické nasycení, charakterizován indukci nasycení B_s . Charakteristikou feromagnetických látek je nelineární závislost mezi intenzitou magnetického pole H a magnetickou indukcí B .

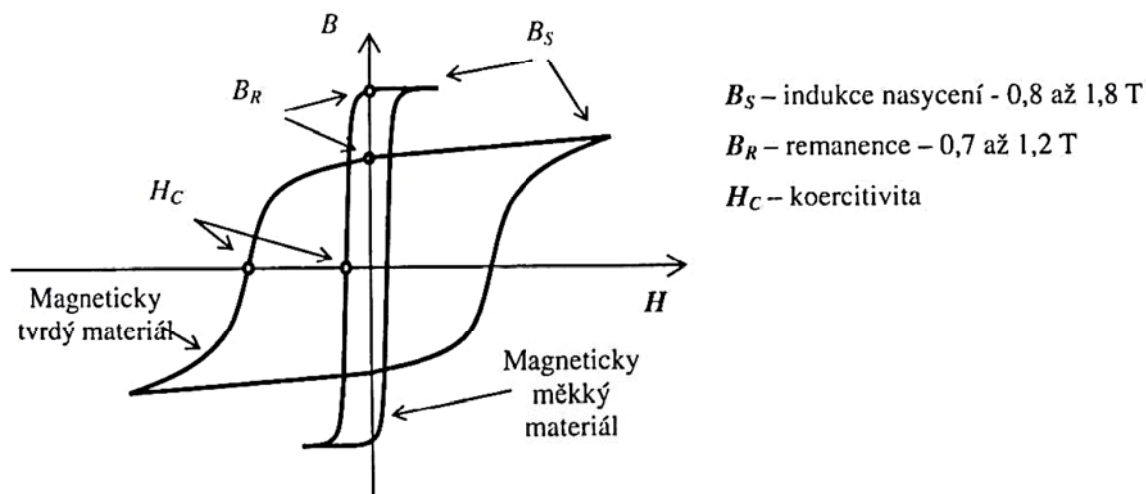
Paramagnetické a diamagnetické látky mají relativní permeabilitu přibližně rovnou jedné, zatímco u feromagnetik je relativní permeabilita v řádech stovek, tisíců a u některých materiálů až statisíců. [11]

Magneticky tvrdá feromagnetika (např. kobaltová, wolframová a chrómová ocel, tvrdé ferity) mají širokou hysterezní křivku. Mají velký zbytkový magnetismus a hodí se pro výrobu permanentních magnetů. [12]

Magneticky měkká feromagnetika (např. železo) mají úzkou hysterezní smyčku. Protože se u nich při každém přemagnetování přeměňuje jen malá energie na teplo, jsou vhodné pro magnetické obvody se střídavým proudem (např. u transformátorů). [12]

2.1.4 Magnetické metody zkoušení

Magnetické strukturoskopické metody využívají závislosti mezi magnetickými vlastnostmi a strukturně mechanickým stavem materiálu. V řadě případů lze použít pro kontrolu chemického složení, tepelného zpracování, hloubky povrchové vrstvy (např. vrstvy prokalení, nitridace apod.) nepřímý postup, a to měření magnetického parametru hysterezní smyčky, který je v souladu se sledovanou vlastností kontrolované součásti.



Obr. 5 Hysterezní křivky magneticky měkkého a magneticky tvrdého materiálu [11]

Na obr. 5 jsou znázorněny hysterezní křivky magneticky měkkého a magneticky tvrdého materiálu. Obrázek také může představovat strukturní stav materiálu tepelně zpracovaného např. kalením (širší křivka) a popuštěním (užší křivka). [11]

Hysterezní křivka s jejími charakteristickými parametry (koercitivní silou H_c , remanentní indukci B_r , indukci nasycení B_s , měrnými ztrátami P_h), často velmi citlivě reaguje na některé mechanické vlastnosti, např. tvrdost nebo pevnost materiálu. Rozlišitelnost těchto vlastností je větší, než se dosahuje klasickými mechanickými zkouškami. [11]

U mikrostruktury oceli se s rostoucím obsahem uhlíku snižuje permeabilita a zvyšují se koercitivní síla a hysterezní ztráta. Toto je přisuzováno zvýšenému vyplnění Blochových stěn v doménové struktuře částicemi karbidu. Také přítomnost fází, které nejsou feromagnetické, ovlivňuje magnetické vlastnosti. Destičky (lamely perlitu) více brzdí pohyb Blochových stěn než kuličky, proto materiály s lamelárním perlitem mají vyšší koercitivní sílu než materiály s kuličkovými karbidy. Perlitická mikrostruktura v eutektoidní oceli má nejmenší koercitivní síly a hysterezní ztráty a největší počáteční diferenciální permeabilitu. Bainitická struktura má střední hodnoty koercitivních sil, hysterezních ztrát a počáteční diferenciální permeability. Martenzitická struktura má největší koercitivní síly a hysterezní ztráty a nejmenší počáteční diferenciální permeabilitu. [13]

Při mechanickém namáhání feromagnetik je nutné brát v úvahu několik faktorů.

Důležité je například vědět, zda namáhání je v rozsahu elastické či plastické (trvalé) deformace. Dále je důležitý směr namáhání s ohledem na doménu spolu s možností násobků namáhání působících současně. Rovněž se musí uvážit, zda feromagnetický materiál má pozitivní či negativní magnetostrikci (změna rozměrů materiálu při zmagnetování). Materiál s pozitivní magnetostrikcí se prodlužuje podél směru magnetizace, oproti tomu materiál s negativní magnetostrikcí se ve směru magnetizace zkracuje. Reakce feromagnetického materiálu na namáhání je silně ovlivněna magnetostrikcí. Při namáhání v tahu materiálu s pozitivní magnetostrikcí se může zvýšit magnetická indukce. Mechanické namáhání tvoří účinné magnetické pole, působící ve spojitosti s jakýmkoliv použitým magnetickým polem. Většina železných slitin má smíšenou magnetostrikci v závislosti na použitém mechanickém namáhání (napětí) a magnetickém poli. Při namáhání tlakem má železo pozitivní magnetostrikci až do intenzity magnetického pole $20 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$. Negativní magnetostrikci má železo při tahovém namáhání. Bod přechodu železa z pozitivní na negativní magnetostrikci se nazývá Villariho zvrát. Tento bod se mění s napětím a složením materiálu. [13]

Přerušovaná změna v magnetizaci závislá na změně magnetického pole se nazývá Barkhausenův jev. Hysterezní křivka vypadá na pohled plynule, ale při plném rozlišení jsou patrné přírůstkové změny ("skoky") magnetické indukce. Změny odpovídají zejména nevratnému pohybu Blochových stěn. Měření podle Barkhausena zkoumají účinky pouze v povrchové vrstvě (do hloubky 0,1 mm). Charakterizují pružné a trvalé deformace, popisují velikost zrn a únavu. Měří se magnetoelastický parametr (ekvivalent efektivní hodnoty napětí signálu Barkhausena). [13]

Informace o hysterezní křivce a jejích parametrech je možné získat buď přímým způsobem (tj. přímým měřením) nebo jejím nepřímým vyjádřením na indukovaném napětí v měřicí cívkce snímací jednotky. V případě přímého měření se používá stejnosměrné nebo pomalu se měnící excitační (vybuzené) magnetické pole. Těmito metodám se říká magnetické strukturoskopické metody. Při nepřímém vyjádření se používá střídavý magnetizační proud. Tyto metody se označují jako elektromagnetické, protože využívají princip elektromagnetické indukce, a jsou shodné s metodou vířivých proudů.

2.1.4.1 Podmínky pro použití magnetických strukturoskopických metod

Magnetické strukturoskopické metody jsou závislé na následujících podmínkách:

- tvar kontrolovaného objektu nesmí způsobit výrazný pokles informace magnetické veličiny
- vybraná magnetická veličina musí být v jednoznačném vztahu se sledovanou fyzikální vlastností
- lze měřit pouze feromagnetické kovy
- navržený princip strukturoskopické metody musí být dostatečně operativní vzhledem k množství kontrolovaných výrobků

2.1.4.2 Veličiny měřené v magnetické strukturoskopii

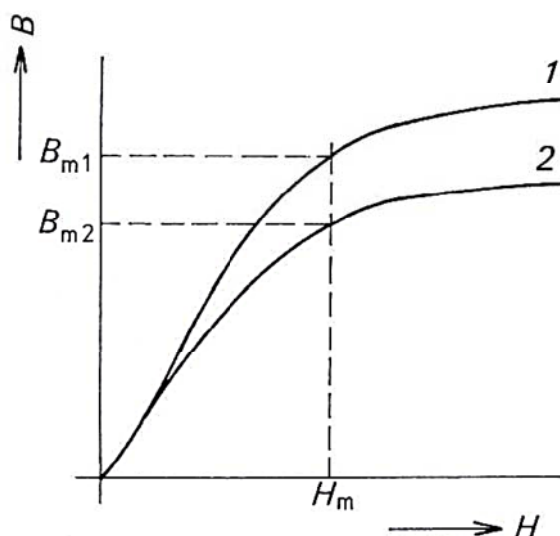
Měření hysterezních křivek feromagnetických materiálů

V současné době se hysterezní křivka (tj. závislost magnetické indukce B na intenzitě magnetického pole H) zaznamenává plynulým přemagnetováním měřeného vzorku v jednom nebo několika cyklech. Nejčastěji se používá integrační metoda měření. Magnetická indukce B se stanoví integrací napětí indukovaného v měřicí cívce, umístěné na vzorku. Intenzita magnetického pole H se odvodí buď z magnetovacího proudu, nebo se měří její tangenciální složka u povrchu vzorku tangenciální Hallovo sondou. Analogový záznam hysterezní smyčky se získá použitím souřadnicového X-Y zapisovače, u něhož se na osu X přivádí napětí úměrné intenzitě magnetického pole a na osu Y napětí úměrné magnetické indukci.

Měření permeability feromagnetických materiálů

Permeabilita se určuje měřením indukčního toku ve zkoumaném vzorku při zvolené konstantní hodnotě intenzity magnetického pole. Tímto se určí permeabilita zdánlivá, popř. efektivní, protože hodnota permeability je ovlivněna tvarem vzorku a ve střídavých polích i působením vířivých proudů.

Působením magnetického pole o intenzitě H_m vznikne v etalonu (křivka 1) magnetická indukce B_{m1} a ve zkoumaném vzorku (křivka 2) vznikne magnetická indukce B_{m2} , jimž odpovídají úměrná napětí indukovaná ve snímacích cívkách. Měří se buď srovnávacím způsobem (hodnotí se rozdíl obou napětí), nebo se měří každé napětí zvlášť a podle rozdílu odchylek se vyvozuje rozdíl ve struktuře materiálu výrobku. [4]



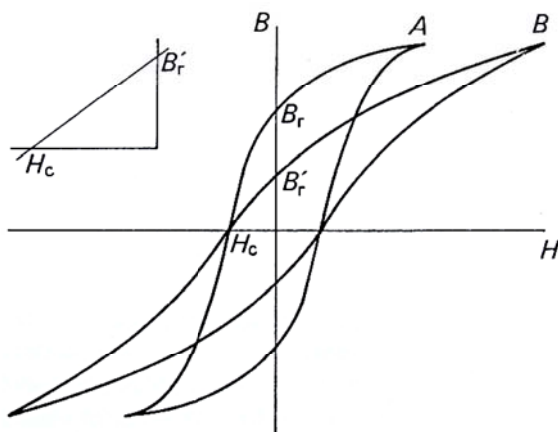
Obr. 6 Princip měření permeability využitím střídavých polí. [4]

Měření koercivity feromagnetických materiálů

Zkoumaný vzorek se vkládá do magnetovací cívky, která je napájena ze zdroje stejnosměrného elektrického proudu. Dvojice feromagnetických sond měří magnetické pole vzorku. Při měření je vzorek nejdříve zmagnetizován v jednom směru intenzity magnetického pole až do nasycení (elektrický proud je zvyšován na maximum a snižuje se zpět na nulovou hodnotu), poté se elektrický proud komutuje (obrácení směru toku) a plynulým zvyšováním intenzity magnetického pole v opačném směru se hledá stav, kdy je magnetizace vzorku nulová. Tento stav indikují feromagnetické sondy nulovým výstupním signálem. Hodnota intenzity magnetického pole cívky pak odpovídá koercivitě vzorku. [11]

Měření remanence feromagnetických materiálů

Měření remanence je metoda kontroly tepelného zpracování feromagnetických materiálů. Velká řada ocelí totiž vykazuje velmi dobrou závislost mezi tvrdostí a koercivitou, kterou je možné využít ke kontrolním účelům. Měření koercivity je však obtížné a v běžném provozu se nepoužívá. Koercivitu zkoušeného vzorku lze však určit z hodnoty zdánlivé remanence, a proto je možné za určitých podmínek nahradit měření koercivity měřením remanence, které je značně jednodušší.



Obr. 7 Měření remanence (B_r - zdánlivá remanence, H_c - koercivita) [4]

Vychází se z předpokladu, že tělesa, u nichž je poměr délky k průměru přibližný jedné, mají vysokou hodnotu demagnetizačního činitele, což vede ke snížení strmosti hysterezní křivky (obr. 7). Křivka přechází z původního tvaru A příslušného uzavřeného obvodu na tvar B. Ve druhém kvadrantu souřadného systému tvoří její větev přeponu pravoúhlého trojúhelníka, jehož odvěsny jsou zdánlivá remanence a koercivita. Je zřejmé, že se při změně koercivity mění úměrně i zdánlivá remanence, protože trojúhelníky ve druhém kvadrantu zůstávají podobné (jejich přepony jsou rovnoběžky). Za těchto podmínek lze koercivitu vyvozovat z hodnoty zdánlivé remanence. Měření remanence lze snadno provést měřením pole v okolí zkoušeného předmětu, který byl před tím zmagnetován do nasycení. [4]

2.1.4.3 Principy strukturoskopických metod

2.1.4.4 Principy se stejnosměrným či kvazistatickým magnetickým polem

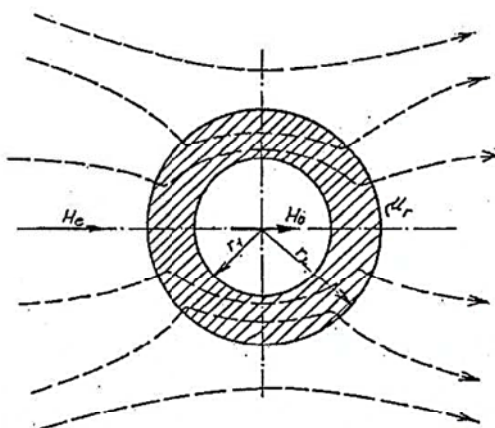
Budící magnetické pole je při těchto zkouškách časově neměnné nebo jeho měny mají velmi nízkou frekvenci (řádově desetiny Hz). Indukce vířivých proudů v materiálu je zanedbatelná až nulová. Během měření se pozorují změny vybraného magnetického parametru. Výběr kontrolního principu závisí zejména na tvaru kontrolovaného výrobku.

U výrobku s dutinou (např. kroužek ložiska) se dá využít magnetického stínění. Magnetuje-li se tento výrobek příčným stejnosměrným magnetickým polem, část

magnetických indukčních čar se vychýlí mimo dutinu do magneticky vodivějších stěn kroužku a v dutině magnetické pole poklesne. [11]

Velikost stínění závisí na permeabilitě kroužku a jeho rozměrech. Výpočet je blízký vztahu (24) odvozeného pro nekonečně dlouhou trubku.

$$\eta = \frac{H_0}{H_e} = \frac{4}{\mu_r} * \frac{1}{1 - \frac{r_1}{r_2}} \quad (24)$$

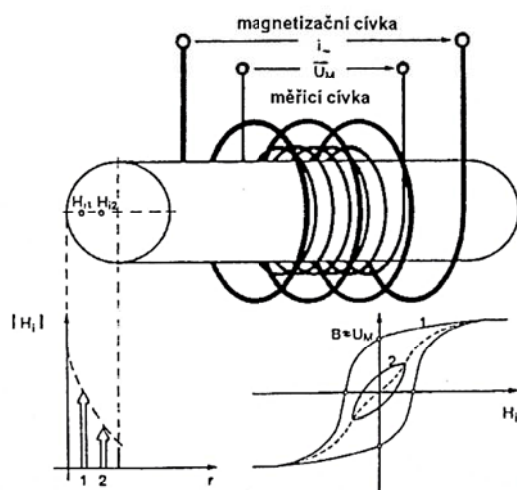


Obr. 8 Princip magnetického stínění [11]

Pro výrobky větších rozměrů (odlitky, plechy apod.) lze použít metodu bodového pólu. Přitlačením permanentního magnetu se na povrchu plechu vytvoří bodový pól a po jeho oddálení se měří tangenciální složka zbytkového pole feromagnetickými sondami. Přítomnost permanentního magnetu však působí na sondy rušivě, proto je výhodnější generovat magnetizační pole proudovým pulzem do magnetizační cívky snímače. Tvarování proudového pulzu (např. strmosti jeho náběžné hrany) způsobuje v magnetovaném povrchu vlivem vířivých proudů jinou odezvu a umožňuje diagnostikovat přítomnost a konfiguraci některých strukturních složek. Tímto způsobem lze měřit magnetickou orientaci plechů pro elektrotechniku.

2.1.4.5 Principy se střídavým magnetickým polem

Použitím střídavých magnetizačních proudů (o frekvencích v řádech desítek až tisíců Hz) je v měřicím signálu ze snímače zastoupena nejen informace daná magnetickými vlastnostmi, ale také proudy indukované v materiálu, jejichž velikost závisí mimo jiné na elektrické vodivosti kontrolovaného výrobku.



Obr. 9 Princip metody se střídavým magnetickým polem [11]

Je-li budicí vinutí napájeno relativně malým proudem sinusového průběhu, je maximální amplituda intenzity budícího pole také relativně malá. Zkušební vzorek se nachází v magneticky nenasyceném stavu a indukované napětí v měřicím vinutí má také sinusový průběh.

Jestliže se intenzita budícího pole zvýší, dojde vlivem výrazné nelinearity hysterezní smyčky v oblasti nasycení ke zkreslení indukovaného napětí. Změnou intenzity budícího pole v poměrně širokém rozsahu je možné více či méně magneticky nasycovat zkoušený materiál a tím ovlivňovat množství a velikost vyšších harmonických složek ve změřeném signálu, které jsou z hlediska kvality zkoušení důležitým parametrem. Zkoušené vlastnosti materiálu se totiž mnohdy projevují až v zastoupení vyšších harmonických složek signálu. Rozlišení dvou, svými vlastnostmi podobných, materiálů na základě pouze jednoho harmonického změřeného signálu není v řadě případů možné. Typickým příkladem pro rozlišení vyššími harmonickými složkami signálů jsou změny struktury.

Dalším zkušebním parametrem, významně ovlivňujícím měření, je zkušební frekvence, která má rozhodující vliv na rozložení magnetického pole v materiálu a na hloubku průniku.

Metody se střídavým magnetickým polem lze pro zkoušení vlastností kovových materiálů použít několika způsoby. Nejjednodušší a rychlý způsob je jednofrekvenční zkoušení. Pro danou zkušební úlohu je zvolena optimální zkušební frekvence a nastaven

optimální budicí proud. Poměrně nevýhodné u tohoto způsobu je nižší spolehlivost měření u náročnějších zkušebních úloh (přístroje starší generace).

Přístroje nové generace umožňují víceparametrické zkoušení. Podstatou je kombinace různých zkušebních frekvencí a budicích proudů tak, aby byla zvýšena spolehlivost kontroly.

Rozdělení víceparametrického zkoušení na:

- **sériové zkoušení**, při kterém dochází ke zkoušení jednotlivými frekvencemi postupně za sebou. Výhodou je možnost optimálního nastavení jednotlivých parametrů pro konkrétní zkušební úlohu (ke každé zkušební frekvenci lze nastavit velikost budicího proudu).

- **paralelní zkoušení**, kdy se zkouší všemi nastavenými frekvencemi najednou pomocí budicího proudu, jehož průběh je definován superpozicí všech nastavených frekvencí. Nelze však nastavit optimální velikost budicích proudů pro jednotlivé zkušební frekvence, protože všechny frekvence využívají pouze jeden složený budicí proud.

- **pulzní zkoušení** je variantou zkoušení, kdy pulzní signál lze rozložit na základní harmonický signál a teoreticky nekonečné množství vyšších harmonických signálů. Výhoda je vysoká spolehlivost měření. Také zde však nelze nastavit optimální velikost budicích proudů pro jednotlivé zkušební frekvence. [11]

2.1.4.6 Princip metody magnetické skvrny

Metoda se zaměřuje na lokální měření zbytkového magnetismu s balistickým (impulzním) způsobem magnetizace. U zkoušeného objektu se pomocí magnetovací cívky sondy vytvoří na povrchu objektu magnetická skvrna (bodový pól). V oceli se stejně magneticky orientované atomy soustřeďují v doménách, které tvoří subzrna v zrnech struktury. Dochází k růstu domén posunem tzv. Blochových zón a polarizací shodnou s vnějším magnetickým polem, nebo dochází ke skokové změně polarizace tzv. Barkhausenovými přeskoky. Po zániku vnějšího magnetického pole se nevrátí všechny domény do původního stavu. Vzniká remanentní polarizace J_r a zmagnetované místo má vlastní magnetické pole o intenzitě H_r (dle vztahu 25). Vratným změnám (návratu do magneticky neutrálního stavu) brání atomy feromagnetika vázané v molekulách, atomární napětí, mřížkové poruchy (dislokace), dále atomy uhlíku a cementit. Z těchto

důvodů složky struktury obsahující karbid železitý, martenzit, četné dislokace a hranice zrn vykazují vysokou hodnotu remanentní polarizace J_r . Souvislost mezi mechanickou a magnetickou tvrdostí materiálu je dána přítomností magneticky tvrdých strukturních složek, které jsou zároveň i mechanicky tvrdé (lamely perlitického cementitu, martenzit).

$$H_r = H_o - N \frac{J_r}{L} \quad (25)$$

Demagnetizační činitel N charakterizuje vnější i strukturní geometrické poměry rozhraní feromagnetika.

Na zkoušené místo výrobku působí impulzní magnetické pole o intenzitě H_r . Tvar proudového impulsu vedený do příložné silové cívky, případně přesně definovaný jejich sled, definuje tok parazitních vířivých proudů (možnost jejich využití k potlačení negativních vlivů demagnetizačního činitele N) a strukturně selektivní citlivost metody. Remanentní intenzita magnetického pole H_r v povrchové a podpovrchové vrstvě materiálu se měří nejčastěji Hallovými sondami. Příspěvek dH_{ri} jednotlivých zrn feromagnetika na výsledné hodnotě H_r závisí na stínícím účinku a jejich vzdálenosti od snímače. S hloubkou průniku magnetizačního pole klesá vliv jednotlivých zrn na H_r (v praxi je hloubka do 12 mm). V tenkých stěnách se pak energie pulzu soustředí do menšího objemu zrn.

V současné době se k měření metodou magnetického bodového pólu používá přístrojů řady DOMENA, jimiž lze měřit nejen tvrdost feromagnetických materiálů, ale i pevnost nebo hloubku prokalení (možnost měřit i na neopracovaném povrchu nebo přes povrchovou vrstvu). [1,14]

2.1.4.7 Přístroj DOMENA B3.b

Popis přístroje

DOMENA B3.b je přenosný, bateriově napájený přístroj, na jehož ovládacím panelu se nachází:

- přepínač velikosti MAGNETIZACE (M1 až M8)
- přepínač FUNKCE s funkcemi A, B, T, TT, L, LL
- čtyřmístný LED display
- klávesnice

- přepínač akumulátorového zdroje VYP, NAB, ZAP
- indikační světla PAM, DATA, x, s
- konektor PC pro připojení k počítači
- na sondě je tlačítko START



Obr. 10 Přístroj DOMENA B3.b [14]

Popis měření

Otočením přepínače akumulátorového zdroje do polohy ZAP se přístroj zapne. Přepínačem MAGNETIZACE se nastaví požadovaný stupeň magnetizace. Je nutné přístroj kalibrovat pomocí etalonu a to tak, že se přepínač FUNKCE přenastaví do polohy T. Na displeji se zobrazí hodnota 1,00. Pomocí klávesnice se zadá hodnota etalonu M_0 a potvrdí se tlačítkem D. Čelo sondy se přiloží k etalonu a stiskne se červené tlačítko START na sondě. Poté je třeba přepínač FUNKCE otočit do polohy L a provést měření etalonu opětovným stisknutím červeného tlačítka. Pokud je hodnota na displeji v toleranci $\pm 2\%$ (např. při magnetizaci M2 je hodnota kalibrace 200 A/m), přístroj je správně kalibrován a je připraven k měření.

2.2 Intermetalické fáze

Intermetalické fáze jsou sloučeniny nebo uspořádané tuhé roztoky, které jsou složeny ze dvou či více různých kovových prvků. Mají své specifické fyzikální a mechanické vlastnosti, mezi které patří například vysoká pevnost za vysokých teplot, dobrá korozní odolnost a v neposlední řadě poměrně nízká hustota. Mezi negativní vlastnost patří jejich velká křehkost. [15]

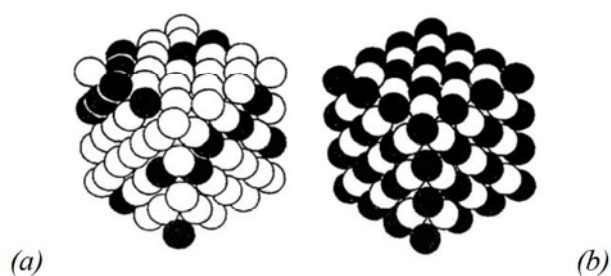
Historie intermetalik sahá až do dob starověku, kdy se například z bronzu vyráběly šperky, zrcadla a díky tvrdosti intermetalik i zbraně.

Řada intermetalik vykazuje zvláštní magnetické chování, jehož bylo využito u intermetalika typu Sendust (slitina Fe-5at.%Al-10at.%Si), používaného při výrobě magnetických hlav. Na vinutí supravodivých magnetů se používají supravodivé materiály na bázi intermetalik (např. Nb-Ti-Zr). Další skupinu intermetalik tvoří slitiny s tvarovou pamětí (např. NiTi, Cu-Zn-Al). V elektronice se jako polovodiče využívají intermetalické slitiny (např. InSb, GaAs), tvořené polokovem a lehce tavitelným kovem. Cílem výzkumu druhé poloviny 20. století byl i vývoj elektrických topných článků na bázi MoSi₂ (molybdendisilicid), které jsou využívány hlavně kvůli dobré oxidační odolnosti MoSi₂. V bývalém Československu byly první úspěchy s využitím intermetalik spojovány s výzkumem Pluhaře a Vyklického, jehož výsledkem bylo vytvoření žáruvzdorné slitiny typu Pyroferal. Pyroferal je karbidická žáruvzdorná litina legovaná 44,4 až 46,5at.% Al obsahující 3,4 až 4,0at.%C, odolná oxidaci do teplot přibližně 1500 K i v silně agresivních prostředích obsahujících sloučeniny síry (zejména oxid siřičitý). [15]

V současnosti se studují vlastnosti celé řady intermetalik. Velkou motivací pro jejich výzkum je zejména vývoj nových konstrukčních materiálů pro použití za vysokých teplot. Zájem o intermetalika vychází z fyzikálního poznatku, že vazby mezi atomy různých prvků mohou být silnější než mezi atomy stejného druhu. V důsledku těchto kohezních sil jsou u látek se strukturami, v nichž jsou nejbližšími sousedy různé atomy, vyšší všechny parametry podmíněné kohezí (pevnost, teplota tání, elastické moduly). [16]

2.2.1 Struktura intermetalik a jejich vlastnosti

Vlastnosti intermetalických slitin závisí na velmi jemné struktuře, kterou tvoří přísně uspořádané atomy (velikost elementárních buněk uspořádaných atomů v řádech nanometrů), na rozdíl od neuspořádané struktury běžných slitin (obr. 11).

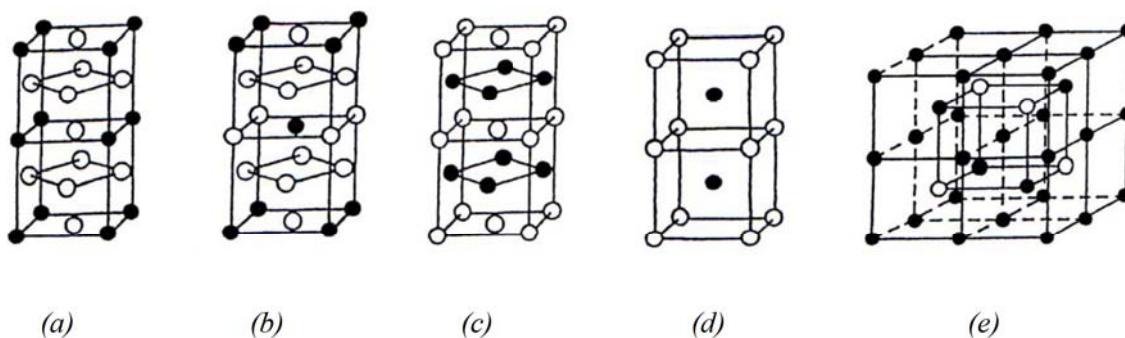


Obr. 11 Rozmístění atomů krystalické mřížky [16]

(a) neuspořádaná struktura běžných slitin

(b) pravidelně uspořádaná struktura intermetalik

Mechanické vlastnosti intermetalik souvisí s touto uspořádanou strukturou, kde je velmi silná vazba mezi nestejnými atomy. Pro pravidelnost struktury lze intermetalika považovat za modelově uspořádané tuhé roztoky. Jejich krystalová mřížka většinou vychází z krychlové plošně středěné struktury. Příklady struktur některých intermetalik jsou znázorněny na obr. 12. [17]



Obr. 12 Příklady krystalických struktur intermetalik [17]

(a) struktura $L1_2$ (např. AuCu_3 , Ni_3Al)

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

(c) struktura $L1_0$ s krychlovou prostorově středěnou mřížkou (např. CuPt , NiTi)

(d) struktura $B2$ (např. FeAl , NiAl)

(e) struktura $D0_3$ (např. Fe_3Al)

Řada intermetalik si až do teploty tání zachovává svou uspořádanou strukturu. Některá intermetalika však do neuspořádaného stavu přechází při teplotách nižších. [17]

2.2.2 Vlastnosti intermetalik

Mezi příznivé vlastnosti intermetalik patří:

- vysoká pevnost - oproti běžným slitinám pevnost s rostoucí teplotou neklesá tak rychle (intermetalika se strukturou $L1_2$ a některá se strukturou $D0_3$ a $B2$ naopak vykazují anomální růst kritického skluzového napětí s teplotou)
- výrazně nižší koeficienty autodifúze díky uspořádané struktuře (projevují se nižší rychlostí tečení, velmi obtížnou rekrytalizací a zvýšenou odolností proti korozi)
- intermetalika s vysokým obsahem Al (aluminidy) mají dobrou odolnost proti oxidaci za vysokých teplot (jsou žáruvzdorné)
- intermetalické sloučeniny tvořené kombinacemi Al, Ti a Si (aluminidy, titanidy a silicidy) mají nízkou hustotu

Doposud největší nevýhodou intermetalik je jejich křehkost při běžných teplotách, která je hlavní překážkou při uplatnění v technické praxi. V poslední době je výzkum zaměřen na mechanismus křehkého lomu. Příčiny malé tvárnosti intermetalik mohou být:

- malá pevnost hranic zrn
- nedostatečné množství skluzových systémů
- vysoké kritické skluzové napětí v důsledku obtíží při vzniku a pohybu dislokací
- malá štěpná pevnost nebo nízká povrchová energie
- vysoký koeficient zpevnění, v jehož důsledku dochází ke křehkému šíření čela trhliny

V některých případech je křehkost důsledkem silného odporu vůči pohybu dislokací, v dalších případech však jsou dislokace relativně pohyblivé a křehkost je hlavně důsledkem nižší symetrie nebo jsou hranice zrn tak slabé, že nezabrání šíření trhliny do lomu. Zvýšení soudržnosti hranic lze dosáhnout např. výběrem vhodných slitinových prvků (z hlediska elektronové struktury), legováním substitučních příměsí či mikrolegováním intersticiálních příměsí. [16]

2.2.3 Aluminidy železa

Nejzkoumanější intermetalické fáze jsou aluminidy železa, jejichž přednostmi jsou především dobré fyzikální vlastnosti. Největší problém při zpracování je však nízká houževnatost při pokojové teplotě. Konstrukční využití je omezeno poklesem pevnosti při teplotách nad 870 K. Značný vliv na mechanické vlastnosti těchto materiálů mají také

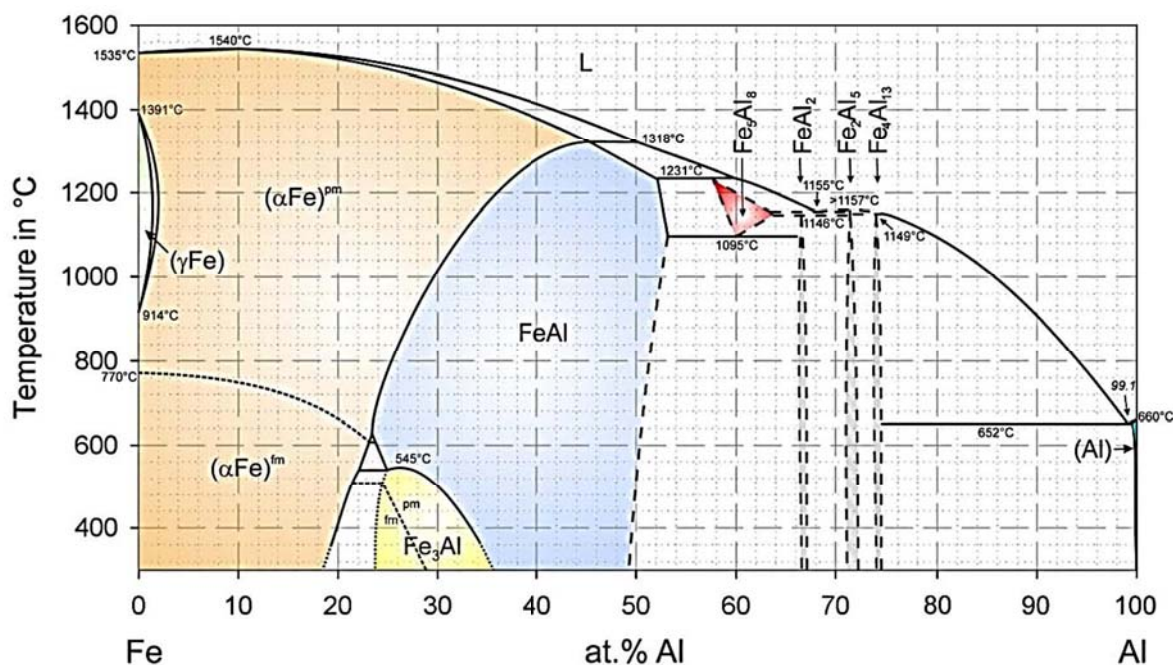
složení, velikost zrna nebo zakalených vakancí. Pomocí vhodného legování a řízené mikrostruktury mohou být mechanické vlastnosti aluminidů značně zlepšeny.

Slitiny FeAl a Fe_3Al jsou výhodné především pro poměrně snadnou výrobu, nízké náklady výchozích surovin pro výrobu, dále jsou odolné vůči korozi i v agresivních prostředích.

2.2.4 Struktura a vlastnosti aluminidů železa

Ve fázovém diagramu binárního systému Fe-Al (obr. 18) se nachází několik intermetalických fází. Z hlediska výzkumu a technické využitelnosti slitin jsou zajímavé fáze FeAl a Fe_3Al .

Slitina Fe-Al patří při pokojové teplotě a do cca 20 at.% Al do oblasti α -fáze nebo α -fáze + D0_3 . Slitina se stává jednofázovou s D0_3 strukturou přibližně při 23 at.% Al, kdy α -fáze vymizí. K přeměně struktury D0_3 na B2 strukturu dochází přibližně při 37 at.% Al a struktura B2 je cca do 50 at.% Al. Při následném zvyšování množství Al vzniknou další intermetalické sloučeniny jako FeAl_2 , Fe_2Al_5 a $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$. [15]



Obr. 13 Fázový diagram systému Fe-Al [18]

Významným faktorem ovlivňujícím nejen strukturu aluminidů je teplota. V oblasti α -fáze má teplota vliv na magnetické vlastnosti slitin. Čisté železo je pod Curieovou

teplotou (990 K) feromagnetické a nad touto teplotou přechází do paramagnetického stavu. S rostoucím obsahem hliníku Curieova teplota klesá. V oblasti s DO_3 strukturou mezi 23 až 25 at.% Al nad kritickou teplotou 820 až 850 K se současně vyskytují struktury α -fáze a B2. S dalším růstem teploty se struktura mění na nedokonale uspořádanou B2 strukturu. Ve stejné oblasti je Curieova teplota přibližně 770 K a s rostoucím obsahem Al strmě klesá. [15]

Nízká tvárnost, lomová houževnatost při pokojové teplotě a prudký pokles pevnosti nad teplotou 870 K omezují konstrukční využití binárních aluminidů železa. Se zvyšujícím se obsahem Al vykazují aluminidy železa lepší korozní odolnost, ale klesá obrobitelnost, tvárnost a mez kluzu při pokojové teplotě. S rostoucím obsahem Al přibližně do 30 at.% Al prudce klesá mez kluzu, následuje mírný nárůst cca do 40 at.% Al a poté opět mez kluzu poklesne.

Tyto nevhodné vlastnosti byly přisuzovány slabým vazebným silám v rámci krystalografických rovin. Bylo však prokázáno, že aluminidy železa bez přítomnosti vodíku jsou poměrně tvárné. Jejich nízká lomová houževnatost a špatná tvárnost při pokojové teplotě mohou být tedy způsobeny přítomností vodíku v materiálu. Křehkost při pokojové teplotě lze minimalizovat vhodným legováním nebo zmenšením velikosti zrna. [15]

2.2.5 Uspořádanost struktury

Intermetalika mají dva typy uspořádání atomů v krystalové mřížce - na krátkou vzdálenost a na dlouhou vzdálenost.

Při **uspořádání na krátkou vzdálenost** zůstává elementární buňka struktury shodná s elementární buňkou struktury neuspořádaného tuhého roztoku. Toto uspořádání je záležitostí lokální korelace obsazení krystalových poloh a jejich nejbližšího okolí. Obsazení dané krystalové polohy daným typem atomu není náhodný jev, ale závisí na obsazení poloh v nejbližším okolí. O uspořádání na krátkou vzdálenost v neuspořádaném tuhém roztoku se strukturou krychlovou prostorově středěnou jde tehdy, jsou-li atomy Al v krychlové prostorově středěné mřížce přednostně obklopovány v osmi nejbližších polohách atomy Fe, avšak nevede to k tvorbě dvou různě obsazených podmřížek (protože tato korelace je pouze lokální).

Ke vzniku **uspořádání na dlouhou vzdálenost** se strukturou B2 dochází tehdy, projeví-li se korelace obsazení poloh v makroskopické oblasti vznikem dvou různě obsazených podmřížek v původní krychlové prostorově středěné struktuře. Stupeň tohoto uspořádání je charakterizován tzv. parametrem uspořádání na dlouhou vzdálenost a je funkcí složení a teploty. Hodnoty parametru uspořádání nabývají hodnot v rozmezí od 0 do 1. Zanikne-li uspořádání na dlouhou vzdálenost, má parametr uspořádání nulovou hodnotu. Hodnoty 1 lze dosáhnout pouze při nulové termodynamické teplotě a při stechiometrickém složení. Při růstu termodynamické teploty i při růstu odchylky od ideální stechiometrie se stupeň uspořádání snižuje. Krystal uspořádaný na dlouhou vzdálenost se obecně skládá z makroskopických oblastí tzv. antifázových domén, které jsou vzájemně oddělené tzv. antifázovými hranicemi. Nukleací a růstem pod kritickou teplotou přechodu uspořádanost - neuspořádanost domény vznikají. Antifázové hranice jsou místa, kde došlo ke kontaktu rostoucích domén a strukturní uspořádání v nich zůstává porušeno. [15]

2.2.6 Vliv vakancí na aluminidy železa

Žiháním při teplotě 670 K po dobu 120 h se odstraní velké množství vakancí ze struktury (dislokace se vzájemně eliminují a materiál měkne), tudíž lze zkoumat vlastnosti materiálu bez výraznějšího ovlivnění vakancemi, jako jsou například tvrdost, pevnost, tvárnost nebo elektrické vlastnosti, které vakance ovlivňují nejvíce. S rostoucím množstvím vakancí například klesá tvárnost nebo vzrůstá mikrotvrdost FeAl slitin. [15]

2.2.7 Vliv legur

Velké množství studií zabývajících se vlivem legur na aluminidy železa, se zabývá mechanickým nebo chemickým vlivem legur.

2.2.7.1 Vliv legur na mechanické vlastnosti

Slitiny FeAl mají oproti výhodám, jako jsou např. odolnost proti opotřebení, nízká hustota či dobrá oxidační a korozní odolnost, i jisté nevýhody. Například relativně nízkou houževnatost při vysokých teplotách, nízkou creepovou odolnost nebo tažnost při pokojové teplotě. Vhodnými modifikacemi (legováním) lze creepovou odolnost i houževnatost za vysokých teplot značně zvýšit přítomností karbidů, boridů, precipitátů Lavesových fází nebo disperzí oxidů. Zpevňující vliv ternárních příměsí roste s rozdílem atomového čísla Fe a přechodovým kovem. Rozhodující je však nízká tažnost při pokojové teplotě

za přítomnosti vzdušné vlhkosti. Důvodem je vodíková křehkost, proto se slitiny FeAl legují vhodnými prvky, které zlepšují jejich mechanické, elektrické i chemické vlastnosti.

Legující prvky, jako například Cu, C, B, Ta, Nb a Zr, působí příznivě tvorbou precipitátů. Prvky Cr, Mn, Ti, Ni, Si, Mo a V mají příznivý vliv po rozpuštění v tuhém roztoku. Tyto prvky zvyšují creepovou odolnost a vysokoteplotní pevnost a zároveň posouvají přechodovou teplotu mezi D0₃ a B2. Vodíkovou křehkost zároveň snižují např. Cr, W, Si, Ti, Zr, Ni, Nb, Mo, V a Ta. [15]

2.2.7.2 Vliv legur na elektrické vlastnosti

Legující prvek v základním materiálu se buď zabuduje do základní mřížky matrice a díky odlišným vlastnostem atomové stavby narušuje silové vazby mezi atomy a představuje rozptylové centrum pro vodivostní elektrony, nebo se legura podílí na tvorbě precipitátů. Je-li množství precipitované fáze v desetinách až jednotkách procent, nemá zásadní vliv na elektrický odpor. V případě, že je v materiálu precipitované fáze větší množství, kdy tvoří souvislou množinu (schopnou vést elektrický proud „paralelně“ s maticí), má na elektrický odpor výrazný vliv. Legura rozpuštěná v základním materiálu ovlivňuje například stupeň uspořádání, hustotu elektronových stavů, kmity mříže a další parametry. Má tedy největší vliv na teplotně závislou část elektrického odporu. [15]

2.2.7.3 Bór

Tab. 1 Vybrané fyzikálně-chemické vlastnosti bóru

Fyzikálně-chemická vlastnost	Hodnota	Jednotka
Atomové číslo	5	[-]
Relativní atomová hmotnost	10,811	[g/mol]
Teplota tání	2349	[K]
Teplota varu	4200	[K]
Hustota	2340	[kg/m ³]
Tvrdost	9,5	[Mohsova stupnice]
Typ krystalové mřížky	A10	[-]

Bór segreguje na hranicích zrn, tím zvyšuje mez kluzu v Fe-Al slitinách. Ztěžuje skluzový mechanismus při přechodu přes hranice zrn tak, že dopuje nenasycené vazby po hranicích zrn svými elektrony. Zpevňuje tak hranice zrn.

U slitin FeAl s B2 strukturou má bór dva mechanismy segregace na hranicích zrn. První nerovnovážný mechanismus je nezávislý na teplotě žíhání a vyznačuje se velmi rychlou kinetikou. Výsledkem je interakce mezi atomy bóru a vakancemi vyskytujícími se na hranicích zrn. Druhý rovnovážný mechanismus se vyskytuje u nízkoteplotně žíhaných materiálů. Spočívá ve vzájemné interakci jednotlivých atomů bóru. Díky těmto dvěma mechanismům není třeba žádné speciální tepelné zpracování pro zpevnění hranic zrn. Bór zvětšuje mřížkový parametr FeAl a způsobuje tak napětí v mřížce. Vliv bóru je závislý na koncentraci Al a přítomnosti vakancí. Množství od 0,05 do 0,2 at.% bóru zvyšuje tažnost potlačením interkrystalického lomu. [15]

2.2.7.4 Uhlík

Tab. 2 Vybrané fyzikálně-chemické vlastnosti uhlíku

Fyzikálně-chemická vlastnost	Hodnota	Jednotka
Atomové číslo	6	[-]
Relativní atomová hmotnost	12,0107	[g/mol]
Teplota tání	3915	[K]
Teplota varu	4600	[K]
Hustota	grafit 2267 diamant 3513	[kg/m ³]
Tvrdost	grafit 0,5 diamant 10	[Mohsova stupnice]
Typ krystalové mřížky	grafit A9 diamant A4	[-]

V aluminidech železa se uhlík může vyskytovat v několika formách. Při množství do 0,2 at.% uhlík tvoří κ -fázi Fe_3AlC_x ($x \sim 0,5$). Jestliže je obsah uhlíku vyšší, začne se vylučovat i ve formě grafitu. Při pokojové teplotě i za vyšších teplot má uhlík při množství 2 až 4 at.% ve slitinách Fe₃Al vliv na výrazné zvýšení pevnosti, creepové odolnosti, obrobitelnosti a odolnosti proti křehnutí vlivem prostředí. Už malé množství uhlíku zvyšuje odolnost proti křehnutí (uhlík funguje jako vodíková past). [15]

2.2.7.5 Titan

Titan jako legura má vliv na mikrotvrdost v rovnovážném stavu. S rostoucím obsahem Ti se zvyšuje i teplota přechodu mezi fázemi D0₃ a B2. Atomy Ti substituují ve struktuře přednostně atomy Fe (až 95 % atomů Ti obsadí místa atomů Fe). Na elektrický odpor slitin (Fe_{1-x}Ti_x)₃Al má titan značný vliv. Pokud je hodnota x od 0 do 0,15, zvýší se elektrický odpor na přibližně 2,5-násobnou hodnotu, než u binární slitiny se shodným obsahem Al. Při následném zvyšování obsahu Ti ve slitině začne elektrický odpor klesat, až při poměru x = 0,33 (Fe₂TiAl) dosáhne hodnoty blízké binární slitině. [15]

Tab. 3 Vybrané fyzikálně-chemické vlastnosti titanu

Fyzikálně-chemická vlastnost	Hodnota	Jednotka
Atomové číslo	22	[-]
Relativní atomová hmotnost	47,867	[g/mol]
Teplota tání	1941	[K]
Teplota varu	3560	[K]
Hustota	4506	[kg/m ³]
Tvrdost	6	[Mohsova stupnice]
Typ krystalové mřížky	A3	[-]

2.2.7.6 Chróm

Tab. 4 Vybrané fyzikálně-chemické vlastnosti chrómu

Fyzikálně-chemická vlastnost	Hodnota	Jednotka
Atomové číslo	24	[-]
Relativní atomová hmotnost	51,9961	[g/mol]
Teplota tání	2180	[K]
Teplota varu	2944	[K]
Hustota	7150	[kg/m ³]
Tvrdost	8,5	[Mohsova stupnice]
Typ krystalové mřížky	A2	[-]

Atomy Cr nahrazují místa v podmřížce Fe i Al v obou uspořádaných strukturách D0₃ i B2. Ve struktuře B2 atomy Cr obsazují přednostně místa pro Al atomy a v uspořádání D0₃ atomy Cr obsazují místa v podmřížce Fe. Atomy Cr vyplňují vakance a tím zvyšují stupeň uspořádání fází. Chróm tedy zpevňuje slitiny Fe-Al.

S rostoucím množstvím Cr ve slitině (s výjimkou 6 at.%Cr, kde narůstá tažnost až na 10 %) se mírně snižuje mez kluzu při pokojové teplotě. Cr způsobuje změnu mechanismu porušení z čistě transkrystalického na 50 % transkrystalického a 50 % interkrystalického. Chróm zvyšuje korozní odolnost slitiny při teplotě 1170 K. [15]

2.2.7.7 Zirkonium

Tab. 5 Vybrané fyzikálně-chemické vlastnosti zirkonia

Fyzikálně-chemická vlastnost	Hodnota	Jednotka
Atomové číslo	40	[-]
Relativní atomová hmotnost	91,224	[g/mol]
Teplota tání	2128	[K]
Teplota varu	4682	[K]
Hustota	6506	[kg/m ³]
Tvrdost	5	[Mohsova stupnice]
Typ krystalové mřížky	A3	[-]

Zirkonium má velmi nízkou rozpustnost v binárních slitinách Fe-Al. Ze studií vyplývá, že množství 0,05 at.% Zr zvyšuje pevnost a houževnatost. Při růstu obsahu Zr se naopak tyto vlastnosti snižují, avšak tažnost se zlepšuje. Maximum tažnosti slitiny při pokojové teplotě i za zvýšených teplot je v rozmezí 0,1 at.% až 0,2 at.% Zr. Množství od 0,4 at.% Zr výrazněji zvyšuje mez kluzu. Zirkonium výrazně zvyšuje i creepové vlastnosti, zabráňuje rekrytalizaci a posiluje hranice zrn.

V neuspořádané slitině Fe-Al s nízkým obsahem Al zvyšuje již malé množství Zr adhezi oxidů k povrchu materiálu. Zirkonium zvyšuje odolnost proti vysokoteplotní oxidaci. [15]

2.2.8 Způsoby zpracování aluminidů železa

Za vyšších teplot je tvárnost slitin aluminidů železa velmi dobrá, proto je možné tyto materiály zpracovávat běžnými technologickými postupy za tepla. Aluminidy železa mají poměrně dobré slévárenské vlastnosti, obzvláště pak zabíhavost, která je lepší, než u šedé litiny. Jako nejvýhodnější způsob zpracování se proto jeví technologie odlévání. Aluminidy vykazují velmi dobrou kvalitu povrchu odlitků (předpoklad pro přesné lití). Naopak smršťování při tuhnutí je výraznější, než u šedé litiny, což má za následek například větší pravděpodobnost vzniku staženin. Další komplikací při odlévání těchto materiálů může být jejich menší odolnost vůči tepelným rázům (velkým a rychlým změnám teplot). Tavba aluminidů je však spojena s řadou problémů:

- tavicí kelímek je nutné volit s ohledem na minimální znečištění taveniny materiály, z kterých je kelímek vyroben
- vlhkost v blízkosti tavicího kelímku nebo použití vlhké navážky může způsobit vznik velkého množství vodíku, díky kterému během tuhnutí vznikají dutiny v materiálu
- slitina v základním složení Fe_3Al má sklon k tvorbě velkých zrn při lití ingotů a lití do písku, což má za následek nepříznivý vliv na tvárnost slitin Fe_3Al (znemožnění zpracování odlitku za studena)
- vznik Fe_3Al ze základních prvků železa a hliníku doprovází exotermická reakce, což při konvenčním roztavení železa a přidáním hliníku znamená zvýšení teploty taveniny o několik stovek stupňů (následkem toho tavenina oxiduje)

Slitiny typu FeAl je možné tavit na vzduchu v indukčních pecích, ve vakuu v obloukových pecích nebo v pecích s ochrannou atmosférou inertního plynu. Použitím zcela suché navážky a probubláváním taveniny argonem lze odstranit pórovitost slitin tavených na vzduchu. Oxidaci taveniny v důsledku exotermické reakce lze omezit technologií, která využívá tepla tvořícího se při vzniku Fe_3Al a umožňuje dosáhnout lící teploty s minimální oxidací.

Aluminidy železa se však dají zpracovávat i tvářením za tepla a v poslední době se stále více využívá i metody práškové metalurgie. [17]

2.2.9 Využití aluminidů železa

Pevnost, odpovídající tažnost, velmi dobrá odolnost proti oxidaci a síře i za vysokých teplot, nízká hustota, dobrá zpracovatelnost a v neposlední řadě nízké výrobní

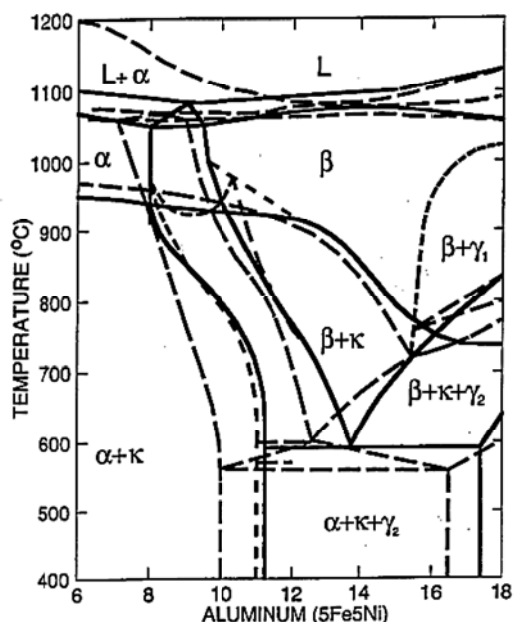
náklady, to jsou vlastnosti aluminidů železa, které umožňují jejich využít pro konkrétní náročné aplikace, jako jsou například:

- využití drátů pro topná tělesa v domácích elektro spotřebičích, pecích i sušičkách
- příslušenství pecí - retorty, topné tyče apod. (využití výborné oxidační odolnosti)
- slinované pórovité (plyno - kovové) filtry v zařízeních pro zplyňování uhlí (filtry jsou využívány i při dalších procesech, kde plyn obsahuje vysoké množství síry)
- katalytické vrstvy konvertorů (využívá se opět výborné oxidační odolnosti aluminidů)
- stínění trubek proti oxidaci v elektrárnách
- výfukové systémy a jiné součásti spalovacích motorů
- regenerátorové desky (výměník tepla v plynové turbíně)
- součásti pro aplikace v roztavených solích a nádoby pro chemickou výrobu (aluminidy se snášejí s okysličujícími a uhlíkatými solemi) [17]

Prvním krokem ke komercializaci byla příprava velké tavby těchto slitin některými průmyslovými společnostmi. Dalším úspěšným krokem ke komercializaci je získání dostatečného množství výsledků zkoušek (databanky vlastností) u jednotlivých materiálů, které se projevují jako slibné pro konkrétní konstrukční využití. [16]

2.3 Slitiny mědi

Jedním z představitelů slitin mědi s vysokou pevností (i za zvýšených teplot) je hliníkový bronz CuAl10Ni5Fe4, jehož pevnost dosahuje hodnot přes 800 MPa. Odolává korozi, kyselinám a louhům, vysokým teplotám i opotřebení.



Obr. 14 Řez rovnovážným fázovým diagramem Cu-Al-5Ni-5Fe [19]

Struktura slitiny je dvoufázová. Tvoří ji málo tvárná α fáze a vysokoteplotní β fáze, která má výbornou tvárnost za tepla. Doporučené teploty pro tváření jsou 700 °C až 900 °C. Slitina má tedy omezenou tvárnost za studena (velmi rychle zpevňuje), ale výbornou tvárnost za tepla (v oblasti $\alpha + \beta$ fáze). [19]

V závislosti na rychlosti ochlazování a následným tepelným zpracováním může z β fáze vzniknout martenzitickou transformací nestabilní β' fáze, která je velmi tvrdá a křehká, zvyšuje pevnost slitiny, ale snižuje její tažnost. Vedle těchto fází se ve struktuře vyskytují rovněž fáze κ (obsahující kromě Cu a Al také Fe a Ni) a fáze γ_2 , které zvyšují pevnost a snižují tažnost materiálu.

Podle rovnovážného fázového diagramu (obr. 14) probíhá při teplotě 575 °C eutektoidní přeměna, při které z fáze β (popř. β') vzniká eutektoid $\alpha + \kappa + \gamma_2$. Struktura je tedy tvořena fází α a eutektoidem $\alpha + \kappa + \gamma_2$. [19]

Fáze κ jsou rozděleny na 4 druhy - κ_I , κ_{II} , κ_{III} a κ_{IV} . Fáze κ_I jsou velké částice dendritického tvaru, které jsou bohaté na Fe a jsou tvořeny fází Fe_3Al s obsahem Cu a Ni. Fáze κ_{II} jsou menší, globulárního tvaru, jejichž složení je totožné s fází κ_I . Fáze κ_{III} (precipitáty) mají destičkovitý (lamelární) tvar a jsou tvořeny na základě NiAl. Fáze κ_{IV} jsou ve tvaru drobných precipitátů a jsou také tvořeny na základě Fe_3Al . [19]

2.4 Slitiny kobaltu

Do skupiny slitin kobaltu patří například slitiny nazývané **stellite**.

Tab. 6 Složení a fyzikální vlastnosti Stellite 12

Co	Cr	W	C	Ostatní prvky	Tvrdost	Hustota	Teplota tání
základní materiál	27-32 [%]	7,5-9,5 [%]	1,4-1,7 [%] (hardfacings) 1,7-2,0 [%] (castings)	Ni, Fe, Si, Mn	45-51 HRC 435-590 HV	8530 [kg/m ³]	1473-1638 [K]

Stellite jsou slitiny na bázi kobaltu, velmi odolné proti mechanickému opotřebení, otěru a korozi. Tyto své vlastnosti si zachovávají i za vysokých teplot. Jejich výjimečná odolnost proti opotřebení je způsobena výbornými vlastnostmi tvrdé karbidové fáze rozptýlené v CoCr matici slitiny.

Stellite 12 obsahuje vyšší množství tvrdých, křehkých karbidů, než Stellite 6. Vyšší obsah wolframu zajišťuje lepší vlastnosti až do teplot kolem 700 °C.

Stellite 12 se používá pro řezné nástroje, které musejí být odolné proti otěru a korozi a to i za vyšších teplot (například průmyslové nože pro řezání koberců, papíru, plastů a syntetických vláken nebo břity pil ve dřevozpracujícím průmyslu), dále se používají pro výrobu ložiskových pouzder, přitlačných kladek v kovozpracujícím průmyslu či pro ostří listu rotoru. Díky odolnosti proti kavitaci je slitina vhodná i pro výrobu lopatek čerpadel. Obdobně jako nerezové oceli i Stellite 12 je při vystavení mořské vodě či roztokům chloridu porušován zejména důlkovou korozí, nikoliv hromadným úbytkem materiálu. [20]

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 Zkušební vzorky

Pro měření byly využity vzorky aluminidů železa, jejichž chem. složení je uvedeno v tab. 7. Dalšími měřenými materiály byly hliníkové bronzy (chem. složení viz tab. 20) a kobaltové slitiny Stellite 6 (chemické složení viz tab. 24) a Stellite 12 (chemické složení v tab. 25).

Fotografie zkušebních vzorků aluminidů



Obr. 15 FeAlCr1 (10)

Obr. 16 FeAlCr1 (12)

Obr. 17 FeAlCr2

Obr. 18 FeAlCr3



Obr. 19 FeAlTi (9)

Obr. 20 FeAlTi (11)

Obr. 21 FeAlC

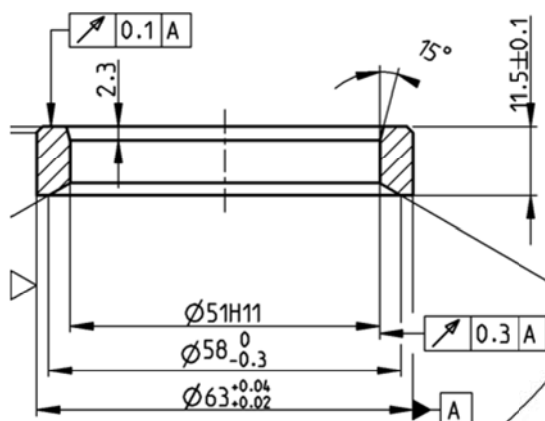
Obr. 22 FeAl (2)



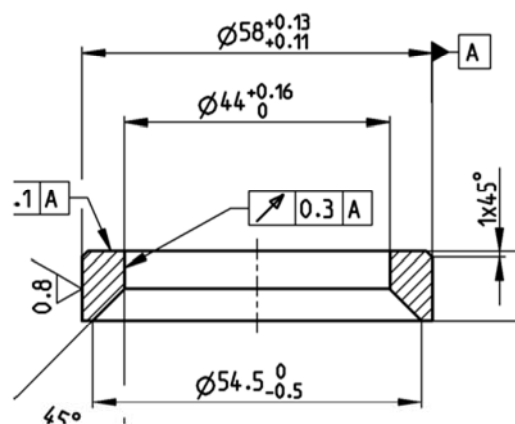
Obr. 23 FeAl (3)

Obr. 24 FeAl (4)

Technická dokumentace sacích (Stellit 6) a výfukových sedel (Stellit 12)



Obr. 25 Sací sedlo - obrobek



Obr. 26 Výfukové sedlo - obrobek

3.1.1 Příprava vzorků pro měření

Pro magnetické a ultrazvukové testování byly vzorky aluminidů nařezány na diamantovém kotouči, kde většina vzorků je podobná tvaru kváдру. Podmínkou je planparalelnost dvou protilehlých stěn vzorku. Al bronzy byly nařezány z tyče $\varnothing 31,2$ mm na válce o tloušťkách od 7,8 mm do 11,25 mm diamantovým kotoučem a následně bylo provedeno několik tepelných zpracování (popsáno v příslušné kapitole), která provedla firma COMTES FHT a.s., Dobřany. Pro měření kobaltových slitin byly poskytnuty firmou Tedom a.s., Jablonec nad Nisou odlitky sacích a výfukových sedel tvaru válcového prstence ze Stellitu 6 a Stellitu 12.

3.1.2 Analýza struktury materiálů

Vzorky aluminidů zalité do dentakrylu byly broušeny na brusných papírech SiC o hrubosti zrna P400 až P2500 a mechanicky leštěny suspenzí. Následovalo leptání v oxidačně-leštící suspenzi OP-S od firmy Struers. Takto připravené metalografické výbrusy byly za pomoci optické mikroskopie podrobeny analýze jednotlivých fází. Pro optickou analýzu byl použit mikroskop Nikon s interferenčním kontrastem.

Fotografie struktur Al bronzu byly poskytnuty firmou COMTES FHT a.s., Dobřany a fotografie struktur Stellitu 6 a Stellitu 12 dodala firma Tedom a.s., Jablonec nad Nisou.

3.2 Použitá měřicí technika

Pro měření magnetizace aluminidů a slitiny CuAl10Ni5Fe4 byl použit přístroj DOMENA B3.b s nastavitelným stupněm magnetizace. Sací (Stellit 6) a výfuková sedla (Stellit 12) se měřila předchůdcem tohoto přístroje, a to DOMENOU B2 s pevně nastavenou magnetizací M3.

Ultrazvukové tloušťky vzorků byly měřeny přístroji:

měření aluminidů:

- ultrazvukový tloušťkoměr DiO570, sonda s frekvencí 2 MHz, ø10 mm PQ2/10-2C, sonda s frekvencí 2 MHz, ø20 mm SEB 2
- ultrazvukový tloušťkoměr 4 LDL 10, sonda s frekvencí 4 MHz, ø10 mm 545 LC
- ultrazvukový tloušťkoměr DiO570, sonda s frekvencí 10 MHz, ø6 mm SM1 344

měření slitiny CuAl10Ni5Fe4:

- ultrazvukový tloušťkoměr DiO570, sonda s frekvencí 2 MHz, ø10 mm PQ2/10-2C
- ultrazvukový tloušťkoměr DiO570, sonda s frekvencí 10 MHz, ø6 mm SM1 344

měření sacích (Stellit 6) a výfukových sedel (Stellit 12)

- ultrazvukový tloušťkoměr 4LDL10, sonda s frekvencí 4 MHz, ø10 mm 545 LC



Obr. 27 Ultrazvukový tloušťkoměr DiO570



Obr. 28 Sonda 2MHz ø10 mm PQ2/10-2C



Obr. 29 Sonda 2 MHz ø20 mm SEB 2



Obr.30 Sonda 10 MHz ø6 mm SM1 344



Obr. 31 Ultrazvukový tloušťkoměr 4 LDL 10

3.3 Popis měření

3.3.1 Měření magnetizace vzorků

Před každým měřením magnetizace vzorku je nutné přístroj kalibrovat pomocí etalonu (kalibrace popsána v teoretické části v kapitole 2.1.4.7).

Aluminidy železa a slitina CuAl10Ni5Fe4 byly přístrojem DOMENA B3.b měřeny při slabé a silné magnetizaci (M2 a M8) s malým a velkým průnikem magnetického pole. Místa měření aluminidů jsou označeny na fotografiích vzorků v kapitole 3.1 (obr. 1 až obr. 10). Magnetizace slitiny CuAl10Ni5Fe4 byla měřena u různě tepelně zpracovaných vzorků (viz tab. 21) nařezaných z tyče $\varnothing$ 31,2 mm.

Každé měření bylo na stejném místě opakováno. Druhé zmagnetizování vykazuje těsnější vztah při měření tvrdosti ocelí a litin (po prvním zmagnetizování se materiál magneticky „vyčistí“). Rozdíl dvou naměřených hodnot při stejné magnetizaci, např. ΔM ($1M2 - 2M2$), dává představu o tom, jak je feromagnetikum v materiálu uspořádáno, zda tvoří homogenní matici nebo je rozptýleno v jednotlivých bodech (precipitáty atd.). Hovoří o velikosti napjatosti v krystalické mřížce (analogie s ocelí). Tato hodnota ΔM je u slitin Fe strukturně citlivá (rozliší perlit od martenzitu). Pokud rozdíl dvou naměřených hodnot při stejné magnetizaci je blízký nule (rozdíl je přibližně do $\pm 2\%$ absolutní hodnoty magnetizace), feromagnetická složka netvoří matici, ale je volně rozptýlena v paramagnetické matici. [14]

Hodnota magnetizace M souvisí s množstvím přemagnetizovaných domén (magnetizace M2 přemagnetizuje méně domén do menší hloubky materiálu a magnetizace M8 přemagnetizuje více domén do větší hloubky materiálu).

Pod pojmem magnetizace M se rozumí intenzita zbytkového magnetického pole na povrchu vzorku po slabém nebo silném zmagnetování (M2, M3 a M8) cívkou sondy přístroje DOMENA.

Magnetizace M také závisí na vnitřní (povrchové trhliny) a vnější geometrii vzorku. Pokud je například vzorek tenčí než 10 mm a obsahuje trhliny, hodnota M roste (hodnoty M možno srovnávat u geometricky malých vzorků – tloušťka vzorku menší než 10 mm, měřená plocha menší než půdorys sondy). Tento poznatek vychází z výzkumu magnetické strukturoskopie austenitických ventilových ocelí [21].

Magnetizace sacích a výfukových sedel v litém stavu byla měřena ve firmě Tedom a.s., Jablonec nad Nisou, přístrojem DOMENA 2B s pevně nastavenou magnetizací M3 (předchůdce DOMENY B3.b). Vzorky sacích sedel ze Stellitu 6 (označeny čísly 1 až 8) a výfukových sedel ze Stellitu 12 (rovněž označeny čísly 1 až 8) byly měřeny po obvodu ve třech polohách (po 120°). Poloha měření 0° odpovídá místu vtoku. Výfukové sedlo č. 9 ze Stellitu 12 bylo měřeno podrobně v osmi místech obvodu (po 45°), kde místo vtoku odpovídá poloze 0° (360°).

3.3.2 Měření ultrazvukové tloušťky vzorků

Před měřením ultrazvukové tloušťky vzorků byly ultrazvukové tloušťkoměry kalibrovány podle ocelových kalibračních měrek, kde hodnota rychlosti zvuku v měrce je $v_L = 5920$ m/s. K přenosu ultrazvukového vlnění mezi čelem sondy a povrchem vzorku musela být navázána tzv. akustická vazba kontaktním kapalným médiem (v tomto případě vazelínou).

Vzorky aluminidů železa byly měřeny ultrazvukovými tloušťkoměry DiO570 2 MHz (průměr sondy 10 mm a 20 mm), DiO570 4 MHz (průměr sondy 10 mm) a DiO570 10 MHz (průměr sondy 6 mm) ve stejných místech, jako byla měřena magnetizace vzorků.

Ultrazvukové tloušťky vzorků slitiny CuAl0Ni5Fe4 byly měřeny na plochách podstav válců ultrazvukovými tloušťkoměry DiO570 2 MHz (průměr sondy 10 mm) a DiO570 10 MHz (průměr sondy 6 mm).

Pro identifikaci materiálů ze skupiny šesti sedel (viz kapitola 3.6.6) pomocí ultrazvukového tloušťkoměru DiO570 4 MHz (průměr sondy 10 mm) byla ultrazvuková tloušťka měřena přes šířku sedla $L = 9$ mm.

3.4 Aluminidy železa

Vzorky aluminidů železa byly voleny tak, aby obsáhly jak neuspořádaný stav, tak stav uspořádaný, tedy FeAl i Fe₃Al. Vlastnosti legur v materiálu jsou uvedeny v tab. 1 až 5.

Tab. 7 Chemické složení vzorků aluminidů

Označení vzorku	Prvek						
	Al [at.%]	Zr [at.%]	Cr [at.%]	Ti [at.%]	C [at.%]	B [at.%]	Fe [at.%]
FeAlCr1 (V)	19,904	0,493	4,151	0,074	0,062	0,277	75,039
FeAlCr2 (L)	26,479	0,268	3,578		0,479		69,196
FeAlCr3 (V)	27,843	0,488	3,521	0,425	0,028	1,094	66,601
FeAlTi (V)	29,307			2,384	0,039		68,27
FeAlC (V)	39,107				0,934		59,959
FeAl (V)	40						60

(V) ... válcovaný stav (L) ... litý stav

3.4.1 Vzorek FeAlCr1

Struktura této komplexní slitiny ve výchozím stavu je velmi hrubozrnná s velikostí zrn od 600 do 1000 μm (obr 32). Pomocí optické mikroskopie byly v materiálu zjištěny 3 druhy částic: částice světlé fáze a částice ve formě tyčinek, kde částice světlé fáze mají velikost cca 5 μm a tyčinkovité částice dlouhé přibližně od 5 do 15 μm.



Obr. 32 Struktura materiálu FeAlCr1 ve výchozím stavu - hranice zrn a částice (50x zvětšeno)

Orientačním mappingem bylo prokázáno, že prvky Zr a Cr se rozpustily v matici. Elektronovou mikroskopií bylo zjištěno, že světlé a tmavé částice i tyčinky mají vyšší obsah Ti a C, tmavá fáze a tyčinky obsahují i vyšší procento Zr. [15]

3.4.1.1 Měření magnetizace vzorků FeAlCr1

Tab. 8 Naměřené hodnoty magnetizací vzorků FeAlCr1

	Magnetizace M2			Magnetizace M8			
Vzorek	1.měření (1M2)	2.měření (2M2)	ΔM (1M2 - 2M2)	1.měření (1M8)	2.měření (2M8)	ΔM (1M8 - 2M8)	M kalibr (při M2)
	[A /m]	[A /m]	[A /m]	[A /m]	[A /m]	[A /m]	[A /m]
(10) FeAlCr1	23,8	24,8	-1	31,2	32,2	-1	200
(12) FeAlCr1	65,6	67,7	-2,1	77,0	79,1	-2,1	200
Vzorek	$\Delta(1M8 - 1M2)$		$\Delta(2M8 - 2M2)$				
	[A /m]		[A /m]				
(10) FeAlCr1	7,4		7,4				
(12) FeAlCr1	11,4		11,4				

3.4.1.2 Měření ultrazvukové tloušťky vzorků FeAlCr1

Tab. 9 Naměřené hodnoty ultrazvukových tlouštěk vzorků FeAlCr1

Vzorek	Tloušťka vzorku L [mm]	2 MHz ($\phi d_s = 10$ mm)		2 MHz ($\phi d_s = 20$ mm)	
		Ultrazvuková tloušťka vzorku L_u [mm]	Rychlost zvuku ve vzorku [m/s]	Ultrazvuková tloušťka vzorku L_u [mm]	Rychlost zvuku ve vzorku [m/s]
(10) FeAlCr1	7,81	9,05	5131,5	9,3	5080,8
(12) FeAlCr1	7,67	8,85	5158,6	9,1	5101,8
Vzorek	Tloušťka vzorku L [mm]	4 MHz		10 MHz	
		Ultrazvuková tloušťka vzorku L_u [mm]	Rychlost zvuku ve vzorku [m/s]	Ultrazvuková tloušťka vzorku L_u [mm]	Rychlost zvuku ve vzorku [m/s]
(10) FeAlCr1	7,81	8,9	5230,2	neprozvučí	xxx
(12) FeAlCr1	7,67	8,65	5273,7	neprozvučí	xxx

3.4.2 Vzorek FeAlCr2

Materiál vzorku je komplexní slitina s dominantním zastoupením Cr, jehož struktura je ve výchozím stavu hrubozrnná. Z obr. 33 lze odhadnout velikost zrn okolo 500 μm . Na hranicích i uvnitř zrn materiálu se vylučují dva druhy částic. Částice světlé fáze mají velikost do 5 μm a částice tyčinkovitého tvaru jsou dlouhé od 5 do 15 μm .



Obr. 33 Struktura materiálu FeAlCr2 ve výchozím stavu - hranice zrn a částice (50x zvětšeno)

Pomocí orientačního mappingu bylo prokázáno vyšší procento Zr ve světlé fázi a tyčinkách, a že světlá fáze je pravděpodobně karbid zirkonia. [15]

3.4.2.1 Měření magnetizace vzorku FeAlCr2

Tab. 10 Naměřené hodnoty magnetizací vzorku FeAlCr2

Vzorek	Magnetizace M2			Magnetizace M8			M kalibr (při M2)
	1.měření (1M2) [A /m]	2.měření (2M2) [A /m]	ΔM (1M2 - 2M2) [A /m]	1.měření (1M8) [A /m]	2.měření (2M8) [A /m]	ΔM (1M8 - 2M8) [A /m]	
(14) FeAlCr2	183,0	182,0	1	190,0	191,0	-1	197
Vzorek	$\Delta(1M8 - 1M2)$ [A /m]		$\Delta(2M8 - 2M2)$ [A /m]				
(14) FeAlCr2	7,0		9,0				

3.4.2.2 Měření ultrazvukové tloušťky vzorku FeAlCr2

Tab. 11 Naměřené hodnoty ultrazvukových tlouštěk vzorku FeAlCr2

Vzorek	Tloušťka vzorku L [mm]	2 MHz ($\phi_{ds} = 10$ mm)		2 MHz ($\phi_{ds} = 20$ mm)	
		Ultrazvuková tloušťka vzorku L_u [mm]	Rychlost zvuku ve vzorku [m/s]	Ultrazvuková tloušťka vzorku L_u [mm]	Rychlost zvuku ve vzorku [m/s]
(14) FeAlCr2	1,72	4,35	2441,8	4,45	2395,9
Vzorek	Tloušťka vzorku L [mm]	4 MHz		10 MHz	
		Ultrazvuková tloušťka vzorku L_u [mm]	Rychlost zvuku ve vzorku [m/s]	Ultrazvuková tloušťka vzorku L_u [mm]	Rychlost zvuku ve vzorku [m/s]
(14) FeAlCr2	1,72	3,9	2526,7	1,5	6364,0

3.4.3 Vzorek FeAlCr3

Struktura této komplexní slitiny je jemnozrnná s velikostí zrna okolo 100 μm (obr. 34). Jednotlivé částice o velikosti do 2 μm jsou v materiálu ve shlucích.



Obr. 34 Struktura materiálu FeAlCr3 ve výchozím stavu - hranice zrn a částice (50x zvětšeno)

V materiálu je přítomna velmi jemná Lavesova fáze $(\text{Fe, Al})_2\text{Zr}$, kterou se na optickém mikroskopu nepodařilo zachytit. [15]

Lavesova fáze i částice obsahují Zr, jak ukázal orientační mapping. [15]

3.4.3.1 Měření magnetizace vzorku FeAlCr₃

Tab. 12 Naměřené hodnoty magnetizací vzorku FeAlCr₃

Vzorek	Magnetizace M2			Magnetizace M8			M kalibr (při M2)
	1.měření (1M2)	2.měření (2M2)	ΔM (1M2 - 2M2)	1.měření (1M8)	2.měření (2M8)	ΔM (1M8 - 2M8)	
	[A /m]	[A /m]	[A /m]	[A /m]	[A /m]	[A /m]	
(1) FeAlCr ₃	21,4	16,5	4,9	34,2	36,3	-2,1	200
Vzorek	Δ(1M8 - 1M2)		Δ(2M8 - 2M2)				
	[A /m]		[A /m]				
(1) FeAlCr ₃	12,8		19,8				

3.4.3.2 Měření ultrazvukové tloušťky vzorku FeAlCr₃

Tab. 13 Naměřené hodnoty ultrazvukových tlouštěk vzorku FeAlCr₃

Vzorek	Tloušťka vzorku L [mm]	2 MHz (ød _s = 10 mm)		2 MHz (ød _s = 20 mm)	
		Ultrazvuková tloušťka vzorku L _u [mm]	Rychlost zvuku ve vzorku [m/s]	Ultrazvuková tloušťka vzorku L _u [mm]	Rychlost zvuku ve vzorku [m/s]
(1) FeAlCr ₃	13,65	13,35	6094,1	13,5	6057,6
		4 MHz		10 MHz	
Vzorek	Tloušťka vzorku L [mm]	Ultrazvuková tloušťka vzorku L _u [mm]	Rychlost zvuku ve vzorku [m/s]	Ultrazvuková tloušťka vzorku L _u [mm]	Rychlost zvuku ve vzorku [m/s]
(1) FeAlCr ₃	13,65	13,0	6228,1	neprozvučí	xxx

3.4.4 Vzorek FeAlTi

Výchozí stav této komplexní slitiny s dominantním zastoupením Ti je hrubozrnný s velikostí zrn od 200 do 500 μm (viz obr. 35). Materiál obsahuje dva druhy částic - tmavé částice o velikosti cca 5 μm, které v některých místech vytváří shluky a částice tyčinkovitého tvaru s velikostí od 5 do 15 μm.



Obr. 35 Struktura materiálu FeAlTi ve výchozím stavu - hranice zrn a částice (50x zvětšeno)

Orientační mapping prokázal, že částice jsou sirníky titanu a tmavá fáze je karbid titanu. Síra, která byla zjištěna pouze v tyčinkovitých částicích, se do materiálu dostala pravděpodobně špatným vyčištěním tavicí pece před odléváním tohoto materiálu nebo s legurou jako nežádoucí příměs. [15]

3.4.4.1 Měření magnetizace vzorků FeAlTi

Tab. 14 Naměřené hodnoty magnetizací vzorků FeAlTi

Vzorek	Magnetizace M2			Magnetizace M8			M kalibr (při M2)
	1.měření (1M2)	2.měření (2M2)	ΔM (1M2 - 2M2)	1.měření (1M8)	2.měření (2M8)	ΔM (1M8 - 2M8)	
	[A /m]	[A /m]	[A /m]	[A /m]	[A /m]	[A /m]	
(9) FeAlTi	180,0	174,0	6	222,0	225,0	-3	202
(11) FeAlTi	32,8	35,8	-3	44,7	50,0	-5,3	201
Vzorek	$\Delta(1M8 - 1M2)$		$\Delta(2M8 - 2M2)$				
	[A /m]		[A /m]				
(9) FeAlTi	42,0		51,0				
(11) FeAlTi	11,9		14,2				

3.4.4.2 Měření ultrazvukové tloušťky vzorků FeAlTi

Tab. 15 Naměřené hodnoty ultrazvukových tlouštěk vzorků FeAlTi

Vzorek	Tloušťka vzorku L [mm]	2 MHz ($\phi_{d_s} = 10$ mm)		2 MHz ($\phi_{d_s} = 20$ mm)	
		Ultrazvuková tloušťka vzorku L_u [mm]	Rychlost zvuku ve vzorku [m/s]	Ultrazvuková tloušťka vzorku L_u [mm]	Rychlost zvuku ve vzorku [m/s]
(9) FeAlTi	7,79	6,2	7635,2	6,2	7686,1
(11) FeAlTi	7,87	6,3	7650,3	6,35	7700,9
Vzorek	Tloušťka vzorku L [mm]	4 MHz		10 MHz	
		Ultrazvuková tloušťka vzorku L_u [mm]	Rychlost zvuku ve vzorku [m/s]	Ultrazvuková tloušťka vzorku L_u [mm]	Rychlost zvuku ve vzorku [m/s]
(9) FeAlTi	7,79	5,95	7763,8	neprozvučí	xxx
(11) FeAlTi	7,87	6,0	7778,0	neprozvučí	xxx

3.4.5 Vzorek FeAlC

Ternární slitina s legurou C má ve výchozím stavu hrubozrnnou strukturu s velikostí zrn od 500 do 1000 μm (obr. 36). Kromě matrice FeAl byly ve struktuře identifikovány dvě fáze. Částice světlé fáze ve tvaru velmi jemných jehliček, o velikosti do 15 μm , rozmístěných po hranicích zrn a částice tmavé fáze ve tvaru lupínek s velikostí do 50 μm .



Obr. 36 Struktura materiálu FeAlC ve výchozím stavu - hranice zrn a částice (50x zvětšeno)

Část uhlíku zřejmě vytvořila s Fe a Al světlou κ -fází a zbytek uhlíku se vyloučil ve formě grafitických lupínků

3.4.5.1 Měření magnetizace vzorku FeAlC

Tab. 16 Naměřené hodnoty magnetizací vzorku FeAlC

Vzorek	Magnetizace M2			Magnetizace M8			M kalibr (při M2)
	1.měření (1M2)	2.měření (2M2)	ΔM (1M2 - 2M2)	1.měření (1M8)	2.měření (2M8)	ΔM (1M8 - 2M8)	
	[A /m]	[A /m]	[A /m]	[A /m]	[A /m]	[A /m]	
(5) FeAlC	1,9	0,9	1	2,0	3,1	-1,1	200
Vzorek	$\Delta(1M8 - 1M2)$		$\Delta(2M8 - 2M2)$				
	[A /m]		[A /m]				
(5) FeAlC	0,1		2,2				

3.4.5.2 Měření ultrazvukové tloušťky vzorku FeAlC

Tab. 17 Naměřené hodnoty ultrazvukových tlouštěk vzorku FeAlC

Vzorek	Tloušťka vzorku L [mm]	2 MHz ($\phi d_s = 10$ mm)		2 MHz ($\phi d_s = 20$ mm)	
		Ultrazvuková tloušťka vzorku L_u [mm]	Rychlost zvuku ve vzorku [m/s]	Ultrazvuková tloušťka vzorku L_u [mm]	Rychlost zvuku ve vzorku [m/s]
(5) FeAlC	12,28	11,2	6508,3	11,3	6543,4
Vzorek	Tloušťka vzorku L [mm]	4 MHz		10 MHz	
		Ultrazvuková tloušťka vzorku L_u [mm]	Rychlost zvuku ve vzorku [m/s]	Ultrazvuková tloušťka vzorku L_u [mm]	Rychlost zvuku ve vzorku [m/s]
(5) FeAlC	12,28	10,95	6664,9	neprozvučí	xxx

3.4.6 Vzorek FeAl

Struktura binární slitiny s 40 at.%Al je velmi hrubozrnná s velikostí zrn okolo 1200 μm , (obr. 37). Tmavé částice jsou nejspíše umístěny v důlcích vzniklých po leptání. Částice se nacházejí uvnitř i na hranicích zrn.



Obr. 37 Struktura materiálu FeAl ve výchozím stavu - hranice zrn a částice (50x zvětšeno)

3.4.6.1 Měření magnetizace vzorků FeAl

Tab. 18 Naměřené hodnoty magnetizací vzorků FeAl

Vzorek	Magnetizace M2			Magnetizace M8			M kalibr (při M2)
	1.měření (1M2)	2.měření (2M2)	ΔM (1M2 - 2M2)	1.měření (1M8)	2.měření (2M8)	ΔM (1M8 - 2M8)	
	[A /m]	[A /m]	[A /m]	[A /m]	[A /m]	[A /m]	
(2) FeAl (450 °C, 120 h)	166,0	167,0	-1	195,0	209,0	-14	197
(3) FeAl	11,7	12,6	-0,9	17,1	18,1	-1	197
(4) FeAl	16,5	11,7	4,8	21,8	19,7	2,1	201
Vzorek	$\Delta(1M8 - 1M2)$		$\Delta(2M8 - 2M2)$				
	[A /m]		[A /m]				
(2) FeAl (450 °C, 120 h)	29,0		42,0				
(3) FeAl	5,4		5,5				
(4) FeAl	5,3		8,0				

3.4.6.2 Měření ultrazvukové tloušťky vzorků FeAl

Tab. 19 Naměřené hodnoty ultrazvukových tloušťek vzorku FeAl

		2 MHz ($\phi_{d_s} = 10$ mm)		2 MHz ($\phi_{d_s} = 20$ mm)	
Vzorek	Tloušťka vzorku L [mm]	Ultrazvuková tloušťka vzorku L_u [mm]	Rychlost zvuku ve vzorku [m/s]	Ultrazvuková tloušťka vzorku L_u [mm]	Rychlost zvuku ve vzorku [m/s]
(2) FeAl (450 °C, 120 h)	28,80	21,8	7933,7	21,4	7985,3
(3) FeAl	3,14	3,4	5737,3	3,45	5719,6
(4) FeAl	13,24	13,8	5721,2	13,9	5700,4
		4 MHz		10 MHz	
Vzorek	Tloušťka vzorku L [mm]	Ultrazvuková tloušťka vzorku L_u [mm]	Rychlost zvuku ve vzorku [m/s]	Ultrazvuková tloušťka vzorku L_u [mm]	Rychlost zvuku ve vzorku [m/s]
(2) FeAl (450 °C, 120 h)	28,80	21,9	7846,1	neprozvučí	
(3) FeAl	3,14	3,0	5684,6	2,95	5809,0
(4) FeAl	13,24	13,85	5667,4	neprozvučí	

3.5 Slitiny mědi - hliníkové bronzy

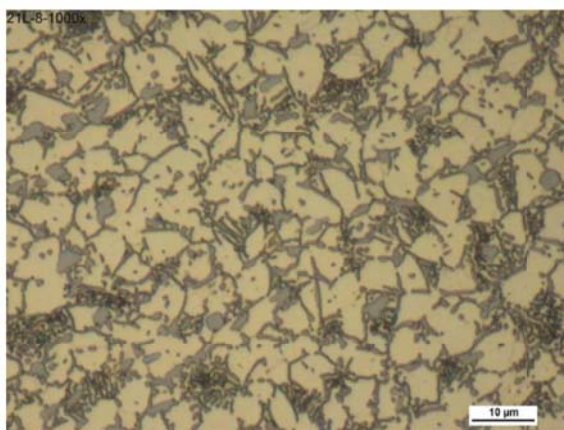
Jedním z představitelů Al bronzů je slitina CuAl10Ni5Fe4 s vysokou pevností (i za zvýšených teplot), odolná proti korozi, kyselinám a louhům, vysokým teplotám i opotřebení. Její chemické složení je v tab. 20.

Tab. 20 Chemické složení vzorku CuAl10Ni5Fe4

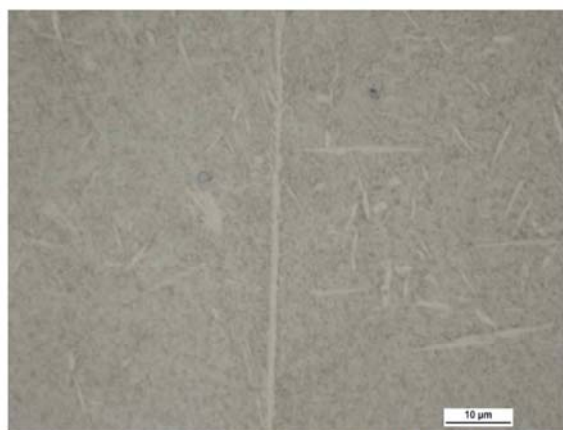
Materiál vzorku	Prvek [hm.%]										
	Cu	Al	Ni	Fe	Mn	Si	Sn	P	Cr	Zn	As
CuAl10Ni5Fe4	78,573	10,216	5,758	4,289	0,986	0,119	0,016	0,012	0,012	0,01	0,009

Vzorky materiálu byly poskytnuty firmou COMTES FHT a.s., Dobřany v rámci výzkumných aktivit, kde byly provedeny i mechanické zkoušky slitiny (viz tab. 21).

3.5.1 Struktura materiálu CuAl10Ni5Fe4



Obr. 38 Struktura slitiny CuAl10Ni5Fe4, žháno 800 °C, ochlazováno pomalu (1000x zvětšeno)



Obr. 39 Struktura slitiny CuAl10Ni5Fe4, zakaleno 930 °C + stárnuto 400 °C (1000x zvětšeno, leptáno)

Struktura slitiny (obr. 38) je ve formě polyedrických zrn tuhého roztoku mědi s rovnoměrně vyloučenými intermetalickými sloučeninami legujících prvků.

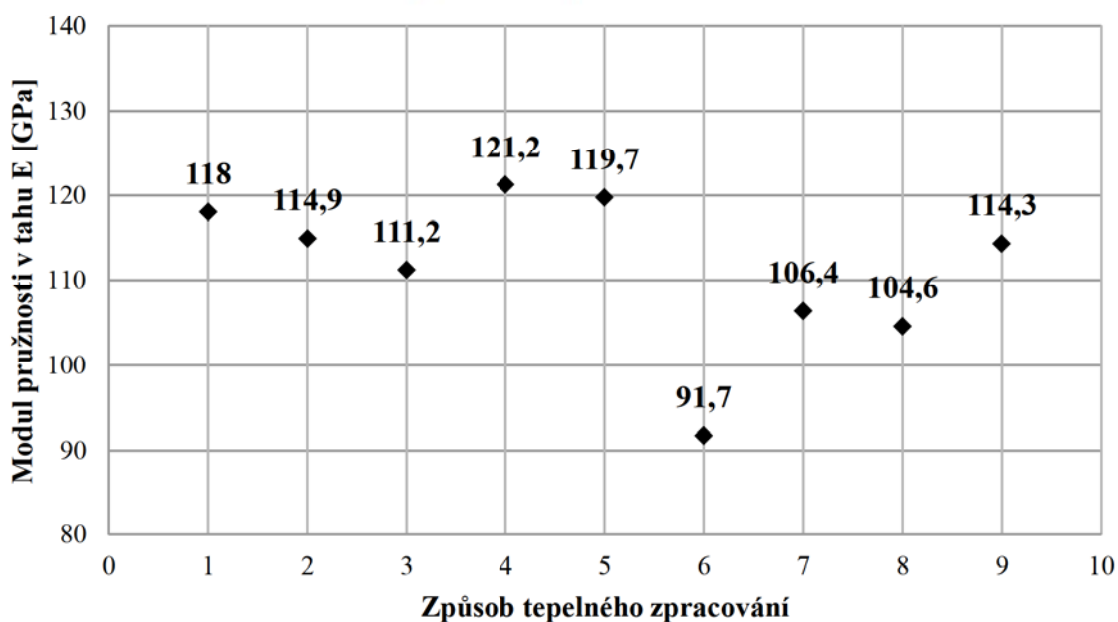
Po zakalení 930 °C a stárnutí při 400 °C (obr. 39) má struktura slitiny homogenní matici s jehlicemi niklového martenzitu.

3.5.2 Mechanické vlastnosti slitiny CuAl10Ni5Fe4 po tepelných zpracováních

Tab. 21 Mechanické vlastnosti slitiny CuAl10Ni5Fe4 po tepelných zpracováních naměřené ve firmě COMTES FHT a.s., Dobřany

Vzorek	R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A5 [%]	HV30	E [GPa]
1. Dodaný stav	911	767	14,6	265	118
2. Žiháno 750°C, pec	788	591	18,9	228	114,9
3. Žiháno 750°C, vzduch	844	625	11,9	236	111,2
4. Zakaleno, žiháno 750°C, pec	823	524	10,5	226	121,2
5. Zakaleno, žiháno 750°C, vzduch	865	549	10,8	235	119,7
6. Zakaleno 930°C	972	702	2,0	305	91,7
7. Zakaleno 930°C + stárnutí 400°C	1057	1051	1,1	400	106,4
8. Žiháno 850°C, pec	681	355	16,0	182	104,6
9. Žiháno 850°C, vzduch	823	444	10,5	219	114,3

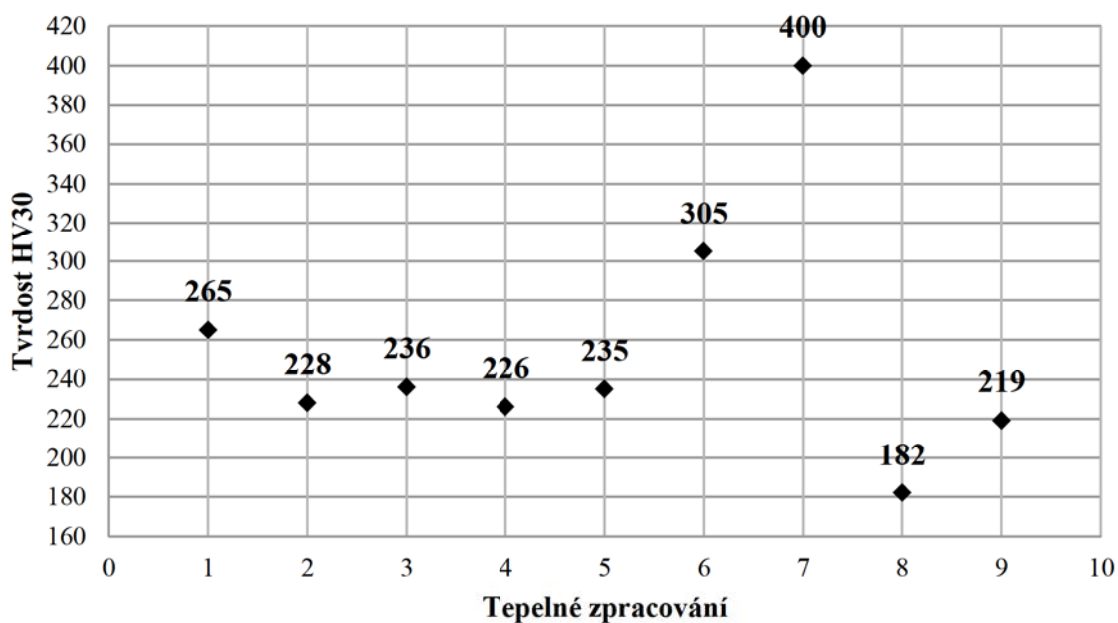
Závislost modulu pružnosti v tahu E CuAl10Ni5Fe4 na tepelném zpracování



Graf 1 Závislost modulu pružnosti v tahu slitiny CuAl10Ni5Fe4 na tepelném zpracování

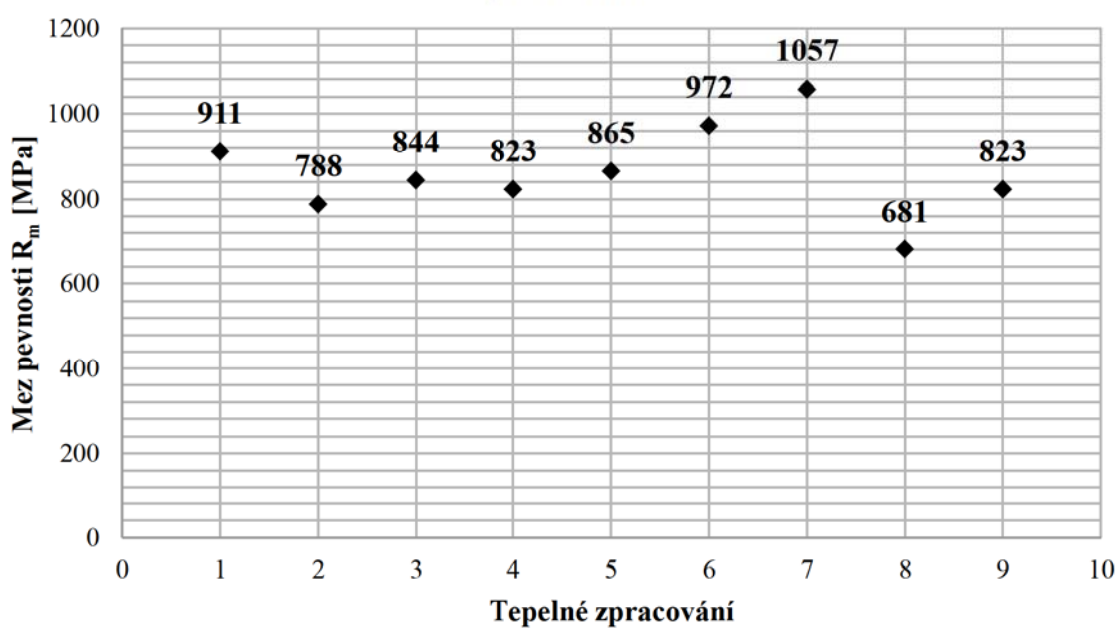
V grafu 1 jsou na vodorovné ose čísla 1 až 9 znázorněna tepelná zpracování (označení v tab. 21)

Závislost tvrdosti HV30 CuAl10Ni5Fe4 na tepelném zpracování



Graf 2 Závislost tvrdosti HV30 slitiny CuAl10Ni5Fe4 na tepelném zpracování

Závislost meze pevnosti R_m CuAl10Ni5Fe4 na tepelném zpracování



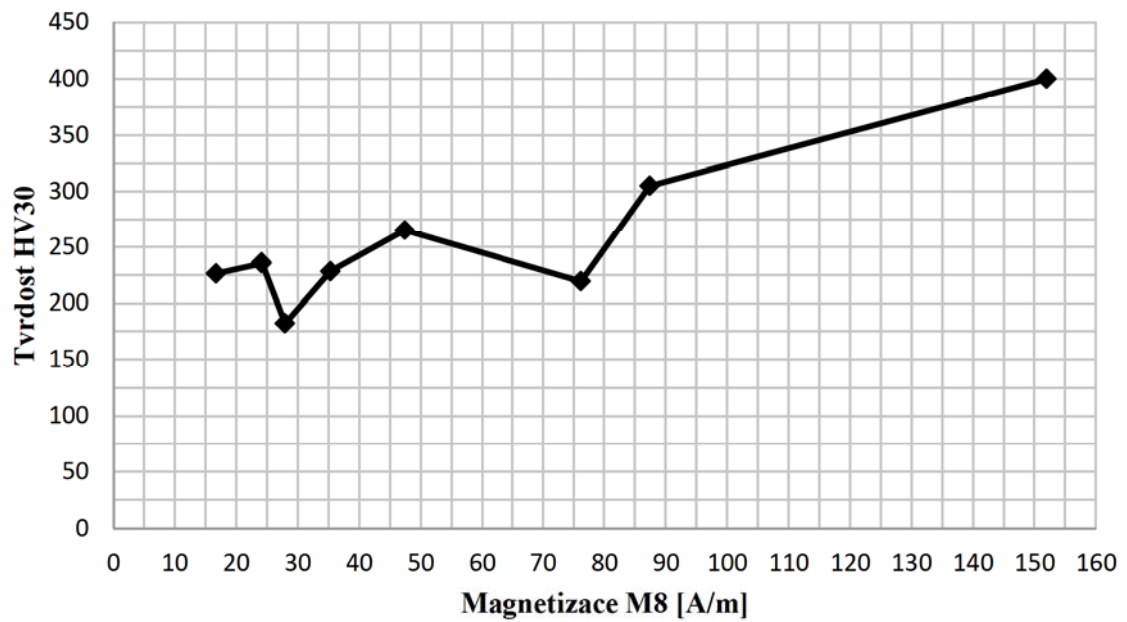
Graf 3 Závislost meze pevnosti R_m slitiny CuAl10Ni5Fe4 na tepelném zpracování

3.5.3 Měření magnetizace vzorků slitiny CuAl10Ni5Fe4

Tab. 22 Naměřené hodnoty magnetizací vzorků slitiny CuAl10Ni5Fe4

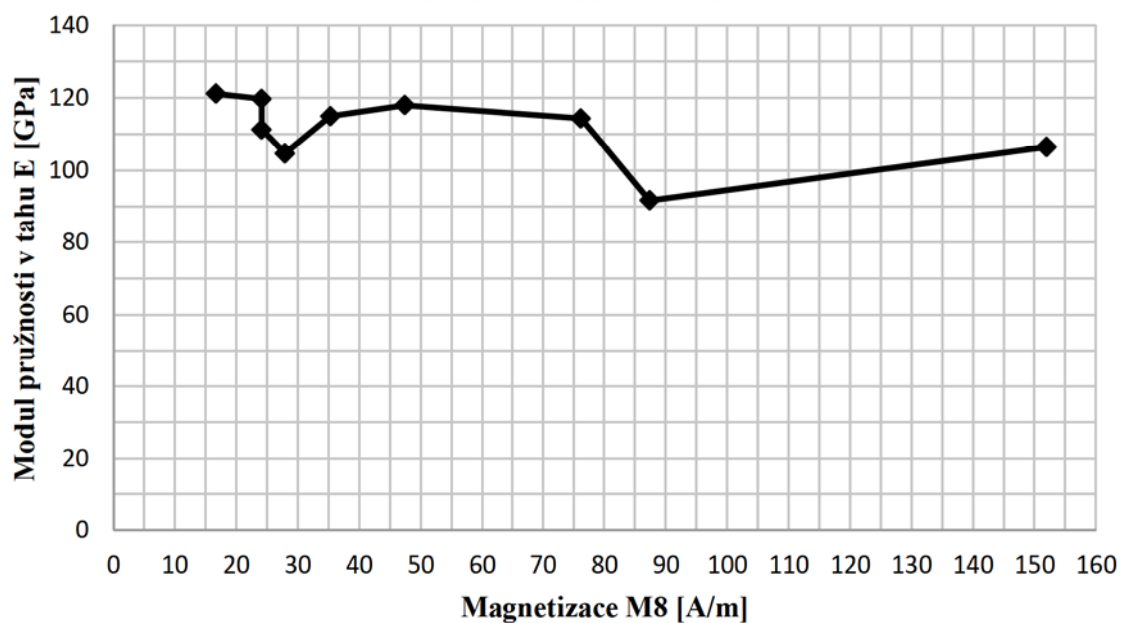
Vzorek	Magnetizace M2			Magnetizace M8			M kalibr	
	1.měření (1M2)	2.měření (2M2)	ΔM (1M2 - 2M2)	1.měření (1M8)	2.měření (2M8)	ΔM (1M8 - 2M8)	[A/m]	
	[A /m]	[A /m]	[A /m]	[A /m]	[A /m]	[A /m]	M3	M8
Dodaný stav	23,5	23,5	0	47,4	47,8	-0,4	198	197
Žiháno 750°C, pec	18,8	16,0	2,8	35,3	34,7	0,6	198	201
Žiháno 750°C, vzduch	12,2	12,2	0	24,1	24,1	0	199	200
Zakaleno, žiháno 750°C, pec	5,4	5,4	0	16,7	16,4	0,3	200	199
Zakaleno, žiháno 750°C, vzduch	9,0	12,6	-3,6	24,1	26,9	-2,8	200	202
Zakaleno 930°C	28,8	30,6	-1,8	87,4	88,7	-1,3	201	201
Zakaleno 930°C + stárnuo 400°C	105,0	106,0	-1	152,0	153,2	-1,2	200	201
Žiháno 850°C, pec	16,2	17,1	-0,9	27,9	29,3	-1,4	197	200
Žiháno 850°C, vzduch	20,7	21,6	-0,9	76,2	78,4	-2,2	199	200
Vzorek	$\Delta(1M8 - 1M2)$		$\Delta(2M8 - 2M2)$					
	[A /m]		[A /m]					
Dodaný stav	23,9		24,3					
Žiháno 750°C, pec	16,5		18,7					
Žiháno 750°C, vzduch	11,9		11,9					
Zakaleno, žiháno 750°C, pec	11,3		11,0					
Zakaleno, žiháno 750°C, vzduch	15,1		14,3					
Zakaleno 930°C	58,6		58,1					
Zakaleno 930°C + stárnuo 400°C	47,0		47,2					
Žiháno 850°C, pec	11,7		12,2					
Žiháno 850°C, vzduch	55,5		56,8					

Závislost magnetizace M8 slitiny CuAl10Ni5Fe4 na tvrdosti HV30



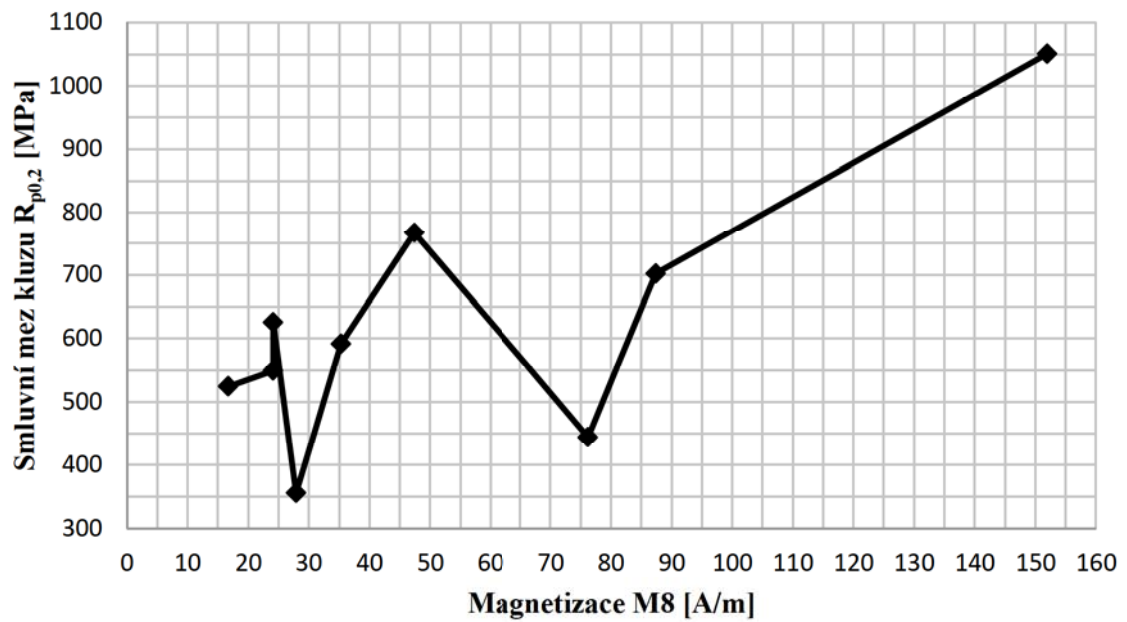
Graf 4 Závislost magnetizace slitiny CuAl10Ni5Fe4 na tvrdosti HV30

Závislost magnetizace M8 slitiny CuAl10Ni5Fe4 na modulu pružnosti v tahu E



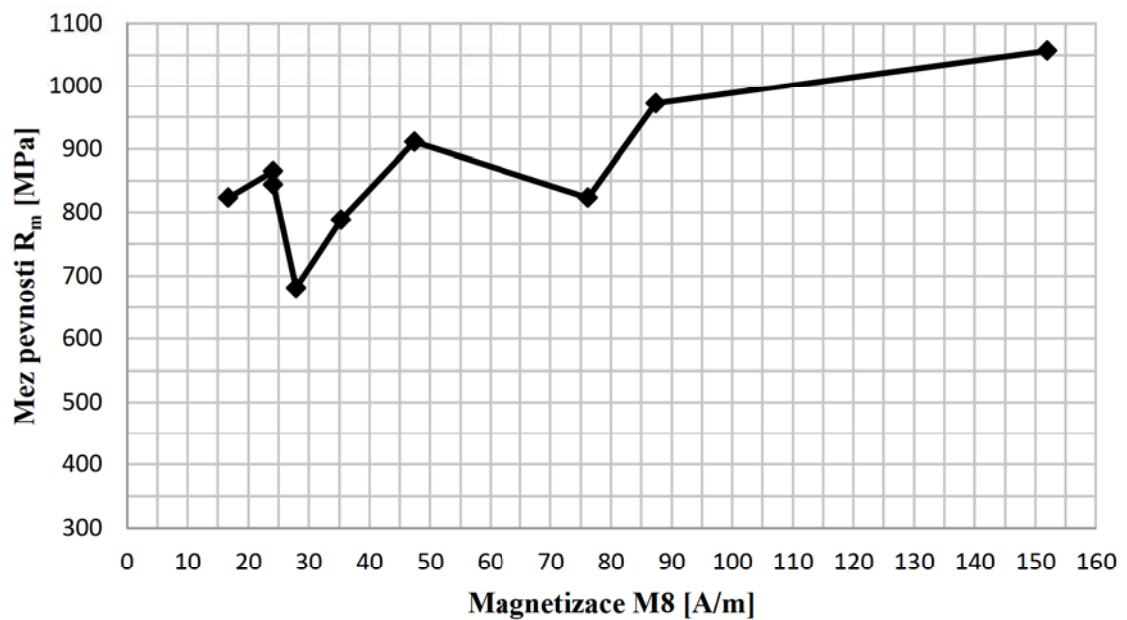
Graf 5 Závislost magnetizace slitiny CuAl10Ni5Fe4 na modulu pružnosti v tahu

Závislost magnetizace M8 slitiny CuAl10Ni5Fe4 na smluvní mezi kluzu $R_{p0,2}$



Graf 6 Závislost magnetizace slitiny CuAl10Ni5Fe4 na smluvní mezi kluzu $R_{p0,2}$

Závislost magnetizace M8 slitiny CuAl10Ni5Fe4 na mezi pevnosti R_m



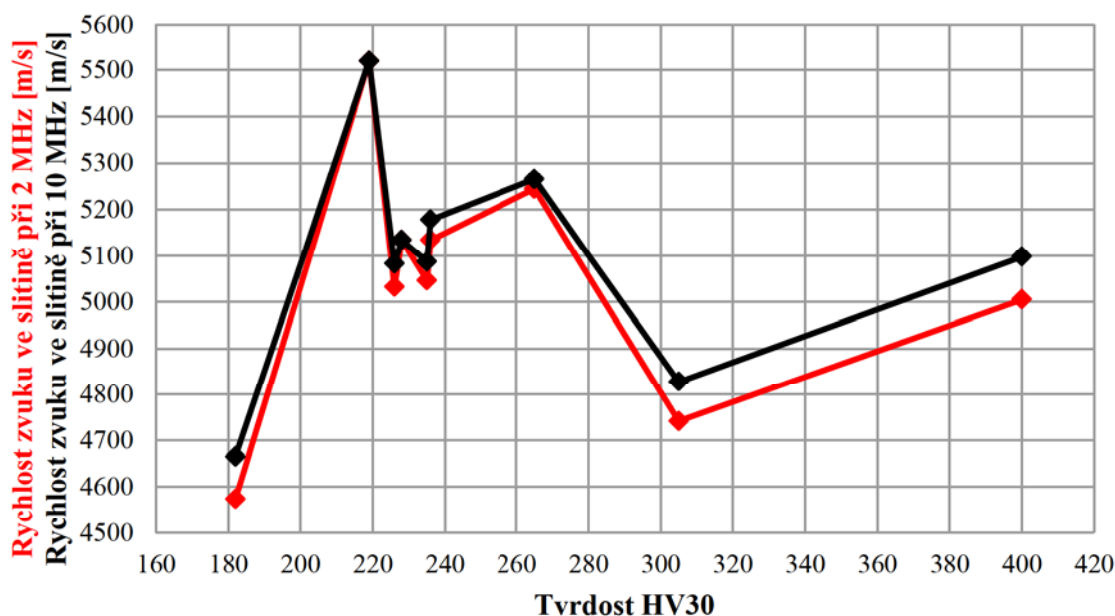
Graf 7 Závislost magnetizace slitiny CuAl10Ni5Fe4 na mezi pevnosti R_m

3.5.4 Měření ultrazvukové tloušťky vzorků slitiny CuAl10Ni5Fe4

Tab. 23 Naměřené hodnoty ultrazvukových tloušťek vzorků slitiny CuAl10Ni5Fe4

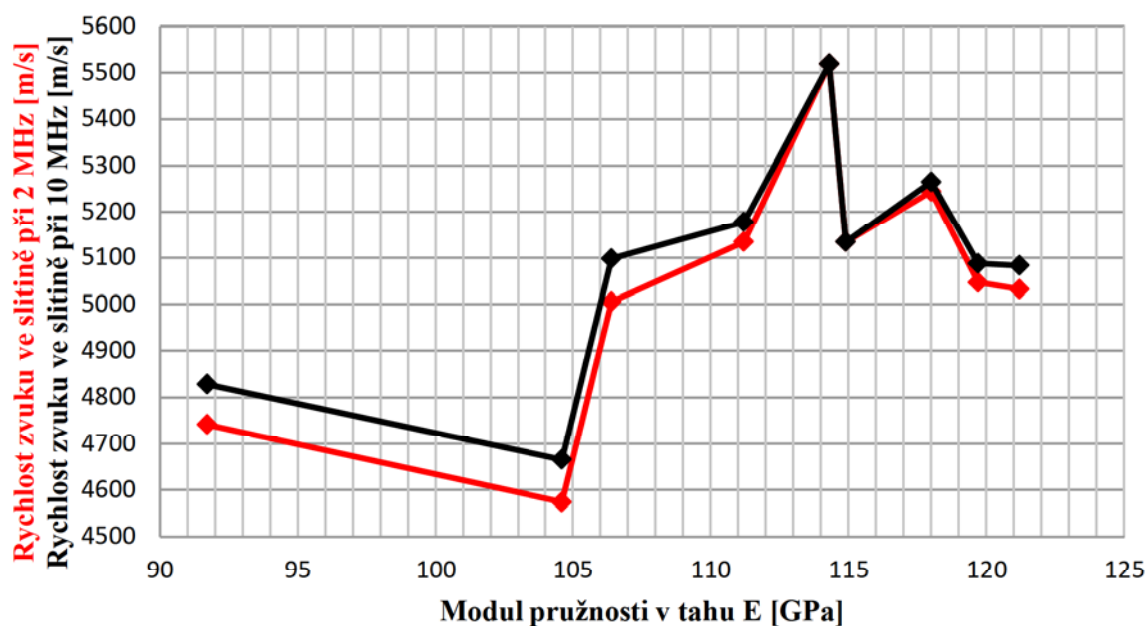
Vzorek	Tloušťka vzorku L [mm]	2 MHz (øds = 10 mm)		10 MHz	
		Ultrazvuková tloušťka vzorku L_u [mm]	Rychlost zvuku ve vzorku [m/s]	Ultrazvuková tloušťka vzorku L_u [mm]	Rychlost zvuku ve vzorku [m/s]
Dodaný stav,	11,25	12,7	5244,1	12,65	5265
Žiháno 750°C, pec	10,32	11,9	5134	11,9	5134
Žiháno 750°C, vzduch	10,32	11,9	5134	11,8	5177,5
Zakaleno, žiháno 750°C, pec	8,5	10,0	5032	9,9	5082,8
Zakaleno, žiháno 750°C, vzduch	10,57	12,4	5046,3	12,3	5087,3
Zakaleno 930°C	8,97	11,2	4741,3	11,0	4827,5
Zakaleno 930°C + stárnuo 400°C	9,3	11,0	5005,1	10,8	5097,8
Žiháno 850°C, pec	7,88	10,2	4573,5	10,0	4665
Žiháno 850°C, vzduch	8,67	9,3	5519	9,3	5519

Závislost rychlosti zvuku ve slitině CuAl10Ni5Fe4 na tvrdosti HV30



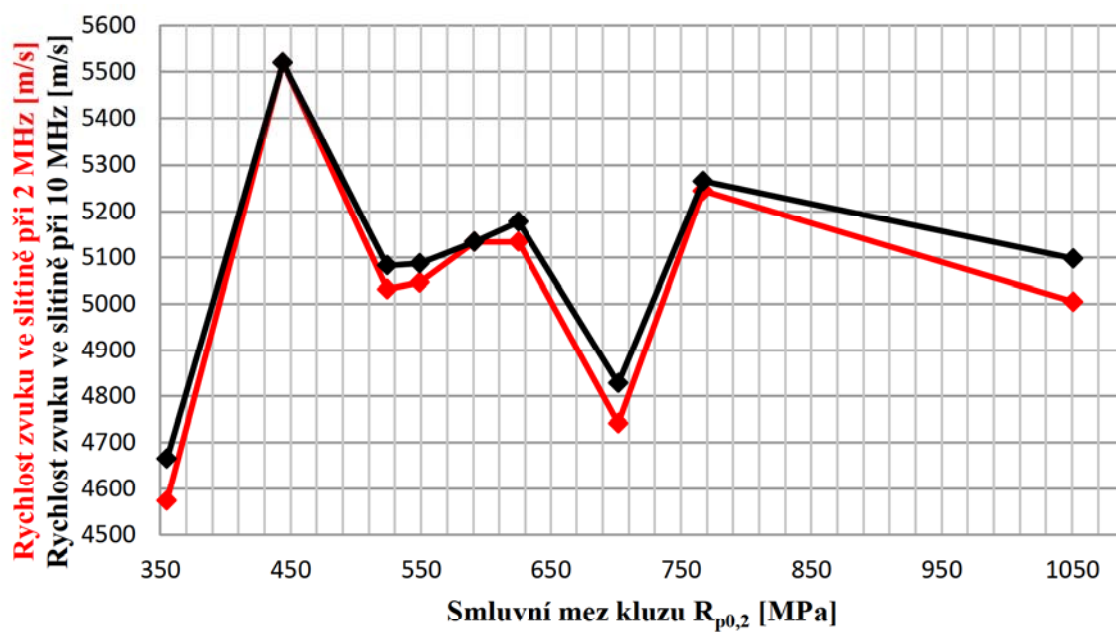
Graf 8 Závislost rychlosti zvuku ve slitině CuAl10Ni5Fe4 na tvrdosti HV30

Závislost rychlosti zvuku ve slitině CuAl10Ni5Fe4 na modulu pružnosti v tahu E



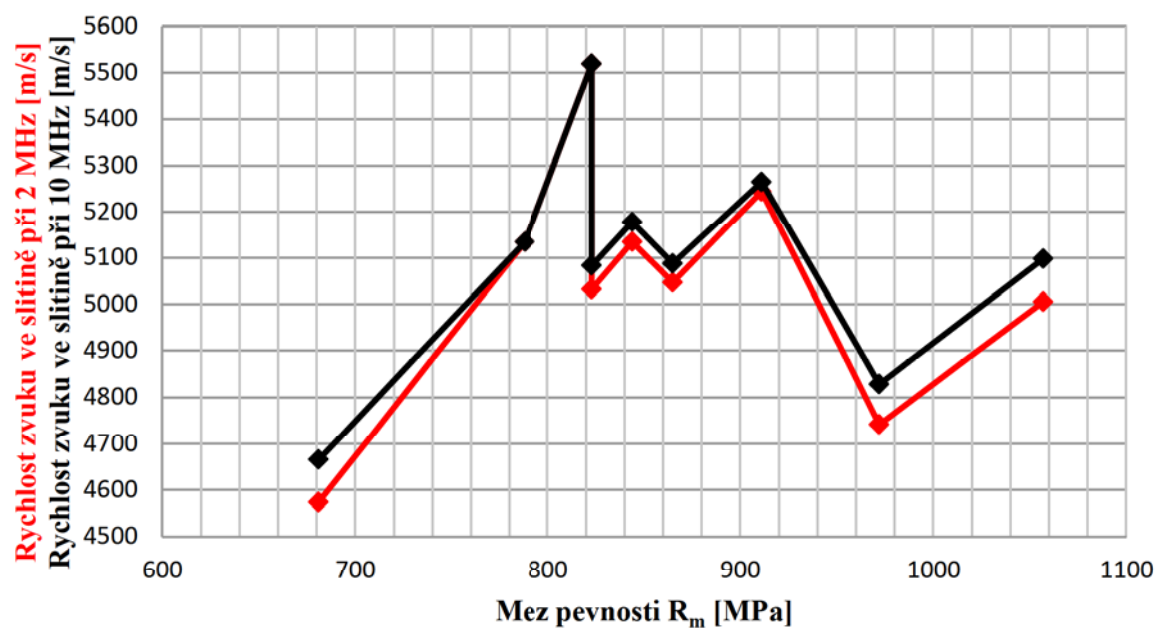
Graf 9 Závislost rychlosti zvuku ve slitině CuAl10Ni5Fe4 na modulu pružnosti v tahu E

Závislost rychlosti zvuku ve slitině CuAl10Ni5Fe4 na smluvní mezi kluzu $R_{p0,2}$



Graf 10 Závislost rychlosti zvuku ve slitině CuAl10Ni5Fe4 na smluvní mezi kluzu $R_{p0,2}$

Závislost rychlosti zvuku ve slitině CuAl10Ni5Fe4 na mezi pevnosti R_m



Graf 11 Závislost rychlosti zvuku ve slitině CuAl10Ni5Fe4 na mezi pevnosti R_m

3.6 Slitiny kobaltu

Zástupcem slitin kobaltu jsou například slitiny zvané stellity, které jsou velmi odolné proti mechanickému opotřebení, otěru a korozi. Tyto kladné vlastnosti si zachovávají i za vysokých teplot.

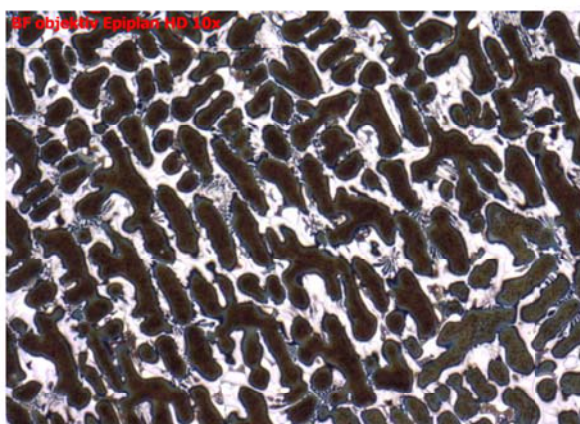
Pro experiment byla použita sedla sacích a výfukových ventilů pístových plynových a naftových motorů, litá jako přesné odlitky na voskový model. Sací sedlo je odlito ze Stellitu 6 (chemické složení viz tab.24) a výfukové sedlo ze Stellitu 12 (chemické složení viz tab. 25). Sedla dodala firma Tedom, a.s., Jablonec nad Nisou. Fotografie struktur a mechanické vlastnosti Stellitů byly rovněž poskytnuty touto firmou.

3.6.1 Stellit 6

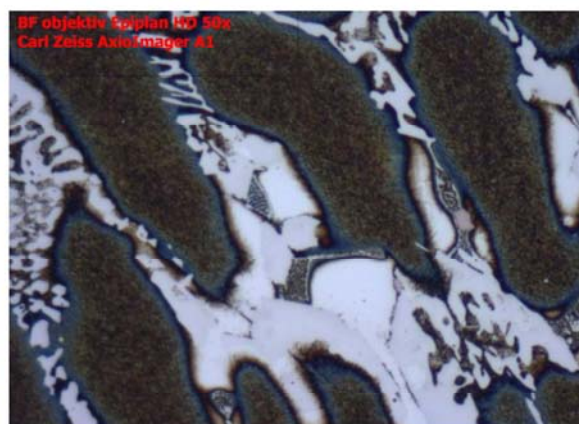
Tab. 24 Chemické složení kobaltové slitiny Stellit 6

Materiál vzorku	Prvek [hm. %]								
	Cr	W	Fe	Ni	Si	C	Mn	Mo	Co
Stellit 6	26 - 33	4 - 5	< 3	< 3	0,4 - 2	0,9 - 1,4	< 1	< 1	zbytek

3.6.1.1 Struktura Stellitu 6



Obr. 40 Struktura slitiny Stellit 6
(10x zvětšeno)



Obr. 41 Detail struktury slitiny Stellit 6
(50x zvětšeno)

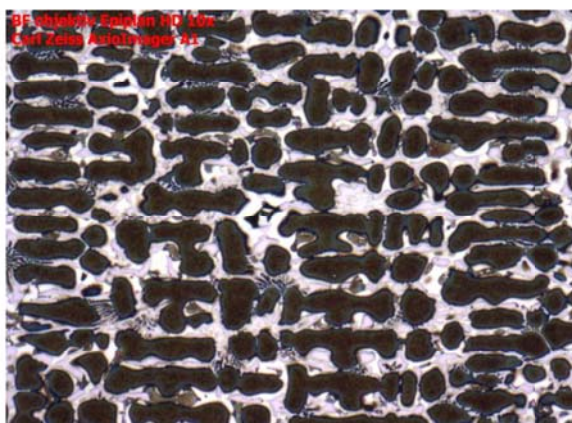
Struktura Stellitu 6 obsahuje kobaltové dendrity (tmavé části, které při ochlazování tuhnou nejdříve) a karbidy legujících prvků (světlé části).

3.6.2 Stellite 12

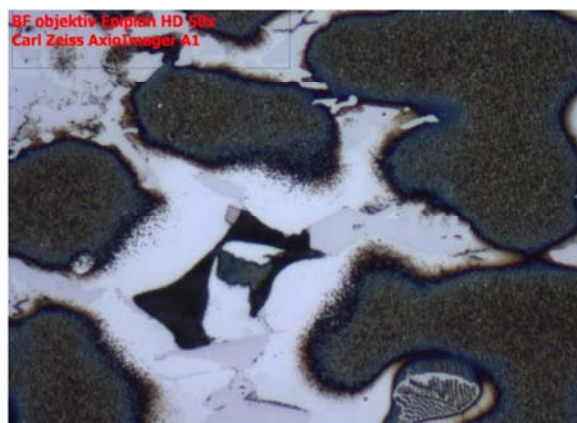
Tab. 25 Chemické složení kobaltové slitiny Stellite 12

Materiál vzorku	Prvek [hm. %]								
	Cr	W	Fe	Ni	Si	C	Mn	Mo	Co
Stellite 12	26 - 33	7 - 9	< 3	< 3	0,4 - 2	1,1 - 1,9	< 1	< 1	zbytek

3.6.2.1 Struktura Stellite 12



Obr. 42 Struktura slitiny Stellite 12
(10x zvětšeno)



Obr. 43 Detail struktury slitiny Stellite 12
(50x zvětšeno)

Stellite 12 má výraznější dendritickou strukturu, kde světlé části jsou karbidy a intermetalika legujících prvků.

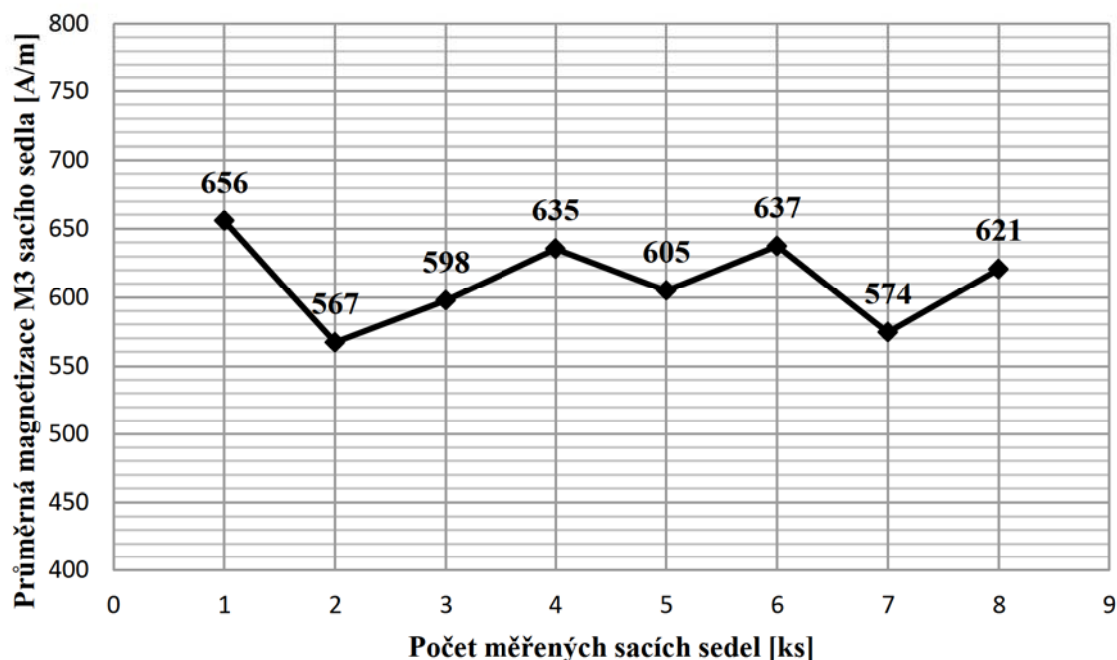
3.6.3 Měření magnetizace sacích sedel (Stellit 6)

Osm sacích sedel bylo měřeno po obvodu ve třech polohách (po 120°). Poloha měření 0° (místo měření „I“) odpovídá místu vtoku.

Tab. 26 Naměřené hodnoty magnetizací a tvrdostí sacích sedel ze Stellitu 6

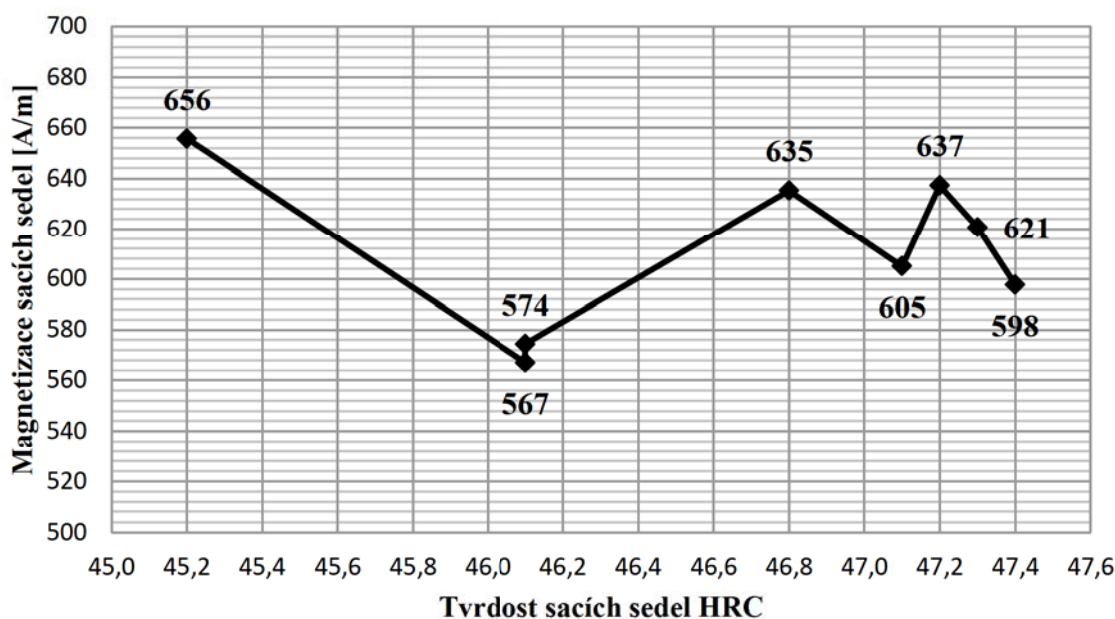
		Magnetizace sacích sedel M3 [A/m]							
sací sedla (Stellit 6)		1	2	3	4	5	6	7	8
místo měření sacího sedla									
I		650	554	585	620	579	620	550	600
II		658	571	589	645	622	655	583	627
III		659	576	619	641	614	637	590	635
		HRC							
I		44	45,5	47	45	46,8	46,2	45	46,6
II		45,5	46	47	47,9	47,6	48,2	46,3	47,5
III		46	46,8	48,2	47,5	47	47,2	47	47,8

Průměrná magnetizace sacích sedel (Stellit 6)



Graf 12 Průměrná magnetizace sacích sedel (Stellitu 6) v dávce 8 kusů

Závislost magnetizace sacích sedel (Stellit 6) na tvrdosti HRC



Graf 13 Závislost magnetizace sacích sedel (Stellit 6) na průměrné tvrdosti HRC

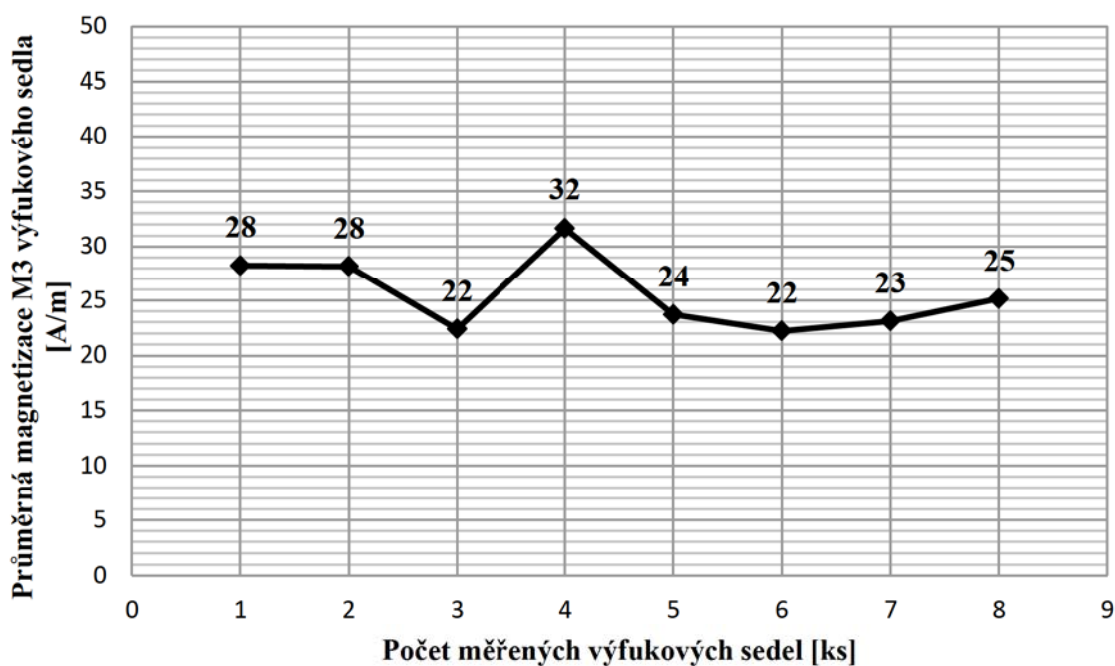
3.6.4 Měření magnetizace výfukových sedel (Stellit 12)

Stejně jako u sacích sedel bylo osm výfukových sedel měřeno ve třech místech obvodu po 120° (místo vtoku označeno „I“ je v poloze 0°).

Tab. 27 Naměřené hodnoty magnetizací a tvrdostí výfukových sedel ze Stellitu 12

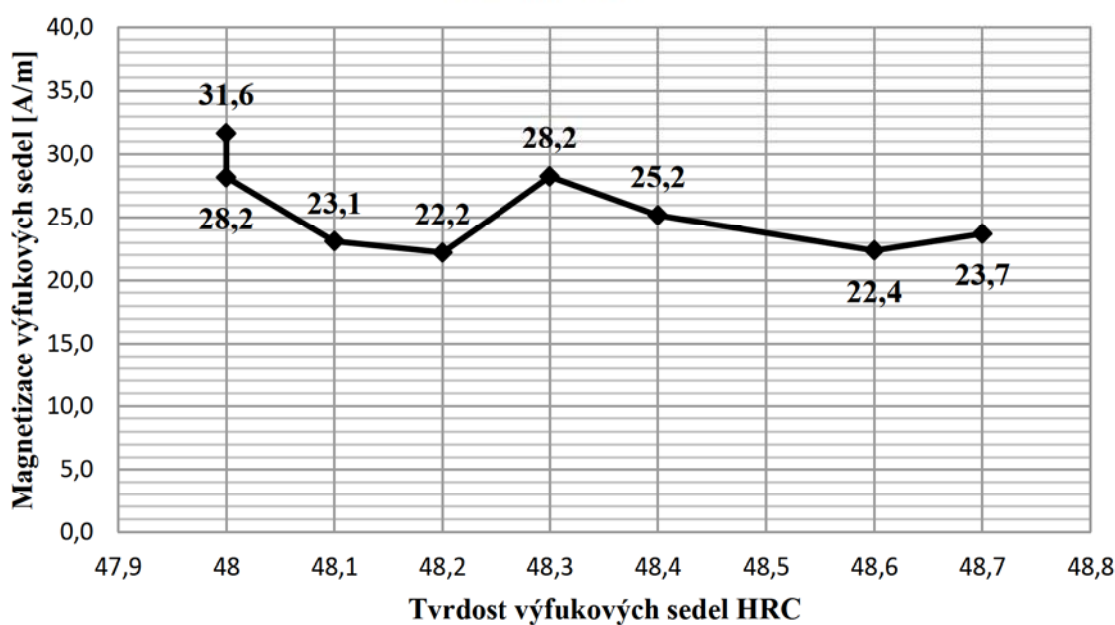
		Magnetizace výfukových sedel M3 [A/m]							
výfuková sedla (Stellit 12)		1	2	3	4	5	6	7	8
místo měření výfuk. sedla									
I		27	27	21	29	20	20	22	24
II		28,7	29	22,1	31,9	25,1	24	24	26
III		29	28,5	24	34	26	22,6	23,3	25,5
		HRC							
I		47	46,5	46,8	45,5	47,8	46,8	45,7	46,5
II		49	48,8	48,8	48,8	48,8	50,2	49,5	49,8
III		49	48,6	50,2	49,8	49,5	47,6	49	49

Průměrná magnetizace výfukových sedel (Stellit 12)

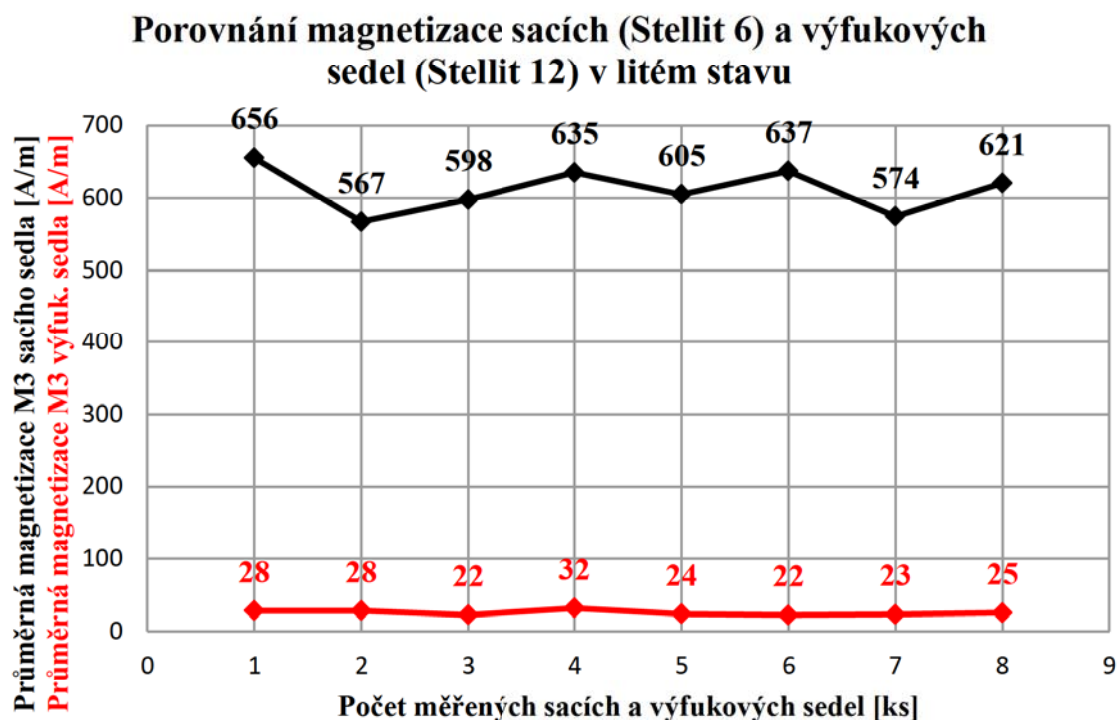


Graf 14 Průměrná magnetizace výfukových sedel (Stellit 12) v dávce 8 kusů

Závislost magnetizace výfukových sedel (Stellit 12) na tvrdosti HRC



Graf 15 Závislost magnetizace výfukových sedel (Stellit 12) na průměrné tvrdosti HRC



Graf 16 Porovnání magnetizace sacích (Stellit 6) a výfukových sedel (Stellit 12) v litém stavu

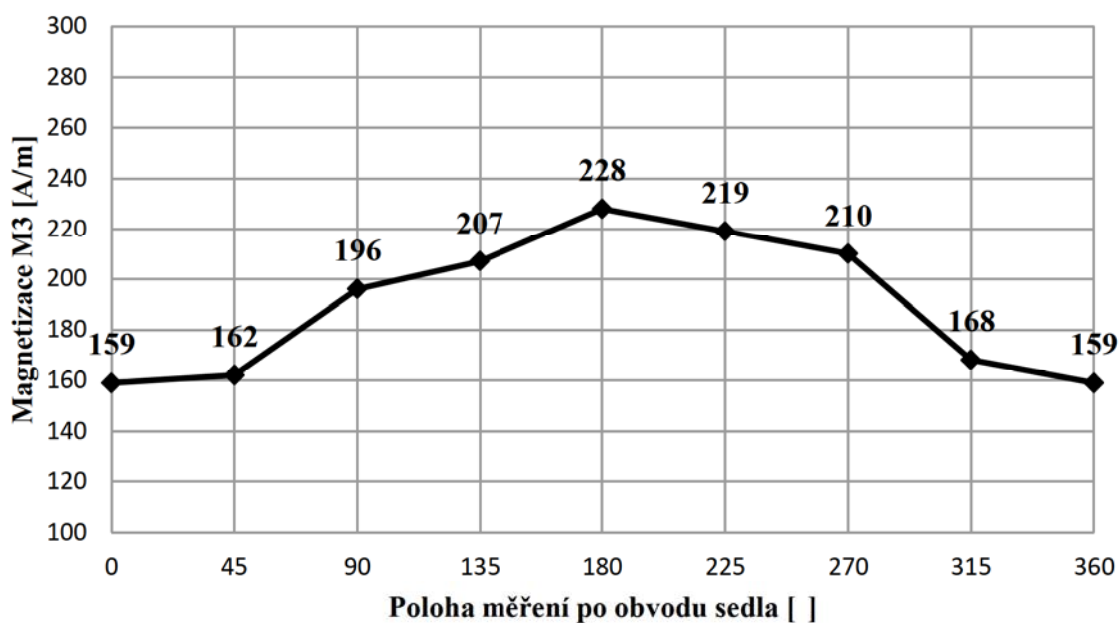
3.6.5 Měření magnetizace výfukového sedla č. 9 (Stellit 12)

Výfukové sedlo č. 9 ze Stellitu 12 bylo měřeno podrobně v osmi místech obvodu (po 45°), kde místo vtoku odpovídá poloze 0° (360°).

Tab. 28 Naměřené hodnoty magnetizací a tvrdostí výfukového sedla č. 9 (Stellit 12)

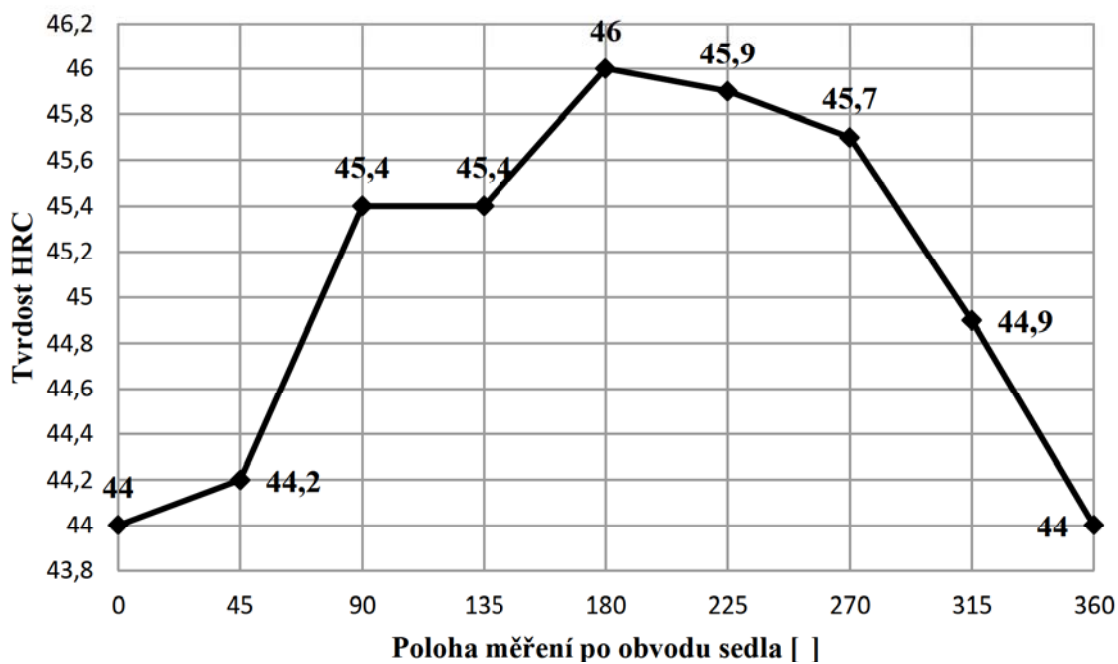
	Poloha měření výfukového sedla č. 9 (Stellit 12)								
	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	360°
Magnetizace M3 [A/m]	159	162	196	207	228	219	210	168	159
HRC	44	44,2	45,4	45,4	46	45,9	45,7	44,9	44

Průběh magnetizace po obvodu výfukového sedla (Stellit 12)



Graf 17 Průběh magnetizace po obvodu výfukového sedla (Stellit 12)

Průběh HRC po obvodu výfukového sedla (Stellit 12)



Graf 18 Průběh tvrdosti HRC po obvodu výfukového sedla (Stellit 12)

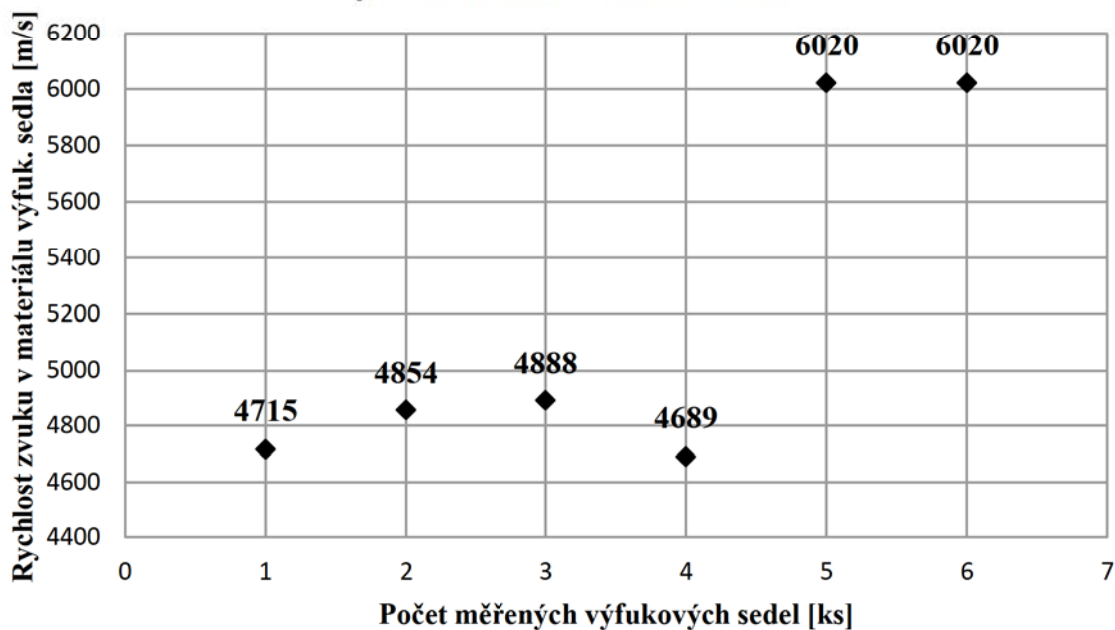
3.6.6 Identifikace materiálů výfukových sedel (Stellit 12)

Identifikace materiálu z dávky několika sedel ultrazvukovým tloušťkoměrem DiO570 4 MHz a přístrojem DOMENA B2.

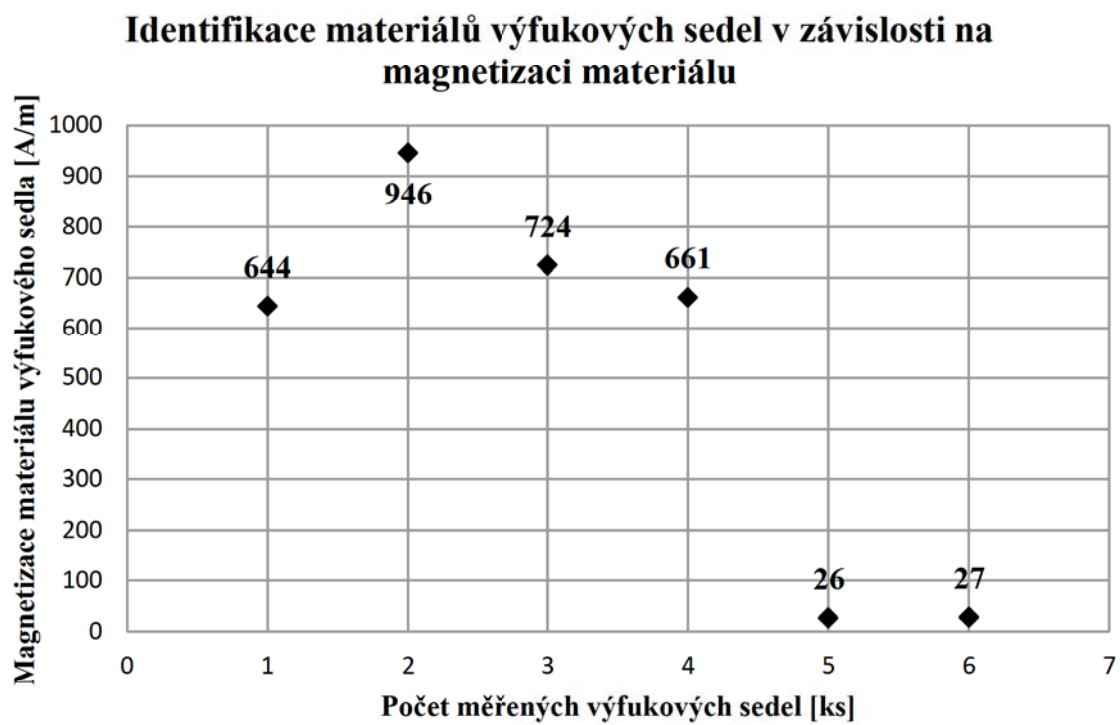
Tab. 29 Identifikace materiálu sedel ze středních hodnot magnetizace a ultrazvukové tloušťky

Skupina sedel	Tloušťka sedla L [mm]	Ultrazvuková tloušťka sedla Lu pro 4 MHz [mm]	Rychlost zvuku v sedle v_L [mm]	HRC	Magnetizace M3 [A/m]
1	9	11,3	4715	36,4	644
2	9,02	11	4854	34,3	946
3	9	10,9	4888	36,7	724
4	9,03	11,4	4689	36,8	661
5	9	8,85	6020	44,3	26
6	9	8,85	6020	44,5	27

Identifikace materiálů výfukových sedel v závislosti na rychlosti zvuku v materiálu



Graf 19 Identifikace materiálu jednotlivých výfukových sedel v závislosti na rychlosti zvuku v materiálu

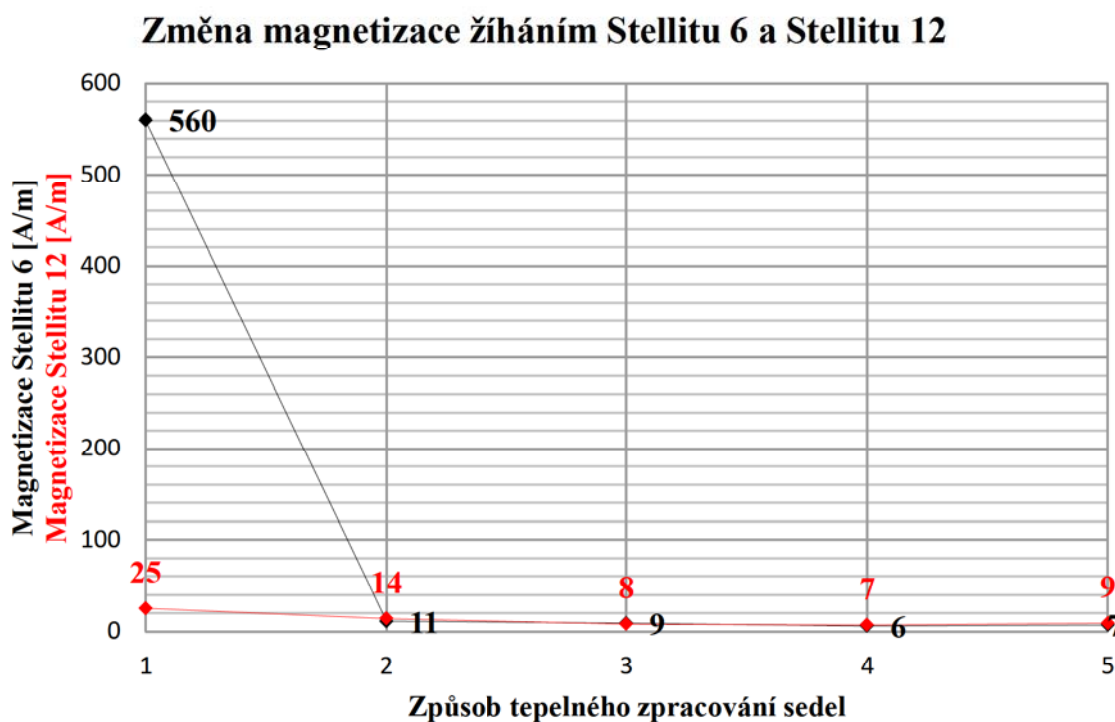


Graf 20 Identifikace materiálu jednotlivých výfukových sedel v závislosti na magnetizaci materiálu

3.6.7 Závislost magnetizace a tvrdosti Stellite 6 a Stellite 12 na době žíhání

Tab. 30 Závislost magnetizace a tvrdosti Stellite 6 a Stellite 12 na době žíhání

		1. Litý stav	2. Žíháno 900°C/2h	3. Žíháno 900°C/3h	4. Žíháno 900°C/4h	5. Žíháno 900°C/5h
Sací sedlo (Stellite 6)	HRC	37	43,7	44,7	45,2	44,6
	M [A/m]	560	11	9	6	7
Výfukové sedlo (Stellite 12)	HRC	43	50,5	51	50,7	52,2
	M [A/m]	25	14	8	7	9



Graf 22 Změna magnetizace žíháním Stellite 6 a Stellite 12

V grafu 22 jsou na vodorovné ose čísla 1 až 5 znázorněna tepelná zpracování (označení v tab. 30)

4. DISKUZE VÝSLEDKŮ

4.1 Výsledky měření aluminidů železa

Vzorek (12) FeAlCr1 vykazuje přibližně třikrát větší hodnotu magnetizace než vzorek (10) FeAlCr1, ačkoliv jsou oba vzorky stejného chemického složení, shodného způsobu zpracování a téměř stejné tloušťky (viz tab. 8). Tento rozdíl magnetizací je pravděpodobně způsoben vnitřní geometrií vzorku (povrchové trhliny). Vzorek s vyšším výskytem povrchových trhlin vykazuje vyšší hodnoty M (remanentní magnetické pole je vychylováno nad trhlinu a celkově má vyšší intenzitu).

Rychlost zvuku ve vzorcích FeAlCr1 je nižší, než rychlost zvuku v oceli. Hodnotami se blíží rychlosti zvuku s červíkovým grafitem. Vzorky aluminidů mají patrně vysokou hodnotu útlumu a proto vzorky o tloušťkách 7,67 mm a 7,81 mm ultrazvuková frekvence 10 MHz neprozvučí. Velikost zrna se pravděpodobně blíží velikosti vlnové délky λ a energie ultrazvukové vlny je tak pohlcena nebo rozptýlena do stran.

Vzorek FeAlCr2 vykazuje feromagnetismus, ale hodnota magnetizace M je několikanásobně zvýšena malou tloušťkou vzorku ($L = 1,72$ mm).

Měření ultrazvukové tloušťky vzorku FeAlCr2 nelze kvůli jeho malé tloušťce (1,7 mm) měřit frekvencemi menšími než 10 MHz, protože hodnoty rychlostí při frekvencích 2 MHz a 4 MHz nelze považovat za reálné. Měření je zatíženo „V“ efektem a mrtvou zónou sondy. Z uvedených poznatků vyplývá, že pro vzorky o tloušťkách menších než 2 mm je použitelná ultrazvuková frekvence měření 10 MHz.

Vzorek FeAlCr3 vykazuje velmi malou hodnotu zbytkového magnetismu, pravděpodobně vlivem Ti a B (netvoří feromagnetická intermetalika).

Rychlost zvuku ve vzorku FeAlCr3 je vyšší než rychlost zvuku v oceli. Materiál má patrně vysokou hodnotu útlumu, a proto ultrazvuková frekvence 10 MHz vzorek neprozvučí (velikost zrna je stejná nebo větší, než vlnová délka).

Vzorek (9) FeAlTi vykazuje přibližně šestkrát větší intenzitu zbytkového magnetismu, než vzorek (11) FeAlTi, přičemž v obou vzorcích je stejná rychlost zvuku. Tato nesrovnalost je pravděpodobně způsobena vnitřní geometrií vzorku (povrchové trhliny).

Čistý aluminid FeAl se 40 % Al ve výchozím stavu prakticky není feromagnetický. Feromagnetický se stává po žihání 450 °C/120 h. Žiháním (stárnutím) se pravděpodobně vyloučí feromagnetické precipitáty.

Vzorek (2) FeAl vykazuje velmi vysoké rychlosti zvuku. Tyto hodnoty jsou nereálné a jsou pravděpodobně způsobeny odrazem vlny od zrna nebo vady v materiálu.

Měřený vzorek FeAlC nemá feromagnetické složky. Aluminid má pravděpodobně vysokou hodnotu útlumu, protože ultrazvukovou frekvencí 10 MHz jej nelze prozvučit (hrubozrnný materiál).

4.2 Výsledky měření hliníkových bronzů (slitiny CuAl10Ni5Fe4)

Tepelné zpracování těchto bronzů výrazně ovlivňuje hodnoty modulu pružnosti v tahu, tvrdosti, pevnosti a jiných mechanických vlastností (viz grafy 1 až 3).

U vzorků slitiny CuAl10Ni5Fe4 se ve stavu po žihání při 750 °C nevyskytují ve struktuře žádné feromagnetické složky. Naopak nejvyšší hodnoty magnetizace vykazuje vzorek ve stavu po zakalení při 930 °C a stárnutí 400 °C, což je pravděpodobně způsobeno precipitací feromagnetické intermetalické sloučeniny.

Použitelná je prakticky závislost mezi tvrdostí a magnetizací pro silný stupeň magnetizace (M8). Magnetizace slitiny se zvyšuje s narůstající tvrdostí. Ze závislosti vybočují hodnoty magnetizace u vzorků po žihání 850 °C (viz graf 4).

Měřením magnetizace bude možno velice citlivě měřit stupeň vystárnutí zakalených hliníkových bronzů i při nižší magnetizaci.

Rychlost zvuku je u Al bronzů sice strukturně citlivá, ale bez jednoznačných souvislostí s hodnotami mechanických vlastností. Naměřené hodnoty proto nelze použít pro výpočet mechanických vlastností.

Monotónní není dokonce ani závislost mezi rychlostí zvuku ve slitině a modulem pružnosti v tahu (hodnoty E byly zjištěny z tahových zkoušek ve firmě COMTES FHT a.s., Dobruška). Doporučuji změřit počáteční modul pružnosti v tahu E_0 ultrazvukovou metodou na štíhlých tyčích a porovnat s hodnotami E získaných tahovou zkouškou (námět pro další absolventskou práci).

4.3 Výsledky měření kobaltových slitin (Stellitu 6 a Stellitu 12)

Měřením rychlosti zvuku a magnetizace lze jednoznačně rozlišit sedla stellitová a litinová (graf 19 a 20). Rychlost zvuku ve stellitových sedlech je vyšší, než rychlost zvuku v litinových sedlech (rychlost zvuku ve stellitu je přibližně o 100 m/s vyšší než v oceli). Hodnoty rychlosti zvuku se u stellitu s typem a stavem prakticky nemění.

V litém stavu má Stellit 6 oproti Stellitu 12 mnohonásobně vyšší magnetizaci, což je způsobeno vyšším obsahem některé feromagnetické fáze ve struktuře (viz graf 16).

Měřením magnetizace po obvodu obrobeného sedla lze metodou magnetické skvrny jednoznačně určit místo vtoku, kde hodnota magnetizace a tvrdosti je nejmenší (viz graf 17 a 18).

U stejné dávky sedel (stejného chemického složení materiálu) lze měřením magnetizace přístrojem DOMENA určit i tvrdost materiálu. U vícera dávek to však není možné, protože magnetismus každé dávky je odlišný, což je pravděpodobně způsobeno odlišným obsahem feromagnetických fází ve stellitech.

Žíháním vzrostla tvrdost Stellitu 6 a Stellitu 12, ale materiály zcela ztratily feromagnetické složky ve struktuře. Přístrojem DOMENA tak lze spolehlivě rozlišit stav vysokoteplotně žíhaný a nežíhaný (viz graf 22).

5. ZÁVĚR

Podle zásad pro vypracování diplomové práce byly splněny všechny požadavky uvedené v zadání.

V této diplomové práci byly akustickou a magnetickou metodou měřeny vzorky aluminidů, hliníkového bronzu a stelitů. Z naměřených hodnot vychází řada poznatků, které by mohly nastartovat další výzkum akustické a magnetické nedestruktivní strukturoskopie.

Pro měření přístrojem DOMENA a ultrazvukovými tloušťkoměry musejí mít vzorky optimální velikost. Průměr minimálně 20 mm a tloušťku alespoň 10 mm.

Se stoupajícím obsahem Al ve slitině aluminidu železa roste rychlost zvuku. Nejvyšších hodnot rychlostí zvuku však vykazuje aluminid železa s obsahem titanu. Vzorek FeAl se 40 % at. Al má rychlost zvuku pouze kolem 5700 m/s. Z tohoto poznatku vyplývá, že na rychlosti zvuku v materiálu se výrazně podílejí i legury a krystalické stavby slitin. Nicméně hodnoty rychlostí zvuku jednoznačně rozlišily jednotlivé skupiny aluminidů.

Slitiny ve výchozím stavu vykazují nepatrný feromagnetismus. Vyšší hodnoty magnetizace některých vzorků byly pravděpodobně zkresleny výskytem povrchových prasklin materiálu. Pouze vzorek (2) FeAl žíhaný při 450 °C po dobu 120 h je silně feromagnetický. Je to patrně způsobeno precipitací některých feromagnetických fází.

Pro vytvoření matematických modelů závislostí mechanických vlastností na hodnotách magnetizace a rychlosti zvuku je nutné předložit ucelené řady vzorků bez povrchových trhlin, s konkrétním chemickým složením a tepelným zpracováním (např. aluminidy železa s rovnoměrně vzrůstajícím obsahem hliníku od 20 % do 40 %, a odstupňovanými parametry žíhání).

Při ultrazvukovém testování hliníkového bronzu CuAl10Ni5Fe4 bylo zjištěno, že hodnota rychlosti zvuku je strukturně citlivá, avšak bez jednoznačných souvislostí s mechanickými vlastnostmi. Naměřené hodnoty proto nelze použít pro výpočet mechanických vlastností.

Z výsledků měření magnetizace slitiny CuAl10Ni5Fe4 vyplývá, že se vzrůstající tvrdostí materiálu roste i hodnota magnetizace.

U hliníkových bronzů má perspektivu magnetické měření stupně vystárnutí. Měřením magnetizace bude možno velice citlivě měřit stupeň vystárnutí zakalených hliníkových bronzů i při nižší magnetizaci.

Pro toto zkoumání bude třeba vyrobit sadu zakalených vzorků slitiny CuAl10Ni5Fe4, vystárnutých při různých teplotách a časech (možnost zadání pro absolventské práce, která by se zabývala magnetickou diagnostikou stupně vystárnutí).

Ultrazvukovým a magnetickým měřením stellitových sedel bylo zjištěno, že lze jednoznačně identifikovat sedla stellitová a litinová, protože rychlost zvuku ve stellitu je vyšší, než v litině a magnetizace litiny je mnohem vyšší, než stellitu.

Magnetickým testováním lze u stejné dávky sedel, kde je stejné chemické složení, určit i tvrdost slitiny.

Měřením magnetizace po obvodu obrobených sedel lze určit místo vtoku, kde magnetizace a tvrdost je nejmenší. Dále lze s jistotou rozlišit sedlo v litém stavu ze Stellitu 6 a ze Stellitu 12.

Žíháním ztrácí Stellit 6 a Stellit 12 feromagnetické složky ve struktuře. Lze tak rozlišit stellitová sedla v litém stavu a v žíhaném stavu (viz graf 22).

Pro další experiment je potřeba vyrobit sadu vzorků s odstupňovanou dobou žíhání od 10 minut do 2 hodin při 900 °C. Mezi výchozím stavem materiálu a žíháním při 900 °C po dobu 2 hodin není totiž jasný průběh závislosti magnetizace na době žíhání při 900 °C.

Dále by bylo vhodné RTG difrakcí analyzovat fáze, které mají za důsledek feromagnetické chování aluminidů železa, hliníkových bronzů a stellitů v litém stavu.

6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Dvořák, J.: *Akustická emise magnetických impulzů metody magnetického bodového pólu*. Technická univerzita v Liberci, Liberec 2008.
- [2] Sodomka, L., Valíček, J., Wyslych, P., Kušnerová, M.: *Základy fyziky pro aplikace, díl první*. Liberec, Ostrava 2007, ISBN 978-80-254-0153-8
- [3] Blahůšek, J.: *Přednáška 1 - 6 UT*. ATG s.r.o., 2002.
- [4] Věchet, M., Kessler, J.: *Defektoskopie v otázkách a odpovědích*. SNTL Praha, 1989, ISBN 80-03-00100-5
- [5] http://www.ddp.fmph.uniba.sk/~koubek/UT_html/G3/kap5/5-2.htm (20.12.2013)
- [6] Dubenský, R., Minařík, V., Čermák, F.: *Defektoskopie*. Ediční středisko ČVUT Praha, 1987, s.55 - 104
- [7] Obraz, J.: *Zkoušení materiálu ultrazvukem*, 1.vydání, SNTL Praha, 1989.
- [8] Skrbek, B.: *Využití interakce struktury litiny s akustickými vlnami*. In Vědecká pojednání. Technická univerzita v Liberci, Liberec 2008.
- [9] Kratochvíl, P., Skrbek, B.: *Využití interakce struktury aluminidů s akustickými vlnami*. Technická univerzita v Liberci, Liberec 2009
- [10] Draxler, K., Kašpar, P., Ripka, P.: *Magnetické prvky a měření*. České vysoké učení technické v Praze, fakulta elektrotechnická, Praha 2008, ISBN 978-80-01-03970-0.
- [11] Kopec, B.: *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí*. CERM, Brno 2008, ISBN 978-80-7204-591-4.
- [12] Vybíral, B.: *Magnetické pole v látce (Elektrodynamika II.), Studijní text pro řešitele FO a ostatní zájemce o fyziku*.
- [13] Skrbek, B.: *Metoda magnetické skvrny: teze profesorské přednášky*. Technická univerzita v Liberci, Liberec 2008, ISBN 978-80-7372-428-3.

- [14] Skrbek, B.: *Rozlišení struktur slitin železa opakovanou magnetizací*. Technická univerzita v Liberci, Liberec 2008.
- [15] Pazourek, A.: *Vliv legujících prvků na elektrický odpor technických slitin na bázi Fe-Al*. Technická univerzita v Liberci, Liberec 2011.
- [16] Karlík, M., Kratochvíl, P.: *Intermetalické fáze - nové konstrukční materiály*. Výzkumná práce VÚK, 1991.
- [17] Kratochvíl, P.: *Hutnické listy*, č.7 - 8, 1997.
- [18] Stein, F.: *Přednáška FEAL 2009*
- [19] Sláma, P., Podaný, P., Macháčková, K., Světlá, M., Macháček, J.: *Struktura a vlastnosti lisovaných tyčí ze slitiny CuAl10Ni5Fe4*. COMTES FHT a.s. Dobřany, KOVOHUTĚ ROKYCANY, Rokycany. Metal 2010, Rožnov pod Radhoštěm.
- [20] technické listy fy DELORO STELLITE
- [21] Šnajdr, M.: *Strukturní projevy degradace austenitických ventilových ocelí*. Technická univerzita v Liberci, Liberec 2006.