TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra materiálu



Elektromagnetická strukturoskopie grafitických litin a podobně disperzních kovových materiálů

Electromagnetic structuroscopy of graphite cast irons and similarly dispersional metallic materials

Doktorand:Ing. Jan DočekalŠkolitel:doc. Ing. Břetislav Skrbek, CSc.Vedoucí katedry:doc. Ing. František Stuchlík, CSc.

Anotace: Tato práce poukazuje na nepříliš rozšířený výzkum v oblasti elektromagnetické strukturoskopie grafitických litin. Shrnuje poznatky získané z experimentálních měření provedených na katedře materiálu TUL a ve Fyzikálním ústavu AVČR. Měření bylo zaměřeno na vliv tvaru odlitku, tvaru grafitu a struktury matrice litiny na magnetické nedestruktivní testování, podporované ultrazvukovým testování. Testování probíhalo na produkčních litinách ze slévárny FOCAM, s.r.o., které prezentují běžnou sériovou výrobu.

Klíčová slova: grafitická litina, nedestruktivní strukturoskopie, magnetické metody, ultrazvukové metody, mechanické vlastnosti



<u>Anotation</u>: This work adverts to not very spread research in the region of electromagnetic structuroscopy of graphite cast irons. It summarizes knowledge obtained from experimental measurements performed at Department of Material Science of TUL and at Institute of Physics of ASCR. The measurement was focused on effects of shape of graphite and cast iron matrix structure onto magnetic NDT, assisted by ultrasound measurement. Testing proceeded both on commercial cast irons from foundry factory FOCAM, Ltd.

Key-words: graphite cast iron, NDT structuroscopy, magnetic methods, ultrasound methods, mechanical properties



Prohlášení

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

Užiji-li disertační 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.

do jejich skutečné výše. Disertační práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím disertační práce.

Fakulta strojní

Datum: 23.června 2008

Podpis: Jan Dočekal

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval:

Doc. Ing. Břetislavu Skrbkovi, CSc. za podnětné připomínky, cenné rady a pomoc při orientaci v problematice a odborné vedení při vypracování disertační práce. Doc.RNDr.Janu Pickovi, CSc. z Katedry aplikované matematiky, FP, TUL za pomoc při matematickém zpracování získaných dat.

Ing. Pavlu Solfronkovi, Ph.D za odborné vedení při zkouškách tahem na Katedře strojírenské technologie, FS, TUL..

V neposlední řadě bych rád poděkoval rodičům za péči a podporu po celou dobu mého studia.

(IBE) Fakulta strojní – Katedra materiálu CHNICKÁ UNIVER

Seznam použitých zkratek:

- α součinitel přestupu tepla [Wm⁻²K⁻¹]
- α útlum amplitudy akustických kmitů [ms⁻²]
- λ vlnová délka [m]
- λ tepelná vodivost [Wm⁻¹K⁻¹]
- ρ měrná hmotnost [kgm⁻³]
- μ permeabilita [Hm⁻¹]
- μ Poissonova konstanta [-]
- A, B konstanty získané lineární regresí z dvojic hodnot M HB naměřených ze

souboru alespoň deseti vzorků konkrétního materiálu [-]

c – rychlost zvuku [ms⁻¹]

 c_L – rychlost zvuku [ms⁻¹]

- c_{L0} rychlost zvuku v ocelové matrici litiny [ms⁻¹]
- D průměr měřeného vzorku [mm]
- E modul pružnosti [MPa]
- f_r rezonanční frekvence s^{-1}
- HB tvrdost dle Brinella
- H/D štíhlostní poměr [-
- Ho intenzita vnějšího magnetického pole [Am⁻¹]
- Hr intenzita zbytkového magnetického pole [Am⁻¹]
- Hr_L intenzita zbytkového magnetického pole při tloušťce L [Am⁻¹]

Katedra

- Hr_{L12} intenzita zbytkového magnetického pole pro tloušťku 12mm [Am⁻¹]
- Ir remanentní polarizace [T]
- k_{α} konstanta []
- k_f konstanta []
- K konstanta [-]
- L tloušťka stěny [mm]
- L tloušťka prozvučované stěny [mm]
- L_U hodnota akustické dráhy [mm]
- L_{vrstva} tloušťka vnitřní vrstvy [mm]
- L_{plech} tloušťka plechu [mm]
- l velikost útvarů grafitu [mm]
- m stínící účinek

M – intenzita zbytkového magnetického pole [Am⁻¹]

 M_L – intenzita zbytkového magnetického pole dané tloušťky [Am⁻¹]

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

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

N – demagnetizační činitel

Rm – mez pevnosti [MPa]

R – velikost odrazu tlaku akustické vlny [-]

ti - vzdálenost od snímače [mm]

 $Z - vlnový odpor [MPas⁻¹]_$

 Z_g – vlnový odpor grafitu [MPas⁻¹]

 $Z_m - vlnový odpor matrice [MPas⁻¹]$

CHNICKÁ UNIVERZITA V LIB Fakulta strojní – Katedra materiálu



<u>Obsah:</u>

1 Úvod
2 Litiny9
2.1 Grafitické litiny11
2.1.1 Litina s lupínkovým grafitem GJL (LLG)13
2.1.2 Litina s kuličkovým grafitem GJS (LKG)16
2.1.3 Litina s červíkovitým grafitem GJV20
2.1.4 Legované grafitické litiny22
2.2 Srovnání české a evropské normy23
3 Metody zkoumání
3.1 Nedestruktivní metody vhodné ke zkoumání grafitických litin a podobně
disperzních materiálů26
3.1.1 Metoda magnetického bodového pólu26
3.1.2 Metoda vířivých proudů
3.1.3 Ultrazvuková metoda
3.1.4 Kombinace několika nedestruktivních metod35
4 Historie a současný vývoj ve světě
5 Zkoumaný materiál
5.1 První série odlitků
5.2 Druhá série odlitků
6 Použité přístroje a měřící metody51
7 Vzorky a metodika měření55
7.1 Volba a příprava vzorků
7.2 Systém značení vzorků
7.3 Metodika měření
8 Vytvoření křivek konstantní pevnosti pro LKG a LČG60
8.1 Vytvoření matematického modelu křivek konstantní pevnosti pro LKG a
LČG60
8.2 Aplikace výsledků na matematické modely pro výpočet isopevnostních čar
litiny s lupínkovým a kuličkovým až červíkovitým grafitem66
8.2.1 Litina s kuličkovým až červíkovitým grafitem66
8.2.2 Litina s lupínkovým grafitem68
8.3 Sjednocení modelů pro LLG, LKG a LČG70

9 Vytvoření redukčního matematického modelu pro vzorky o různém
průměru71
9.1 Redukční matematický model pro litinu s lupínkovým grafitem72
9.2 Redukční matematický model pro litiny s kuličkovým až červíkovitým
grafitem76
9.2.1 Litina s perlitickou matricí76
9.2.2 Litina s feritickou matricí77
10 Modelování tvaru a množství disperze (grafitu) v grafitických
litinách79
11 Aplikace metody magnetického bodového pólu na podobně
disperzní materiály.
11.1 Modelování degradace austenitických ventilových ocelí
11.2 Modelace sendvičového plechu91
12 Diskuze výsledků
12.1 Křivky konstantní pevnosti pro grafitické litiny
12.2 Redukční matematické modely pro kruhové vzorky
12.3 Modelování tvaru disperze a matrice100
12.4 Podobně disperzní materiály102
13 Budoucnost metody magnetického bodového pólu103
14 Závěr
Seznam použité literatury
Seznam příloh

1 Úvod

Účelem této práce je snaha o udržení kroku nedestruktivních testovacích metod s obrovským rozvojem automobilového průmyslu nejen na území České republiky, ale i v Evropě a potažmo na celém světě. I přes velký vývoj modernějších materiálů se na výrobu bezpečnostní dílů v automobilovém průmyslu stále ve velké míře využívají litiny s kuličkovým (LKG) a nebo červíkovitým grafitem (LČG). V současnosti chybí jedno úkonová nedestruktivní metoda pro popis matrice a zároveň grafitu. Doposud jsou používány pouze destruktivní statistické metody, které nedokáží postihnout sto procent výrobní produkce. Z těchto důvodů je potřeba vyvinout kontrolní metodu, která by svou jednoduchostí a rychlostí dokázala pokrýt produkci ze sta procent, neboť u odlitků z LKG a LČG je hrozba ztráty modifikačního účinku a z toho vyplývající možnost nedodržení tvaru grafitu. Při nežádoucím tvaru grafitu, lupínkový namísto kuličkového, dochází až k pětinásobnému poklesu meze pevnosti Rm. Magnetické metody umožňují vysokou produktivitu kontroly.

Při výzkumu jsou používány produkční materiály ze slévárny FOCAM s.r.o. Olomouc.

Za podpory projektu F1 = 1M/001 "VÝZKUM TECHNOLOGIE VÝROBY ODLITKŮ Z TVÁRNÉ LITINY MODIFIKACÍ VE SLÉVÁRENSKÉ FORMĚ" proběhl během řešení vývoj a realizace nového kompaktního přístroje, který sdružuje několik fyzikálně odlišných měřících metod a ulehčí tak získávání parametrů potřebných ke spolehlivému zjišťování parametrů matrice, tvaru a množství grafitu, disperze feromagnetických složek nejen v litinách.

Za podpory grantu AVČR 1QS100100508 a výzkumného záměru MSM 4674788501 probíhá mimo jiné výzkum magnetické strukturoskopie grafitických litin a podobně disperzních kovových materiálů. Disertační práce svými výsledky podporuje tuto snahu o diagnostiku matrice i "vměstků /grafitu" jen magnetickým měřením.

Zaměření a cíle doktorské práce

Práce má za cíl provést ucelený výzkum grafitických litin a podobně disperzních kovových materiálů pomocí nedestruktivních metod testování, hlavně pak metodou magnetického bodového pólu. Zjistit možné další směry výzkumu, které jsou sledovány ve světě.

- a) Vytvoření modelu isopevnostních křivek pro litinu s kompaktním tvarem grafitu a prověřit možnost slučitelnosti s modelem pro litinu s lupínkovým grafitem.
- b) S ohledem na různorodost tvaru odlitků, vytvořit redukční matematický vzorec pro měření metodou magnetického bodového pólu na odlitcích o různých průměrech.
- c) Na základě provedených měření vytvořit metodiku pro posuzování tvaru a množství disperze v grafitických litinách.
- d) Prověření možnosti aplikace metody magnetického bodového pólu na jiné materiály, než grafitické litiny.



CHNICKÁ UNIVI

Publikační činnost vztahující se k doktorské práci

DOČEKAL, J.; SKRBEK, B.; NOSEK, V.: Research of Iron Castings Diagnostics at Technical University of Liberec. In: 13th International Students'Day of Metallurgy. Leoben, ASMET - The Austrian Society for Metallurgy and Materials, 2006, s. 219-227, ISBN 3-901384-18-9.

DOČEKAL, J.; SKRBEK, B.; ANDRŠOVÁ, Z.: Teplotní stabilita měření magnetickým bodovým pólem. In: 43rd Foundry Days - 3rd International PhD Foundry Conference. Brno : VUT Faculty of Mechanical Engineering, 2006. Poster. (including CD), ISBN 80-214-3244-6.

ŠMRHA, J.; DOČEKAL, J.; SKRBEK, B.: Vector expression of cast iron structure. In: 14th International Students'Day of Metallurgy. Clausthal-Zellerfeld, 2007, s.30 – 33, ISBN 978-3-00-021019-8.

SKRBEK, B.; DOČEKAL, J.; NOSEK, V.: Vector expression of cast iron structure. In: Acta Metallurgica Slovaca. Košice, 2007, s.123 – 128, ISSN-1335-1532.

TOMÁŠ, I.; SKRBEK, B.; UCHIMOTO, T.; KADLECOVÁ, J.; STUPAKOV, O.; PEREVERTOV, O.; DOČEKAL, J.: Application of magnetic adaptive testing to cast iron. In: Acta Metallurgica Slovaca. Košice, 2007, s.129 – 131, ISSN-1335-1532.

SKRBEK, B.; DOČEKAL, J.: Přínos projektu sks ndt strukturoskopii litin. In: Výzkum a vývoj ve slévárenství, mezinárodní konference VŠB Ostrava, Rožnov p. R.: 2007, s.39-47, ISBN 978-80-248-1548-0.

DOČEKAL, J.; SKRBEK, B.: Non-destructive structuroscopy of brake and clutch disks. In: 15th international wheelset congres. Praha, 2007, CD, 4.Modern NDT-Technologies/5/s.1-10.

DOČEKAL, J.; SKRBEK, B.: Non-destructive measurement of hardness on uneven surfaces of castings. In: 44th Foundry Days - 4th International PhD Foundry Conference. Brno, 2007, s. 2/6-6/6, ISBN978-80-214-3496-7.

DOČEKAL, J.; SKRBEK, B.; NOSEK, V.: The effect of copper to mechanical and physical properties of cast iron with flake graphite. In: International student conference of department of material science. Liberec, 2007, s. 60–62, ISBN 7372-80-7372-255-5.

SKRBEK, B.; DOČEKAL, J.; TOMÁŠ, I.: Quantitative NDT structuroscopy of cast iron casting for vehicles (cars and locomotives). In: European NDT days in Prague 2007 - NDE for safety. Praha, 2007, s. 249 – 258, ISBN 978-80-3506-3.

2 Litiny

Jako litiny jsou označovány slitiny železa s uhlíkem, křemíkem a dalšími prvky, u nichž obsah uhlíku převyšuje jeho mezní rozpustnost v austenitu za eutektické teploty. K nejdůležitějším přísadám patří křemík Si, pohybující se v rozmezí 0,3 – 4%. Litiny lze proto považovat za ternární slitiny Fe-C-Si.

K popisu procesů probíhajících při chladnutí taveniny a jejich následných změn v tuhém stavu se používá graf stabilní soustavy Fe-C, obr.2.1. Tento rovnovážný diagram se uplatňuje u slitin Fe s obsahem uhlíku nad 2,11%, kdy je stabilní složkou grafit. Vliv rozmezí obsahu uhlíku a křemíku na výslednou strukturu běžného typu ocelí a litin ukazuje obr.2.2 [2].



Obr. 2.1: Diagram stabilní soustavy Fe-C [4]



Obr. 2.2: Rozmezí obsahu uhlíku a křemíku pro běžné typy ocelí a litin [8]

Základní rozdělení litin vychází ze strukturního hlediska, podle něhož rozlišujeme litiny s cementitickým eutektikem, tzv.bílé litiny a grafitickým eutektikem, tzv.grafitické litiny. V tab.2.1 je uvedeno typické chemické složení pro běžné nelegované grafitické a bílou litinu.

Tyn litiny	Chemické složení [%]					
	С	Si	Mn	Р	S	
Litina s lupínkovým grafitem	2.5-4.0	1.0-3.0	0.2-1.0	0.002-1.0	0.02-0.25	
Litina s kuličkovým grafitem	2.5-4.0	1.0-3.0	0.2-1.0	0.01-0.1	0.01-0.03	
Litina s červíkovitým grafitem	3.0-4.0	1.8-2.8	0.1-1.0	0.01-0.1	0.01-0.03	
Bílá litina	1.8-3.6	0.5-1.9	0.25-0.8	0.06-0.2	0.06-0.2	

Tab. 2.1: Chemické složení pro běžné grafitické nelegované litiny a bílou litinu

2.1 Grafitické litiny

Struktura grafitických litin je tvořena základní kovovou matricí, v níž je vyloučen grafit. Vlastnosti těchto litin ovlivňuje jak druh matrice, tak tvar, velikost, množství a rozložení částic grafitu.

Grafit se v grafitických litinách může vyskytovat jako lupínkový, pavoučkovitý, červíkovitý, vločkový či zrnitý. Přítomností grafitu v základní kovové hmotě litiny, jeho množstvím, velikostí a rozložením se snižuje efektivní nosný průřez odlitku. Při namáhání odlitku dochází ke vzniku místních koncentrací napětí, jehož špičky mohou převyšovat hodnotu jmenovitého napětí. Nejsilněji se vrubový účinek grafitu projevuje u šedé litiny, v níž je vyloučen ve tvaru lupínků. Naproti tomu je z tohoto pohledu nejvýhodnější tvárná litina se zrnitým grafitem, který porušuje spojitost matrice nejméně a působí tak nejmenším vrubovým účinkem. Vliv tvaru grafitu na tahovou křivku grafitických litin je patrný z obr.2.3 [2, 8].



Obr. 2.3: Vliv tvaru grafitu na tahovou křivku grafitických litin [8]

Struktura matrice grafitických litin ve stavu po odlití je tvořena obvykle perlitem, feritem nebo jejich směsí. S rostoucím podílem perlitu se zvyšuje pevnost, tvrdost, odolnost proti opotřebení a klesá plasticita a houževnatost. Vzrůstající množství

feritu v matrici se projevuje snížením pevnostních vlastností a u tvárné litiny i zvýšením plasticity a houževnatosti. Cementit je v grafitických litinách nežádoucí fází, protože zvyšuje jejich tvrdost a křehkost. Hodnocení tvaru a rozložení grafitu je uvedeno v normě ČSN EN ISO 945, obr.2.4 a 2.5 [10].



Obr. 2.5: Hodnocení rozložení grafitu dle normy ČSN EN ISO 945

2.1.1 Litina s lupínkovým grafitem GJL (LLG)

Šedá litina je slitina železa s uhlíkem a dalšími prvky. Obvyklé složení bývá: 2,8 až 3,6% C, 1,4 až 2,8% Si, 0,5 až 1% Mn, 0,2 až 0,6% P, max. 0,15% S. Nejdůležitější přísadou je křemík, který svým grafitizačním účinkem kompenzuje vliv manganu (karbidotvorný prvek) a zaručuje vznik grafitického eutektika i ve slabých průřezech odlitku.

Struktura šedé litiny závisí i na způsobu překrystalizace. Ta může v závislosti na rychlosti ochlazování a chemickém složení proběhnout buď podle soustavy stabilní, nebo metastabilní. Pokud probíhá krystalizace a překrystalizace v celém rozsahu podle stabilní soustavy, je matrice šedé litiny tvořena feritem v němž je uložen grafit. Proběhne-li překrystalizace úplně, nebo jen z části podle metastabilní soustavy, je struktura tvořena perlitickou, nebo feriticko-perlitickou základní hmotou, v níž jsou uloženy lupínky grafitu [8].



Obr. 2.6: Prostorové zobrazení grafitových lupínků [8]



a) leštěno, zvětšeno 100x

b) leptáno 2-5%nitral, zvětšeno 100x

Obr. 2.7: Litina s lupínkovým grafitem

Mechanické vlastnosti šedé litiny jsou nejvýrazněji ovlivňovány strukturou základní hmoty, tvarem, velikostí a rozložením grafitu. S rostoucím obsahem feritu a poklesem obsahu perlitu v základní hmotě klesá pevnost a tvrdost litiny. Přítomnost volného cementitu je nežádoucí. Při zatěžování tahem vznikají vlivem vrubového účinku grafitu již od nepatrných hodnot celkového napětí napěťové špičky na vhodně orientovaných lupenech grafitu blížící se mezi kluzu matrice a dochází k deformaci grafitových dutinek. Zatěžovací křivka se monotónně zakřivuje a nemá lineární část. Neřídí se Hookovým zákonem.

Litiny s lupínkovým grafitem mají velmi malou tažnost (pod 2%). Pevnost v tlaku je 3x až 4x větší než pevnost v tahu. Hodnoty pevnosti v tahu jsou 100 až 350MPa, tvrdost se pohybuje v rozmezí 140 až 270HB. Modul pružnosti je ovlivňován množstvím grafitu a kolísá od 80 do 150GPa [4].

	Označení litin							
Vlastnosti	EN-GJL-150 (EN-JL1020)	EN-GJL-200 (EN-JL1030)	EN-GJL-250 (EN-JL1040)	EN-GJL-300 (EN-JL1050)	EN-GJL-350 (EN-JL1060)			
	II	Základní struktura						
	feritická/	perlitická	perlitická					
Pevnost v tahu [N/mm ²]	150 až 250	100 až 300 عص	250 až 350	300 až 400	350 až 450			
Mez kluzu 0,1% [N/mm ²]	98 až 165	130 až 195	165 až 228	195 až 260	228 až 285			
Tažnost [%]	0,8 až 0,3							
Pevnost v tlaku [N/mm ²]	600	720	840	960	1080			
Počáteční modul pružnosti [kN/mm ²]	78 až 103	88 až 113	103až118	108 až 137	123 až 143			

>	iálu
T1 22 M 1 11/	ater
Tab. 2.2: Mechanicke vlastne	osti na zkusebnich kusech s odlitym prumerem 30mm

Celkově lze litiny s lupínkových grafitem rozdělit dle použití do tří skupin:

- litiny pro běžné použití
- litiny se zaručenými mechanickými vlastnostmi
- litiny s vysokou pevností

Litiny pro běžné použití jsou očkované litiny typu EN GJL-100 a EN GJL-150. Tyto litiny jsou vhodné na tenkostěnné odlitky s tloušťkou stěny od 4 do 30 mm, nebo na odlitky, u kterých se nepožaduje záruka mechanických vlastností. Používají se pro výrobu součástí pecí, kotlů, roštů, odlitky na smaltování, vodovodní tvarovky, části textilních či polnohospodářských strojů, kanálové poklopy a mříže.

Do druhé skupiny lze zařadit litiny EN GJL-200 a EN GJL-250. Jsou obvykle očkované 75 % ferosiliciem. Odlévají se z nich odlitky, u kterých se požaduje záruka mechanických vlastností (pevnost v tahu a tvrdost). Nejčastěji se používají v automobilovém a strojařském průmyslu. Jsou vhodné na převodové skříně, stojany lisů, soustruhy, frézky, motorové vložky, ozubená kola, motorové bloky, hlavy válců, písty, kompresorové válce, či řemenice.

Litiny s vysokou pevností jsou např. EN GJL-300 a EN GJL-350. Obvykle se označují jako jakostní litiny. Používají se na stojany těžkých lisů a obráběcích strojů, armatury, písty těžkých kompresorů, velká ozubená kola, či pastorky.

Označení litiny		Směrodati stěny	ná tloušťka [mm]	Tvrdost podle Brinella [HB30]	
značkou	Číšelně L	přes	do a včetně	min.	max.
EN-GJL-HB155	EN-JL2010	20	40	-	160
EN-GJL-HB175	EN-JL2020	20	40	110	185
EN-GJL-HB195	EN-JL2030	20	40	135	210
EN-GJL-HB215	EN-JL2040	20	40	160	235
EN-GJL-HB235	EN-JL2050	20	40	180	255
EN-GJL-HB255	EN-JL2060	20	40	200	275

Tab. 2.3: Tvrdost podle Brinella na odlitcích z litiny s lupínkovým grafitem

2.1.2 Litina s kuličkovým grafitem GJS (LKG)

Litina s kuličkovým grafitem (tvárná litina) krystalizuje ve stabilní soustavě, přičemž převážná část uhlíku je vyloučena jako zrnitý grafit. Složení této litiny bývá 3,4 až 3,8% C, 2,3 až 2,9% Si, 0,1 až 0,8% Mn, 0,01 až 0,04% P, max.0,05% S, 0,03 až 0,06%Mg. Modifikací vytváříme podmínky vedoucí k vyloučení požadovaného tvaru grafitu, obr.2.8 a 2.9 [2].



Obr. 2.8: Prostorové zobrazení grafitových kuliček [8]





V dnešní době je dostupné velké množství modifikačních předslitin, které jsou založeny na Mg, kovech vzácných zemin, vápníku. Při výrobě litin s kuličkovým grafitem je hlavním modifikačním prvkem hořčík. Do taveniny se přidává buď jako čistý prvek, či ve formě předslitin. Hořčík ve formě předslitin se může přidávat přímo

do pánve s taveninou, ale nevýhodou je obohacování materiálu o Ni a Cu. Aktuálně se však používají na bázi FeSi. Nepříjemné je obohacování o Si. Modifikace čistým hořčíkem je mnohem obtížnější, protože Mg má nízkou teplotu tání (650°C) a má také vysokou afinitu ke kyslíku. Musí se provádět v autoklávech pod tlakem bez přístupu vzduchu. Pánev s modifikovanou litinou má hladinu v kontaktu se vzduchem. Z těchto důvodů dochází k rychlému vyhasnutí účinku Mg. Mezi nejprogresivnější metody modifikace patří metoda "In mold", modifikace taveniny přímo ve formě. S ohledem na možné výsledné mechanické vlastnosti, kdy po správné modifikaci je mez pevnosti v tahu 500MPa a tažnost 10% a naopak po vyhasnutí účinku Mg je Rm 100MPa a A 0,5%. Z tohoto důvodu je nutná 100% kontrola! Následně se provádí očkování litiny grafitizačními očkovadly (Si), která vnášejí do taveniny dostatek zárodků pro podnícení krystalizace grafitu v tavenině, čímž lze předejít tvorbě ledeburitu při největším přechlazení.

Vlastnosti tvárné litiny se blíží vlastnostem její základní hmoty, která je feritická, perlitická či feriticko-perlitická. V porovnání se šedou litinou má tvárná litina výrazně lepší mechanické vlastnosti, zejména plasticitu a houževnatost. Má rovněž vyšší hodnotu modulu pružnosti, 160 až 180GPa. Hodnoty pevnosti v tahu jsou 370 až 800MPa, tvrdost se pohybuje v rozmezí 140 až 300HB. Tažnost se pohybuje v rozmezí 2 až 17%. Tvárná litina je brána jako přechod mezi litinou a ocelí, neboť si ve srovnání s ocelí zachovává výhodné vlastnosti grafitických litin, jako je schopnost útlumu, menší vrubová citlivost, či třecí vlastnosti [6].

Litina s kuličkovým grafitem je v současnosti nejpoužívanější litinou a za posledních 25 let postupně téměř vytlačila z běžných aplikací v dopravě ocelové odlitky. Úspory ať už ekonomické či užitné, které tato litina přinese, nejsou zanedbatelné (úspora energie při tavení, úspora kovu) a také lepší některé vlastnosti (menší měrná hmotnost, dobré kluzné vlastnosti, tlumící vlastnosti, lepší slévárenské vlastnosti, lehčí obrobitelnost apod.).

	Označení materiálu dle EN a ČSN						
Vlastnosti	GJS-350-22 (JS 1010) 42 2303	GJS-500-7 (JS 1050) 42 2305	GJS-600-3 (JS 1060) 42 2306	GJS-700-2 (JS 1070) 42 2307	GJS800-2 (JS 1080) 42 2308		
Pevnost ve střihu [N/mm ²]	315	450	450	540	630		
Pevnost v krutu [N/mm ²]	315	450	540	630	720		
Modul pružnosti E ₀ [GN/m ²]	169 ERCI	169	174	176	176		
Pevnost v tlaku [N/mm ²]	/ LIB	800 II	870	1000	1150		
Hustota [kg/dm ³]	7,1	,1	7,2	7,2	7,2		

Tab. 2.4: Vlastnosti litin s kuličkovým grafitem

Podle použití je možné rozdělit litiny s kuličkovým grafitem do třech skupin.

- litiny pro běžné použití
- litiny pro běžné použití pro práci za nízkých teplot
- litiny s nejvyšší pevností

Litiny pro běžné použití. Tyto litiny pracují i při nízkých teplotách např. EN GJS350-22, EN GJS400-15 a EN GJS400-18. Jsou vhodné na odlitky dynamicky namáhané, u kterých se požaduje záruka mechanických vlastností a hlavně vysoké plastické hodnoty i při nízkých teplotách (např. až – 50°C).

Litiny pro běžné použití pro práci za nízkých teplot. Jsou to EN GJS500-7, EN GJS600-3. Tyto litiny jsou vhodné na odlitky dynamicky namáhané, v automobilovém a strojařském průmyslu, jako jsou vačkové, klikové hřídele, dále součástky na převodové skříně, motorové vložky a ozubená kola.

Litiny s nejvyšší pevností jsou EN GJS700-2, EN GJS800-2 a EN GJS900-1. Většinou jsou to velmi mechanicky a dynamicky namáhané litiny v automobilovém a strojním průmyslu. Zvláštním typem litin s kuličkovým grafitem jsou tzv. ADI litiny. Jedná se o izotermické zušlechťování na bainit. Nejedná se o klasický bainit, ale o tzv. ausferit. Je to velmi časté tepelné zpracování právě litin s kuličkovým grafitem. Jsou vhodné pro vysokopevné odlitky, viz tab.2.5 a obr.2.10. Izotermické zušlechťování se skládá z austenitizace, rychlého ochlazení na teplotu v bainitické oblasti a dochlazení na pokojovou teplotu. Při austenitizaci se materiál ohřeje na teplotu 850 až 1000°C (tzn. nad teplotu A1,2), na které zůstává po dobu, než se struktura zaustenitizuje (1 - 3 h). Po té následuje rychlé ochlazení na teplotu izotermické přeměny (do bainitické oblasti). Následuje přemístění materiálu do solné lázně s teplotou 250 až 450 °C. Vyšší teploty způsobí vznik struktury (horního bainitu), která má nižší pevnostní vlastnosti a tvrdost, ale vyšší plastické vlastnosti, houževnatost, únavové vlastnosti apod. Při nižších teplotách pak vzniká struktura (dolního bainitu), která má vyšší pevnost, tvrdost a odolnost vůči opotřebení odlitku, ale houževnatost je menší.

Vlastnosti	EN-GJS-800-8	EN-GJS-100-5	EN-GJS-1200-2	EN-GJS-1400-1
Mez pevnosti v tahu [N/mm ²]	U08 1008 a stroiní	1000	1200	1400
Tažnost A ₅ [%]	SKA Fakult	5	2	1
Mez pevnosti v tlaku [N/mm ²]	1300	1600	1900	2200
Tvrdost [HB]	260-320	300-360	340-440	380-480
Měrná hmotnost [10 ³ kgm ⁻³]	7,1	7,1	7,1	7,1

Tab. 2.5: Hodnoty mechanických a fyzikálních vlastností litin ADI.



Obr. 2.10: Struktura ADI litiny s banickou matricí, leptáno 2-5% nital, zvětšeno 100x

2.1.3 Litina s červíkovitým grafitem GJV

Litina s vermikulárním (červíkovitým) grafitem tvoří přechodový stupeň mezi litinou s lupínkovým grafitem a litinou s grafitem kuličkovým. Vermikulární grafit představuje případ nedokonalé sféroidizace grafitu.

Vermikulární litina vznikne použitím nedostatečného množství hořčíku při výrobě tvárné litiny, použitím očkovadla na bázi céru.

Přednostmi vermikulární litiny oproti litině s lupínkovým grafitem jsou vyšší pevnost (400 až 500MPa), vyšší tažnost a ve srovnání s litinou s kuličkovým grafitem má lepší obrobitelnost, zabíhavost či schopnost útlumu vibrací a především nejlepší odolnost vůči tepelné únavě (kokily, výfukové potrubí motorů, hlavy válců).

Odolnost vůči tepelným rázům specifikuje tzv. Eichelbergův faktor EF. Jeho hodnota umožňuje vzájemně porovnávat vhodnost různých technických materiálů za normálních i provozních teplot [25].

$$\mathbf{EF} = \frac{\mathbf{Rm} \cdot \boldsymbol{\lambda}}{\boldsymbol{\alpha} \cdot \mathbf{E}} \tag{2.1}$$

kde: λ – tepelná vodivost [Wm⁻¹K⁻¹], α – součinitel přestupu tepla [Wm⁻²K⁻¹], Rm – mez pevnosti [MPa], E – modul pružnosti [MPa]. Ekonomické a technické optimum materiálů pro takto namáhané díly tvoří právě grafitické litiny s červíkovitým grafitem. Ze slitin železa mají nejvyšší hodnoty EF. Vynikající tepelná vodivost grafitu působí vysoké hodnoty λ a zároveň výrazně snižuje tuhost litin (tedy hodnotu modulu pružnosti E) ve srovnání s ocelemi.



Obr. 2.11: Prostorové zobrazení grafitových červíků [8]



Tato litina však není v České Republice normovaná. Podle DIN norem se rozeznává pouze pět druhů této litiny a to: GJV 300, GJV 350, GJV 400, GJV 450 a GJV 500. Mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tab.2.6 níže.

Vlastnosti	GJL-250	GJV-300 feritická	GJV-400 feriticko- perlitická	GJV-500 perlitická	GJS-700-2
R _m [MPa]	250	300	400	500	700
R _p 0,2 [MPa]	-	240	300	340	400
A [%]	0,3	1,5	1,0	0,5	2,0
E ₀ [GPa]	103	140	160	170	177
Mez únavy [MPa]		100	135	175	245

Tab. 2.6: Vlastnosti odlitků y litin GJL, GJV a GJS

Charakteristická kombinace vlastností předurčuje tuto litinu na výrobu tvarově složitých odlitků, pro které nepostačuje tvárná litina svými slévárenskými vlastnostmi a šedá litina svými mechanickými vlastnostmi. Další vhodné použití této slitiny je na mechanicky namáhané odlitky, které pracují v podmínkách tepelných rázů.

Hlavní aplikací litiny s vermikulárním grafitem jsou odlitky pro automobilový průmysl (hlavy válců, výfuky, ventilová pouzdra, pístové kroužky, bloky válců).

2.1.4 Legované grafitické litiny

Podobně jako u ocelí, je možné přísadou dalších prvků dosáhnout i u litin specifických vlastností. Vzhledem k přítomnosti grafitu v základní hmotě litiny mají však přísadové prvky u litin menší význam než u ocelí. Přísadou legovacích prvků se snažíme dosáhnout zlepšení mechanických vlastností litinových odlitků, nebo dosažení výhodnějších fyzikálních či technologických vlastností.

U grafitických litin se přidáním legujících prvků Cr, Mo, Ni a Cu zlepšují mechanické vlastnosti [1].

2.2 Srovnání české a evropské normy

ČSN obsahují mezní hodnoty Rm pro danou tloušťku stěn a zároveň závazné tvrdosti HB, přičemž jednotlivé tolerance se vzájemně překrývají.

EN uvádí dvě řady jakostí litin. Za prvé litiny se zaručenou pevností Rm a za druhé litiny se zaručenou tvrdostí HB. Což ve výsledku znamená, že EN striktně sleduje buď mez pevnosti v tahu nebo tvrdost dle Brinella na rozdíl od ČSN. Například EN dělí normy litin podle Rm (GJL 250) bez vazby na HB a podle intervalu HB (GJL 155HB) bez záruk Rm! To znamená, že litiny se zaručenou Rm dle EN se využívají u konstrukčních dílů a pro litiny s garantovanou tvrdostí HB je hlavní kritérium obrobitelnost.

Proto přechod od ČSN k EN může znamenat pro odběratele velký ústup od jakosti. Kdy například u litiny ČSN 422305 (GJS 500) je stejná pevnost zaručena jak pro samostatně odlité tyče daného průměru, tak i ve stěně odlitku o ekvivalentní tloušťce stěny. Naopak EN uvádí tři stupně, kdy pevnost 500MPa je zaručena pouze na tyči odlité zvlášť. Na tyči přilité k odlitku je garantovaná pevnost již o 20-30MPa nižší a na tyči získané přímo z odlitku je pokles zaručené pevnosti prakticky o třídu níže.

EN i ČSN uvádí informativní hodnoty modulu pružnosti E. ČSN přiřazuje každé jakosti litiny konkrétní hodnotu počátečního modulu Eo, kdežto EN pouze toleranční pásmo hodnot E s poznámkou, že konkrétní hodnota závisí na mechanickém napětí.

3. Metody zkoumání

Nedestruktivní testování (NDT) se skládá ze dvou základních oblastí, a sice z defektoskopie a strukturoskopie.

Defektoskopie se zabývá zjišťováním povrchových a vnitřních vad, které porušují celistvost materiálu. Ke vzniku vady může dojít nejen v technologickém výrobním procesu, ale samozřejmě i v provozu (degradačními procesy, náhodným přetížením). Vadou výrobku se obecně rozumí každá odchylka složení, struktury a vlastností výrobku od jeho charakteristik předepsaných technickými podmínkami nebo normami.

Zkušební defektoskopické metody jsou založeny na indikaci změn fyzikálních veličin (intenzity pronikaného záření, rozptylu magnetického toku aj.), které vznikají na nespojitostech prostředí (materiálu zkoušeného předmětu). Jedná se o metody prozařovací, ultrazvukové pro zjišťování vnitřních vad a magnetické práškové, vizuální a další ke zjišťování vad povrchových či těsně podpovrchových.

Strukturoskopie, neboli bezdemontážní diagnostika struktury je založena na souvislostech mezi fyzikálními vlastnostmi a strukturně-mechanickými parametry materiálu. Zabývá se zjišť ováním struktury a složení materiálu. V průmyslu se používají metody vířivých proudů (pro hodnocení železných i neželezných slitin) a impulsní magnetické metody (pro hodnocení feromagnetických slitin). K tomuto účelu se využívají metody akustické, vířivých proudů a magnetické. Ve specifických oblastech výroby jako je například slévárenství je její význam pro výrobu kvalitního finálního výrobku (litinových odlitků) více než nezbytný [11, 12].

Obor nedestruktivního zkoušení (NDT) má v jednotlivých státech vlastní organizační strukturu. Pevný řád kvalifikace pracovníků (EN 473) způsobilých provádět zkoušení, jednoznačnou terminologii, požadavky na certifikaci měřící techniky a způsobilost zkušebních pracovišť i laboratoří v jednotlivých zkušebních metodách předepisuje na 114 státních norem. V souvislosti se vstupem do EU probíhá intenzivní normalizační přizpůsobování, takže většina norem má označení ČSN EN (ISO) s tří až pětimístným číslem. Původní a pro nás ještě přehledná struktura šestičíslí ČSN se uvádí jenom jako doplňkové orientační označení. Je však nesmírně důležitá, neboť tvoří přehlednou strukturu, v které se může technik spolehlivě orientovat, na rozdíl od

náhodného systému značení čísel norem EN, ISO. Během posledních tří let stouplo množství přijatých EN norem ze 114 na 182.

Těchto 182 norem ošetřuje následující metody zkoušení (tučné tvoří mezinárodní označení):

MT – magnetická prášková PT – kapilární ET - vířivých proudů LT – hledání těsnosti RT – radiografické VT – vizuální UT – ultrazvukem. AE –akustická emise

Většina z nich má obecný charakter nebo se zabývá zkoušením ocelových svarů, trub, tlakových nádob, tyčí, výkovků apod.. Tyto normy se zabývají klasickou defektoskopií, tedy technikami hledání a prezentacemi vad spojitosti. Ve slévárenství se uplatňují a předmětem přejímacích podmínek jsou metody RT a UT pro vnitřní vady a MT s PT pro povrchové vady.

Nedestruktivní strukturoskopie z uvedeného pohledu norem zůstává stranou, bez sjednocujícího prvku. Ve specifických případech, zejména ve slévárenství litin však její význam pro výrobu kvalitního finálního odlitku převažuje nad defektoskopií. Strukturoskopie kvantifikuje vztah mezi fyzikální nedestruktivně měřenou veličinou a mechanickou vlastností, metalografickým parametrem struktury nebo napětím (mechanickým).

3.1 Nedestruktivní metody vhodné ke zkoumání grafitických litin a podobně disperzních materiálů

3.1.1 Metoda magnetického bodového pólu

Atomy železa jsou nositeli výsledného magnetického momentu. Tento moment vznikne složením příspěvku od spinových a orbitálních pohybů. Pod Curieho teplotou dojde u ocelí a litin ke vzniku magnetického uspořádání spojeného se vznikem určitých oblastí, které se s časem nemění, tzv. magnetické domény. Tyto magnetické domény tvoří jakési subzrna ve struktuře materiálu.

Polarizací vnějším magnetickým polem dochází k růstu domén posunem tzv. Blochových zón s polarizací shodnou s vnějším magnetickým polem, nebo dochází ke skokové změně polarizace tzv. Barkhausenovými přeskoky, obr.3.1. Nejdříve se orientují domény s blízkou orientací a naposled s opačnou orientací. Výsledkem je jedna magnetická doména, která je orientovaná ve směru vnějšího magnetického pole [26].



Obr. 3.1: Interakce struktury s vnějším magnetickým polem

Po zániku vnějšího magnetického pole se nevrátí všechny domény do původního stavu. Poruchy krystalové mřížky (dislokace) a překážky (atomy uhlíku, cementit Fe₃C a martenzit) tomuto návratu brání. Vzniká tak remanentní polarizace Ir. Zmagnetované místo má vlastní magnetické pole o intenzitě Hr. Proto prvky struktury, které obsahují

Fe₃C a martenzit vykazují vysokou remanentní polarizaci Ir. Demagnetizační činitel N charakterizuje vnější i strukturní geometrické poměry rozhraní feromagnetika. Strukturní poměry matrice litin lze proto hodnotit velikostí intenzity zbytkového magnetického pole.

$$\mathbf{Hr} = \mathbf{Ho} - \frac{\mathbf{N} \cdot \mathbf{Ir}}{\mu}$$
(3.1)

kde: μ – permeabilita [Hm⁻¹], Ho – intenzita vnějšího magnetického pole [Am⁻¹], N – demagnetizační činitel, Hr – intenzita zbytkového magnetického pole [Am⁻¹], Ir – remanentní polarizace [T].



Obr. 3.2: Schéma příložné sondy s Hallovým snímačem

Při měření metodou magnetického bodového pólu se nejprve zmagnetizuje povrch zkoušeného materiálu příložnou sondou, obr.3.2, jejíž magnetizační cívka je napájena trojúhelníkovitými impulsy opačné polarity. Hallův snímač, který je umístěný v ose cívky na povrchu čela sondy, změří intenzitu zbytkového pole měřeného místa po předposledním impulsu, který je kladný. Následuje poslední záporný impuls, po jehož ukončení se opět změří intenzita zbytkového pole měřeného místa. Absolutní součet kladné a záporné intenzity zbytkového pole se ukáže na displeji měřícího přístroje. Tímto způsobem se dosáhne reprodukovatelných hodnot zmagnetování měřeného místa a eliminuje se nepříznivý vliv rušivých magnetických polí.

Metody používané v Rusku a České republice se právě zásadně odlišují v charakteristikách magnetizace a tím i v cíli aplikací. V Rusku měří normálný gradient Hrn po jednosměrné magnetizaci. Přístroje řady DOMENA 1-3 měří absolutní hodnotu Hrn jako součet Hrn po dvou magnetizačních pulzech opačné polarity. Snímačem Hr může být Hallova nebo Főrsterova sonda. Příspěvek dHri jednotlivých zrn feromagnetika na výsledné hodnotě Hr závisí na stínícím účinku m a jejich vzdálenosti ti od snímače.

$$\mathbf{Hr} = \sum \mathbf{m} \cdot \mathbf{ti} \cdot \mathbf{dHri} \tag{3.2}$$

kde: m – stínící účinek, ti – vzdálenost od snímače [mm].

S hloubkou průniku magnetizačního pole klesá vliv jednotlivých zrn na Hr. V praxi do t=12mm. V tenčích stěnách se tak energie pulsu soustředí do menšího objemu zrn. Hodnota Hr do hodnoty L_{kri} roste podle experimentálně stanoveného modelu.

$$Hr_{L}^{de} = Hr_{L12} \cdot (81 \cdot L^{-3} + 1)$$
(3.3)

kde: L – tloušťka stěny [mm], Hr_L – intenzita zbytkového magnetického pole při tloušťce L [Am⁻¹], Hr_{L12} – intenzita zbytkového mag. pole pro tloušťku 12mm [Am⁻¹].

Slitiny železa (oceli a litiny) tvoří spektrum nejrozšířenějších konstrukčních materiálů. Feromagnetické vlastnosti lze přiřadit jejich drtivé většině. Znalost hodnot mechanických vlastností v kriticky namáhaném místě u exponovaných dílů převládá nad potřebou integrální informace o vybrané mechanické vlastnosti. Z těchto důvodů má lokální magnetická strukturoskopie významné postavení ve spektru ostatních metod. Aplikační rozšíření nalezla ve formě impulsní magnetické kontroly hlavně v Rusku a Čechách.

Vysoká produktivita kontroly s cílenou vysokou citlivostí ke kontrolovanému strukturnímu parametru. Kontrola stavu rekrystalizace za studena tvářených výrobků – anizotropie. Měření mechanických vlastností po žíhání. Odlišný způsob měření pro zušlechtění. Eliminace vlivu oddálení – měření přes vrstvy až 3mm tlusté. Přístroje ve výrobních linkách plochých výrobků. V západní Evropě se pro tuto oblast materiálů využívá výhradně metod ET. Střídavé vířivé proudy však popisují více povrchové partie součástí. Pro výrobky ve formě tvářených polotvarů a odlitků s neupravenými povrchy se lépe hodí lokální magnetická strukturoskopie.

Přístroj DOMENA B3 umožňuje stanovit a přímo na displeji ukazovat hodnoty tvrdosti, pevnosti, hloubku prokalení. Tedy všech vlastností, které závisí na množství a disperzi magneticky tvrdých strukturních složek jako perlit, cementit, bainit...

Aby přístroj zobrazoval v měřícím režimu přímo hodnotu tvrdosti, je nezbytné před započetím měření vložit do paměti přístroje převodní lineární vztah mezi remanencí M a tvrdostí HB ve tvaru:

$$\mathbf{HB} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{M} + \mathbf{B} \tag{3.4}$$

kde: A, B – konstanty získané lineární regresí z dvojic hodnot M – HB naměřených ze souboru alespoň deseti vzorků konkrétního materiálu [-], HB – tvrdost dle Brinella [-], M – intenzita remanentního magnetického pole $[Am^{-1}]$.

Tento vztah je platný pouze pro materiály, u nichž je měřená tloušťka větší než 15 mm.

Převodní vztah mezi remanencí M a tvrdostí HB pro měření na tenké stěně:

$$\mathbf{H}\mathbf{B} = \frac{\mathbf{A} \cdot \mathbf{M}_{\mathrm{L}}}{\mathbf{a} \cdot \mathbf{L}^{-b} + 1} + \mathbf{B}$$
(3.5)

kde: A, B – konstanty [+], HB $\stackrel{\sim}{=}$ tvrdost dle Brinella [-], M_L – intenzita remanentního magnetického pole dané tloušťky [Am⁻¹], L – tloušťka stěny [mm].

Tento vztah je narozdíl od vztahu platný pro materiály, kde měřená tloušťka není větší než 15mm.

3.1.2 Metoda vířivých proudů

Střídavé magnetické pole cívky zkušebního přístroje indukuje v povrchu výrobku střídavé proudy, jejichž hustota je závislá i na vodivosti materiálu výrobku. Vady v povrchových vrstvách vodivost místně zhoršují, což se zpětně projevuje změnou elektrického napětí na cívce.



Obr. 3.3: Měření povřchových vrstev metodou vířivých proudů

Vířivé proudy jsou tvořeny při elektromagnetické indukci. Když střídavý proud prochází vodičem, jako například měděným drátem, vytváří se kolem vodiče magnetické pole. Velikost tohoto magnetického pole závisí na velikosti protékajícího proudu. Jestliže se další elektrický vodič dostane do takovéhoto magnetického pole, pak se v tomto vodiči bude indukovat proud. Vířivé proudy jsou indukované elektrické proudy tekoucí po kruhové dráze

Testování pomocí vířivých proudů je používáno v různých průmyslových odvětví pro hledání defektů a dalších měření. Hlavní význam metody leží v odhalování defektů, pokud je dobře známa jejich povaha. Obvykle se metoda používá pro vyšetření poměrně malých oblastí. Vířivé proudy mají sklon soustředit se na povrchu materiálu a tudíž mohou být užívány jen pro odhalení povrchových a podpovrchových vad. V tenkých materiálech jako například trubky vířivé proudy mohou být užívány pro změření tloušťky materiálu.

Vířivé proudy jsou také ovlivněny elektrickou vodivostí a magnetickou permeabilitou materiálů. Proto se pomocí nich mohou třídit materiály a rozeznávat, zda materiál přišel do styku s vysokou teplotou nebo byl tepelně zpracován, což změnilo jeho vodivost [9].

Vířivé proudy mohou být použity pro mnoho různých aplikací jako například odhalení trhlin (nespojitostí), měření tloušťky kovů, detekce ztenčování kovů způsobené

korozí a mechanickým opotřebením, stanovení síly nátěru a měření elektrické vodivosti a magnetické permeability. Testování pomocí vířivých proudů je vynikající metoda pro odhalení povrchových a podpovrchových vad, když známe pravděpodobnou polohu a orientaci defektu. Defekty jsou odhaleny, když naruší dráhu vířivých proudů a zeslabí jejich sílu.

Ovšem, faktory jako typ materiálu, povrchová úprava, stav materiálu, konstrukční typ sondy a mnoho jiných může ovlivnit citlivost testování.

3.1.3 Ultrazvuková metoda

Při zkouškách ultrazvukem se využívá odrazu ultrazvuku na rozhraní dvou prostředí, jako jsou póry, trhliny, dutiny apod.. Používají se podélné a nebo příčné ultrazvukové vlny o frekvencích 1 až 10 MHz. Podélné ultrazvukové vlny se mohou šířit v tuhých, kapalných i plynných látkách, zatímco ultrazvukové vlny příčné pouze v látkách tuhých. Rychlost šíření podélných ultrazvukových vln v oceli je 5800m/s, přičemž příčné mají řádově poloviční rychlost šíření.

Prostupnost akustických vln materiálem klesá s útlumem hmoty matrice a zejména s množstvím a velikostí vnitřních nespojitostí. Za nespojitost lze považovat inkluze se značně odlišným vlnovým odporem Z vůči matrici [12, 25].

$$\mathbf{Z} = \mathbf{c} \cdot \mathbf{\rho} \tag{3.6}$$

kde: Z – vlnový odpor [MPas⁻¹], e – rychlost zvuku [ms⁻¹], ρ – měrná hmotnost [kgm⁻³].

Čím větší je rozdíl akustických odporů Zm a Zg, tím větší je množství a velikost odrazu R tlaku akustické vlny z rozhraní zpět.

$$\mathbf{R} = \frac{\mathbf{Z}_{g} - \mathbf{Z}_{m}}{\mathbf{Z}_{g} + \mathbf{Z}_{m}}$$
(3.7)

Pro ocelovou matrici litiny platí..... $Z_m = 5,92 \cdot 7,2 = 46,2MPa \cdot s^{-1}$ Pro grafit přibližně platí..... $Z_g = 2 \cdot 2 = 4MPa \cdot s^{-1}$

kde: R – velikost odrazu tlaku akustické vlny [-], Z_g – vlnový odpor grafitu [MPas⁻¹], Z_m – vlnový odpor matrice [MPas⁻¹].

Rozhraní matrice - grafit odrazí R= 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 pak závisí na labyrintu grafitických útvarů. Čím více útvary matrici oslabují (čím jsou štíhlejší), tím větší je hodnota akustické dráhy Lu ve srovnání s přímou dráhou (tloušťkou prozvučované stěny) L. Rychlost zvuku c_L tak klesá.

$$\mathbf{c}_{\mathrm{L}} = \mathbf{c}_{\mathrm{L0}} \cdot \frac{\mathbf{L}}{\mathbf{L}_{\mathrm{U}}} = 5920 \cdot \frac{\mathbf{L}}{\mathbf{L}_{\mathrm{U}}}$$
(3.8)

kde: c_L – rychlost zvuku [ms⁻¹], c_{L0} – rychlost zvuku v ocelové matrici litiny [ms⁻¹], L – tloušťka prozvučované stěny [mm], L_U – hodnota akustické dráhy [mm].

Pokud dochází v rychleji ochlazované části odlitku k metastabilní krystalizaci eutektika (to znamená, že uhlík na místo vyloučení jako grafit se váže na železo ve formě karbidu Fe₃C a vylučuje se jako tvrdý ledeburit) existuje v šíření akustické vlny odlitkem méně překážek a tudíž hodnota rychlosti zvuku s rostoucím množstvím ledeburitu ve struktuře roste. Útlum amplitudy akustických kmitů α výrazně roste pokud délka vlny λ se blíží velikosti útvarů l grafitu. cká u

$$\alpha = \mathbf{k}_{\alpha} \cdot \mathbf{l} \cdot \left(\frac{\mathbf{c}_{\mathrm{L}}}{\lambda}\right)^{2}$$
(3.9)

kde: α - útlum amplitudy akustických kmitů [ms⁻²], k_{α} – konstanta [-], l – velikost útvarů grafitu [mm], $\lambda - v lnová délka [m], c_L - rychlost zvuku [ms⁻¹].$

Hodnota α=0,05 pro oceli umožňuje prozvučovat i metrové tloušťky stěn. Grafit výrazně útlum zvyšuje. Pro LLG dosahuje α hodnot řádově vyšších, což velmi omezuje detekci vad. Většinu odlitků lze charakterizovat vlastní rezonanční frekvencí fr, která je funkcí modulu pružnosti E (popisuje tvar grafitu), měrné hmotnosti (množství grafitu) a geometrické štíhlosti H/D. Frekvence f_r se nalézá obvykle ve slyšitelném rozsahu.
$$\mathbf{f}_{r} = \mathbf{k}_{f} \cdot \left(\frac{\mathbf{E}}{\boldsymbol{\rho}}\right)^{0.5} \cdot \frac{\mathbf{D}}{\mathbf{H}^{2}}$$
(3.10)

kde: f_r – rezonanční frekvence [s⁻¹], k_f – konstanta [-], E – modul pružnosti [MPa], H/D – štíhlostní poměr [-], ρ – měrná hmotnost [kgm⁻³].

Hodnota E závisí přímo na velikosti rychlosti zvuku c_L a tedy na tvaru a množství grafitu.

$$\mathbf{c}_{\mathrm{L}} = \left(\frac{\mathbf{E} \cdot (\mathbf{1} - \boldsymbol{\mu})}{\rho \cdot (\mathbf{1} + \boldsymbol{\mu}) \cdot (\mathbf{1} - \mathbf{2} \cdot \boldsymbol{\mu})}\right)^{0,5}$$
(3.11)

kde: c_L - rychlost zvuku [ms⁻¹], E – modul pružnosti [MPa], μ - Poissonova konstanta [-], ρ – měrná hmotnost [kgm⁻³].

Úpravou (3.11) lze získat zjednodušený výraz

$$\mathbf{E} = \left(\mathbf{K} \cdot \frac{\mathbf{L}}{\mathbf{L}_{v}}\right)^{2}$$
(3.12)

kde: L – skutečná síla stěn [mm], Lu - měřená ultrazvukem [mm], E – modul pružnosti [MPa], K - konstanta [-].

Ultrazvukové zkoušky je možné podle uspořádání rozdělit na metodu průchozí a odrazovou.

Metoda průchozí je založena na měření ultrazvukové energie, která projde zkoušeným předmětem. Pracuje se dvěma sondami, vysílací a přijímací, které jsou umístěny proti sobě, což je jedna z nevýhod této metody. Tuto metodu lze využít pouze pokud je stěna předmětu přístupná z obou stran. Pokud je v materiálu vada, ultrazvukové vlny se od ní odrážejí. Za vadou se vytváří stín. Metoda je vhodná pro zkoušení menších tlouštěk.

Metoda odrazová využívá odrazu ultrazvukových vln od protější stěny a od vnitřních vad materiálu [2].



Obr. 3.4: Impulsní odrazová metoda. a-uspořádání, b-výstup osciloskopu, 1-vysílací a



Obr. 3.5: Průchozí metoda: a-materiál bez vad;b,c-materiál s vadou;1-vysílací sonda, 2-přijímací sonda

Přenos signálu ze snímače do vzorku je nutné zajistit vhodným médiem, neboť se na vzduchu většina energie odráží a docházelo by ke zkreslení. Jako médium se používá voda, olej, nebo glycerin.

Zkoušení ultrazvukem se uplatňuje především při kontrole vnitřních vad velkých výkovků, vývalků, odlitků, či svarů.



Obr. 3.6: Přenosné UT přístroje



Obr. 3.7; Ultrazvukové tloušťkoměry

3.1.4 Kombinace několika nedestruktivních metod

V současné době je možné měření hodnot ultrazvuku, rozměrů a intenzitu remanentního magnetického pole zjednodušit a urychlit využitím kompaktní přístroj TELIT, který sdružuje pomocí PDA ultrazvukový tloušťkoměr, přístroj DOMENA a posuvné měřítko k měření základních veličin L, Lu M, k výpočtu a vyjádření výše popsaných vlastností a skutečností. Je používán například slévárnou SKS Krnov.

Tento přístroj by měl ulehčit získávání parametrů potřebných ke spolehlivému zjišťování tvaru a množství disperze (grafitu) v litinách.

Zařízení pro nedestruktivní stanovení kvality materiálu pod typovým označením TELIT, je výsledkem vývoje v rámci projektu F1-1M/01, podle užitného vzoru CZ17380 (obr.3.8).







Obr. 3.9: Schéma přístroje TELIT: 1... vektor struktury, 2...kotouč, 3...tloušťka kotouče, 4...tuhost litiny 5... impulsní magnetický tvrdoměr, 6...magnetický snímač, 7...složka (tvrdost) matrice litiny, 8...ultrazvukový tloušťkoměr, 9...ultrazvuková sonda, 10...sdružovací jednotka (PDA)

4. Historie a současný vývoj ve světě

Z dostupných pramenů je patrné, že počátky této problematiky pocházejí z Německa. V současnosti se pulsní magnetickou metodou zabývají především v Institutu Aplikované Fyziky Běloruské akademie věd a to již posledních 30 let. Metoda je založena na místním působení pulsního magnetického pole na testovaný výrobek a měří se intenzita remanentní magnetizace. Je aplikována na měření tvrdosti, meze pevnosti, meze kluzu, prodloužení či zúžení válcovaných výrobků z nízkouhlíkových a nízkolegovaných ocelí. Jsou používány přístroje IMA ke stacionárnímu měření a přístroje IMPOK k měření pohybujících se plechů ve výrobní lince. Jsou používány v mnoha hutních podnicích v Rusku, Ukrajině, Japonsku či firmou EKO v Německu a VSŽ Košice na Slovensku.

Zde se ovšem zabývají měřením tvrdosti na zakalených a vysoce popuštěných ocelích, mechanických vlastností a struktury válcovaných ocelových plechů z nízkouhlíkové či nízkolegované oceli o tloušťce 0,15 až 4mm. Tuto metodu aplikují do technologického procesu výroby válcovaného ocelového plechu.

Na zkoušené místo výrobku působí pulsní magnetické pole o intenzitě Hm. Podle velikosti gradientu ∇ Hrn intenzity pole zbytkového magnetizmu, dříve stanoveného vztahu mezi ∇ Hrn a mechanickou vlastností se stanovují konkrétní hodnoty potřebné pro výrobní kontrolu.

Některé v současnosti používané přístroje:

IMA(impulsní magnetický analyzátor) – je určen pro kontrolu tvrdosti, Rm, Rp a A plochých za studena tvářených ocelí do tloušťky 4mm po žíhání. Umožňuje automatický výběr optimální amplitudy magnetizace pro potlačení vlivu oddálení. To umožňuje měřit bez rušivých účinků různých vrstev do 3mm [18].

IMPOK – přístroje zabudované ve výrobních linkách na výrobu ocelových plechů jsou použitelné pro tloušťky od 0,15 do 15mm, pohybující se rychlostí 0,15 až 25m/s. Používají se pro oceli s nízkým obsahem C, a to do 0,15%. Společným znakem těchto přístrojů je impulsní periodická magnetizace z dvou protilehlých sond nad oběma povrchy. Tento přístroj je aplikovatelný pouze jako součást linky, protože jeho hmotnost se pohybuje u nejjednodušších verzí od 68kg až po 150kg u verzí speciálních [17].



Obr. 4.2: Schéma zařazení přístroje IMPOK-1 do výrobní linky na žárové zinkování 1-cívky s plechem, 2-ořez, 3-svařovací jednotka, 4-vstupní dopravník, 5-ohřívací pec, 6žíhací pec, 7-chlazení vzduchem, 8-zinková lázeň, 9-vstup, 10-značení, 11-chlazení vzduchem/vodou, 12-hlavní kontrolní panel s počítačem pro zpracování dat z IMPOK-1, 13-výstupní dopravník, 14-dokončovací válcování, 15-ohýbání, 16-IMPOK-1, 17pasivace povrchu, 18-konzervace, 19-ořez, 20-navíjecí bubny



Obr. 4.3: Možné uspořádání přístroje IMPOK

a)1-magnetizační hlava, 2-měřící hlava, 3-stacionární nemagnetický hřídel, 4nemagnetický rotační válec, 6-pomocné válce, 7-stínění b) 1, 2-převodník, 3, 4magnetizační cívka, 5, 6-snímač

ELLIPS – Určeny pro součásti s výraznou anizotropií, texturou a svary. Umožňují namagnetovat povrch jen v úzkém pásu. Změřená informace tak přísluší určité orientaci struktury.

Ovšem aplikací magnetického bodového pólu na litiny či podobně disperzní materiály se zabýváme pouze na katedře materiálu TUL. V žádném z dostupných zdrojů není zmínka o aplikaci metody magnetického bodového pólu na litiny.

Testováním grafitických litin se tak ještě zabývají na oddělení magnetismu, Fyzikálního ústavu AVČR, jmenovitě RNDr. Ivan Tomáš, CSc. Zde je však používána metoda MAT - Magnetické adaptivní testování a BHN - Barkhausenův šum. Magnetické hysterezní testování je tradiční metoda materiálového nedestruktivního testu strukturní degradace feromagnetických materiálů, která se opírá o pozorovanou změnu parametrů majoritní (od saturace do saturace) magnetické hysterezní smyčky v závislosti na stupni degradace. Jak je ukázáno v [20] a v řadě následujících aplikačních prací (viz např. [21], [22], [23]), lze jednoduchým způsobem tradiční hysterezní metodu optimalizovat. Základní myšlenkou takové optimalizace je fakt, že namísto obvykle používaných několika málo parametrů majoritní hysterezní smyčky (např. koercitivita HC, remanence BR, maximální permeabilita m_{MAX}) je sledována závislost na degradaci materiálu u celého komplexního souboru hysterezních dat, tak jak je tento soubor dat v tomto smyslu považován za komplexní v Preisachově teorii hystereze [24]. Příkladem takového komplexního souboru je systém minoritních hysterezních smyček od nejmenších amplitud až po smyčku majoritní. Test je pak optimálně adaptován na studovaný materiál a na studovanou degradaci v rámci metody Magnetického adaptivního testování (MAT) tak, že z velkého množství existujících magnetických degradačních funkcí daného testu jsou vybrány a použity ty, které jsou pro daný test nejcitlivější nebo i jiným způsobem nejvhodnější. Magnetické hysterezní testy a tedy i MAT dovedou - mimo jiné - velmi citlivě reagovat na přítomnost i malého objemu feromagnetické fáze v paramagnetickém vzorku (viz např. [22]), nebo i na přítomnost malého objemu feromagneticky měkké fáze v materiálu magneticky tvrdším.

LIBER Fakulta strojní – Katedra materiálu HNICKÁ UNIVERZITA

5. Zkoumaný materiál

Pro splnění cílů disertační práce a jejich možnou použitelnost v reálné výrobě byla důležitá otázka volby testovaného materiálu. K testování byla zvolena grafitická litina běžné produkce slévárny Focam s.r.o. Olomouc. Jednalo se o dvě série odlitků ve tvaru Y-bloků. V první fázi byly dodány litiny s kuličkovým až červíkovitým grafitem a feritickou až perlitickou matricí. A následně tavby s grafitem lupínkovým a matricí perlitickou, u nichž se významně lišil obsah mědi.

5.1 První série odlitků

V první fázi byly dodány čtyři různé tavby litin s kuličkovým až červíkovitým grafitem. Materiál byl dodán v podobě Y-bloků, obr.7.1. Tyto odlitky byly označeny 1Y, 3Y, 4Y a 5Y. Chemické složení viz.tab.5.1.

Označení	Chemické složení [%]							
tavby	С	Mn	Si	S	Cu	Cr	Mg	Р
1Y	3,41	0,25	2,20	0,014	1,00	0,06	0,045	
3 Y	3,46	0,26	2,12	0,014	0,05	0,07	0,019	0,02
4 Y	3,63	0,26	2,44	0,022	1,01	0,04	0,016	0,03
5 Y	3,30	0,25	2,45	0,016	0,04	0,05	0,046	0,02
		DI						

Tab. 51: Chemické složení taveb 1Y, 3Y, 4Y a 5Y

Pomocí metalografického rozboru byly získány informace o struktuře dodaných odlitků, viz.popis struktury a obr.5.1 - 5.8.

<u>Tavba 1Y</u>

Tavba 1Y má perlitickou strukturu (P96-98%) s kuličkovým grafitem. Tvaru GVI a velikosti 5 z 80%, zbytek GV.



Obr. 5.1: Tavba 1Y – leštěno, zvětšeno 100x, 1dílek ~ 10 μ m



Obr. 5.2: Tavba 1Y – leptáno, Nital 3-5%, zvětšeno 100x, 1dílek ~ 10µm

<u>Tavba 3Y</u>

Tavba 3Y je feriticko perlitická (P15-20%), grafit je červíkovitý GIII velikosti 5 z 90-100% a kuličkový GVI do 10%.



Obr. 5.4: Tavba 3Y – leptáno, Nital 3-5%, zvětšeno 100x, 1dílek ~ 10µm

Tavba 4Y

Struktura matrice je perliticko feritická (P70-80%) s červíkovitým grafitem GIII velikosti 5 – 6 z 65-85% a kuličkovým GVI z 15-35%.



Obr. 5.5: Tavba 4Y – leštěno, zvětšeno 100x, 1dílek ~ $10\mu m$



Obr. 5.6: Tavba 4Y – leptáno, Nital 3-5%, zvětšeno 100x, 1dílek ~ 10µm

<u>Tavba 5Y</u>

Má feriticko perlitickou strukturu matrice (P25-30%). Grafit GVI velikosti 5 z 50-60%, GV z 30-40%, GIII 0-5%.



Obr. 5.7: Tavba 5Y – leštěno, zvětšeno 100x, 1dílek ~ 10 μ m



Obr. 5.8: Tavba 5Y – leptáno, Nital 3-5%, zvětšeno 100x, 1dílek ~ 10µm

5.2 Druhá série odlitků

Následně byly dodány další čtyři tavby litiny s lupínkovým grafitem, lišící se zejména obsahem mědi. Množství mědi se pohybuje od 0% do 1,5%. Odlitky byly opět v podobě Y-bloků. Jednotlivé tavby byly označeny písmeny A, B, C a D. Chemické složení těchto taveb je v tab.5.2.

Označení	Chemické složení [%]							
tavby	С	Si	Mn	Р	S	Cu	Ni	
Α	3.15	2.24	0.19	0.02	0.016	0.02	0.01	
В	3.03	2.21	0.19	0.02	0.016	0.43	0.01	
С	3.03	2.21	0.22	0.02	0.016	0.74	0.02	
D	3.17	2.17	0.21	0.03	0.017	1.41	0.02	

Tab.	5.2:	Chemické	složení	taveb	А,	Β,	C a I)
------	------	----------	---------	-------	----	----	-------	---

Z metalografických výbrusů byla také zjištěna velikost eutektických buněk, tabulka 5.3.

\mathbf{x}	at		- A	
Tab	5 3 Velik	ost eutektio	:kých	buněk
1 40.	0.0. v	lobe catolitie	, in j 011	ounon

	Tavba A	Tavba B	Tavba C	Tavba D
Velikost eutektických buněk [mm ²]	Nezřetelné	1,539	1,131	0,502
	KK / Faku			

TECHNICK

<u>Tavba A</u>

Tavba A má perlitickou strukturu matrice s lupínkovým grafitem tvaru GIA o velikosti 4-5. Hranice eutektických buněk jsou nezřetelné.



Obr. 5.10: Tavba A – leptáno, Nital 3-5%, zvětšeno 100x, 1dílek ~ 10 μ m

<u>Tavba B</u>

Tavba B má perlitickou strukturu matrice (P96%) a lupínkový grafit tvaru GIA o velikosti 4-5. Hranice eutektických buněk jsou již zřetelné.



Obr. 5.12: Tavba B – leptáno, Nital 3-5%, zvětšeno 100x, 1dílek ~ 10 μ m

<u>Tavba C</u>

Tavba C má také perlitickou strukturu (P98%). Grafit v matrici je lupínkový tvaru GIA a velikosti 5-4. Eutektické buňky jsou menší než u tavby B.



Obr. 5.14: Tavba C – leptáno, Nital 3-5%, zvětšeno 100x, 1dílek ~ 10 μ m

<u>Tavba D</u>

Matrice litiny obsahuje 98 – 100% perlitu. Lupínkový grafit má tvar GIA a velikost 5-4. Zde jsou patrné nejmenší eutektické buňky. To je dáno postupně se zvyšujícím obsahem mědi Cu v jednotlivých tavbách, jak je zřejmé z tab.5.2.



Obr. 5.16: Tavba D – leptáno, Nital 3-5%, zvětšeno 100x, 1dílek ~ 10µm

6. Použité přístroje a měřící metody

a) Posuvné měřítko

Posuvné měřítko Mitutoyo s rozsahem 0-150mm s dělením stupnice 0,02mm bylo použito na měření skutečných tloušťek stěn vzorků.

b) Tvrdoměr Brinell Briviskop BL 1-10

Měření tvrdosti probíhalo metodou podle Brinella dle ČSN EN ISO 6506-1 za podmínek HB5/750.



Obr. 6.1: Tvrdoměr Brinell Briviskop BL 1-10

c) Domena B3

Měření intenzity remanentního magnetického pole probíhalo na přístroji Domena B3, při nastavení přístroje na hodnotu magnetizace M4. Použitý byl cejchovní kámen (etalon na seřízení domény) hodnoty Mc=200.



Obr. 6.2: Přístroj Domena B3 s příložnou sondou

d) Digitální defektoskop DIO 562 Starmans

Tento přístroj byl použit jako utrazvukový tloušťkoměr na měření zdánlivé tloušťky stěn Lu. Seřízení bylo provedeno na zkušebních vzorcích o tloušťce 15 a 28,8 mm. Nastavení rychlosti šíření zvuku bylo na 2932 m/s.



Obr. 6.3: Digitální defektoskop dio 562

e) Trhací stroj TIRAtest 2300 s laserovým extenzometrem

Na tomto stroji byly prováděny statické zkoušky tahem dle ČSN EN 10002-1. Pro záznam a snímání průběhu trhací zkoušky sloužil laserový extenzometr firmy Fiedler Optoelektronik GmbH (viz.obrázek 6.4). Naměřené hodnoty (síla F, prodloužení Δl a čas t) program LQM automaticky uloží do datového souboru. Tyto data lze dále graficky zpracovávat pomocí programu LQA a získávat tak různé závislosti, případně stáhnout prostá data v textové podobě.



Obr. 6.4: Trhacî stroj TIRAtest 2300 s laserovým extenzometrem

Laserový extenzometr je složen z přijímače, snímacího zařízení a napájecího zdroje, viz. schéma na obrázku číslo 6.5. Pro správné snímání a přijímání je nezbytné zajistit správnou vzájemnou polohu soustavy přijímač - snímací zařízení - vzorek.



f) Metalografický mikroskop Neophot 32 CARLZEISS

Metalografické hodnocení bylo prováděno na mikroskopu Neophot 32. K fotografování byl použit připojený digitální fotoaparát Olympus C5050Zoom.



Obr. 6.6: Metalografický mikroskop Neophot 32

g) Měřič intenzity zbytkového magnetického pole MH05

Tento přístroj byl použit při experimentu na identifikaci druhu grafitu v matrici.



Obr. 6.7: Měřič intenzity zbytkového magnetického pole MH05

7 Vzorky a metodika měření

Následující kapitola popisuje postup zhotovení vzorků, měření na nich provedená a metodiku jednotlivých měření.

7.1 Volba a příprava vzorků

Základním vstupním materiálem byly již zmiňované odlitky ve tvaru Y-bloků, obr.7.1. Seznam Y-bloků příloha číslo 1. Tvar a velikost vzorků bylo potřeba zvolit s ohledem na tvar dodaných odlitků, kdy u Y-bloků je vhodné použít pouze spodní užší část a také se zřetelem na vlastnosti a požadavky použitých metod měření.

Nejprve byly z Y-bloků odříznuty dvě desky stejných tvarů, obr.7.2. Na nich byla postupně změřena tvrdost dle Brinella, skutečné rozměry posuvným měřítkem, tloušťka ultrazvukovým defektoskopem a hodnota intenzity zbytkového magnetického pole přístrojem Domena B3.

Po získání zmíněných dat byly z těchto desek vysoustruženy válečky o průměrech 8, 12 a 16mm, na nichž byla zjištěna hmotnost, rozměry a proměřeny ultrazvukem a přístrojem Domena B3, obr.7.3.

Posledním krokem byla příprava trhacích tyček pro statickou zkoušku tahem podle normy ČSN 420316. Před přetržením byly změřeny hodnoty M přístrojem Domena B3.



Obr. 7.1: Dodané Y-bloky



Obr. 7.2: Desky odebrané z Y-bloku







7.2 Systém značení vzorků

Odlitky byly značeny podle následujícího schématu.

- a) každému z Y-bloků bylo přiřazeno pořadové číslo, např. 1Y1,1Y2....1Y6, a to u všech taveb,
- b) odříznuté desky byly označeny, např. 1Y1-a, 1Y1-b, 1Y4-a,
- c) dále válečky z těchto desek byly označeny 1Y1-a1, 1Y1-a2 atd.,
- d) a nakonec u zkušebních tyček ke zkoušce tahem bylo přidáno písmeno "x" za předchozí označení.)



Toto schéma značení je shodné i pro druhou sadu odlitků, kde došlo pouze k nahrazení 1Y, 3Y, 4Y, 5Y písmeny A, B, C, D.

7.3 Metodika měření

a) měření tvrdosti podle Brinella (dle ČSN EN ISO 6506-1)

Tvrdost byla měřena pouze na deskách a to na dvou vzájemně rovnoběžných stěnách. Povrch byl zarovnán a oblast vpichu předem přeleštěna, aby se zaručila přesnost odečtu. Měření bylo provedeno na každé stěně třikrát, viz. schéma na obr.7.5. Vzhledem k minimálním rozdílům v naměřených hodnotách tvrdosti byl následně udělán pro zjednodušení prostý aritmetický průměr.



Obr. 7.6: Schéma měření ultrazvukem

c) měření intenzity remanentního magnetického pole přístrojem Domena B3

Desky byly měřeny příložnou sondou na dvou místech a to na obou rovnoběžných stěnách, viz.obr.7.7. Pro měření intenzity zbytkového magnetického pole na válečkách, musel být navržen a vyroben vhodný přípravek. Tento přípravek musel zaručit přesnost umístění sondy, a tím zabezpečit opakovatelnost měření. Tento přípravek je na obr7.9. I zde byly válečky měřeny na dvou místech patrných z obr.7.8.



Obr. 7.7: Schéma měření intenzity zbytkového magnetického pole na deskách



Obr. 7.8: Schéma měření intenzity zbytkového magnetického pole na válečkách



Obr. 7.9: Přípravek pro aplikaci sondy na vzorky kruhového průřezu

8 Vytvoření křivek konstantní pevnosti pro LKG a LČG

8.1 Vytvoření matematického modelu křivek konstantní pevnosti pro LKG a LČG

Přechod pevnostních výpočtových modelů mezi litinami s lupínkovým a kompaktním (GIII-VI) grafitem je nespojitý. Vzhledem k velmi rozdílným vlastnostem je nemožné použití jedné strukturní roviny s isopevnostními čarami pro celé spektrum grafitických litin. Z tohoto důvodu tato část práce navazuje na již existující strukturní rovinu s isopevnostními čarami používanou pro litiny s lupínkovým grafitem. Ze zkoušek souboru vzorků a odlitků z litin s kompaktními tvary grafitů byla vypracována strukturní rovina s isopevnostními čarami pro hodnocení souborů odlitků z červíkovitým až kuličkovým Egrafitem bez ohledu na strukturu matrice. Toto dvourozměrné vyjádření struktury litiny umožňuje nový přístup k hodnocení ucelených souborů měřených míst jednoho složitého odlitku, nebo hodnotit stejná místa měření významných souborů odlitků. Množina koncových bodů "strukturního vektoru" konkrétního souboru vytváří typické tvary množin strukturních bodů kolem dané isopevnostní čáry. Tvary těchto množin souvisí s metalurgickou historií odlitků v souborech. Z těchto charakteristik lze následně vyvodit nápravná metalurgická opatření ke zlepšení jakosti litin. Typické tvary množin struktuních bodů jsou ukázány na obrázku 8.1.



Obr. 8.1: Typické tvary množin strukturních bodů

- A. nízký rozptyl mechanických vlastností a struktury. Směrodatná odchylka takovéhoto souboru je poměrně nízká.
- B. velký rozptyl vlastností. Směrodatná odchylka má velmi vysokou hodnotu.
- C. velký rozptyl pevnosti Rm. Toto je velmi nepříznivý tvar množiny jejíž tvar je kolmý na čáry stejné pevnosti.
- D. malý rozptyl pevnosti i při vyšších rozptylech tvrdosti HB a Eo. Množina bodů poskládána rovnoběžně s izopevnostními křivkami.
- E. velký rozptyl vlastností kovové matrice litiny. Vzniká ve výrobní fázi tepelného zpracování (žíhání) nebo při vytloukání odlitků z forem v oblasti eutektoidní přeměny.
- F. velký rozptyl tvaru a množství grafitu vzniká ve fázi metalurgické přípravy kovu před litím nebo při eutektické přeměně ve formě. Základní kovová matrice odlitků je přibližně stejná.

Pro výpočet isopevnostních čar litin s lupínkovým grafitem se používá vzorec číslo (8.1) a pro výpočet tvrdosti dle Brinalla vzorec (8.2), které byly získány z dat naměřených při přejímce bloků a hlav válců na silných rovných stěnách ve slévárně Ferex v Liberci.

$$\mathbf{Rm} = \left[\mathbf{7,211} \cdot \left(\frac{\mathbf{L}}{\mathbf{Lu}} \right)^{2,278} \cdot \mathbf{HB}^{0,75} \right]$$
(8.1)

kde: Rm – mez pevnosti v tahu [MPa], L – tloušťka prozvučované stěny [mm], L_U – hodnota akustické dráhy [mm], HB - tvrdost dle Brinella [-].

$$HB = 0.6 \cdot M + 100 \tag{8.2}$$

kde: HB - tvrdost dle Brinella [-], M – intenzita zbytkového magnetického pole [Am¹].

Tato hodnotící metoda byla použita například při zpracování diplomové práce ing.Zděnka Řezáče, který metodu aplikoval na kontrolu bloků motorů firmy Tedom. Příklad grafu vyjadřující rozdílnou strukturu bloku M4209, obr.8.2.



Obr.8.2: Dvojrozměrné vyjádření struktury bloku M4209

Data pro výpočet Rm podle modelu (8.2), byla získána ze zkoušek tahem, na tyčovitých vzorcích se závity o průměru 8mm a 12mm. Byl použit soubor šedesáti tyčí, z nichž polovina byla se závitem 8mm a druhá polovina se závitem 12mm, vyrobených z taveb 1Y až 5Y ze slévárny Focam s.r.o. v Olomouci. Tabulka naměřených hodnot viz. příloha číslo 2. Ze získaných dat byla vypočítána panem Doc.RNDr.Janem Pickem,

CSc. z Katedry aplikované matematiky, Fakulty pedagogické, Technické univerzity v Liberci logaritmická regrese. Základem pro tento výpočet byl model rovnice, který byl použit i pro výpočet isopevnostních čar litin s lupínkovým grafitem:

$$\mathbf{Rm} = \mathbf{A} \cdot \left(\frac{\mathbf{L}}{\mathbf{Lu}}\right)^{\mathbf{B}} \cdot \left(\mathbf{HB}\right)^{\mathbf{C}}$$
(8.3)

Členy A, B, C byly vypočteny metodou nejmenších čtverců. Na data byly aplikovány i další robusnější regresní metody. Z obdobného výsledku u těchto metod, lze usuzovat na vhodně zvolený model rovnice. Výsledná funkce je pak ve tvaru:

$$\mathbf{Rm} = \mathbf{0.6} \cdot \left(\frac{\mathbf{L}}{\mathbf{Lu}}\right)^{2,27} \cdot \left(\mathbf{HB}\right)^{1,31}$$
(8.4)

kde: Rm – mez pevnosti v tahu [MPa], L – tloušťka prozvučované stěny [mm], L_U – hodnota akustické dráhy [mm], HB - tvrdost dle Brinella [-].

Tvar a umístění isopevnostních čár pro litinu s kuličkovým až červíkovitým grafitem je patrný z grafu 8.1.





Pan Doc.RNDr.Jan Picek, CSc také uvedl možnost použití zjednodušeného výpočtového modelu:

$$\mathbf{Rm} = \left(\frac{\mathbf{L}}{\mathbf{Lu}}\right)^{\mathbf{B}} \cdot \left(\mathbf{HB}\right)^{\mathbf{C}}$$
(8.5)

Výsledná funkce je poté:

$$\mathbf{Rm} = \left(\frac{\mathbf{L}}{\mathbf{Lu}}\right)^{2,54} \cdot \left(\mathbf{HB}\right)^{1,22} \tag{8.6}$$

kde: HB - tvrdost dle Brinella změřená [-], L - tloušťka prozvučované stěny [mm], L_U – hodnota akustické dráhy [mm]. Rm – mez pevnosti v tahu [MPa], B, C – konstanty [-]. [-]. Porovnání obou výsledných funkcí je možné pozorovat v grafu 8.2.





Graf.8.2 Srovnání původního a zjednodušeného modelu

Při používání tohoto modelu v praxi se tak budeme moci spolehnout pouze na nedestruktivní měření, neboť hodnoty HB i M lze získat právě z NDT měření. Kdy po změření potřebného minimálního množství vzorků reprezentujících danou výrobu je možné získat konstanty potřebné v následujících obecných vztazích (8.7) a (8.8) pro přepočet hodnot z ultrazvuku a metody magnetického bodového pólu na potřebné HB a E_0 a získat tím přehled o pevnostním charakteru produkce a to ze sta procent.

$$\mathbf{HB} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{M} + \mathbf{B} \tag{8.7}$$

kde: A, B – konstanty získané lineární regresí z dvojic hodnot M – HB naměřených ze souboru alespoň deseti vzorků konkrétního materiálu [-], HB – tvrdost dle Brinella [-], M – intenzita remanentního magnetického pole [Am^{-1}].

$$\mathbf{E} = \left(\mathbf{K} \cdot \frac{\mathbf{L}}{\mathbf{L}_{\mathrm{U}}}\right)^{2} \tag{8.8}$$

kde: L – skutečná síla stěn [mm], Lu - měřená ultrazvukem [mm], E – modul pružnosti [MPa], K - konstanta [-].

U zkoumaných taveb 17, 3Y, 4Y a 5Y ze slévárny Focam s.r.o. byl použit vztah získaný pro litinu s kuličkovým grafitem ze slévárny Ferex. Ze vzorců (3.8), (3.11) a (3.12) byla vypočtena hodnota K=436,6.

Vzorec pro výpočet modulu pružnosti je pak ve tvaru:

$$\mathbf{E} = \left(436, 6 \cdot \frac{\mathbf{L}}{\mathbf{L}_{\mathrm{U}}}\right)^2 \tag{8.9}$$

Pro tavby A, B, C a D byl použit již dříve získaný vztah:

$$\mathbf{E} = \left(\mathbf{456, 4} \cdot \frac{\mathbf{L}}{\mathbf{L}_{\mathrm{U}}}\right)^{2} \tag{8.10}$$

8.2 Aplikace výsledků na matematické modely pro výpočet isopevnostních čar litiny s lupínkovým a kuličkovým až červíkovitým grafitem

8.2.1 Litina s kuličkovým až červíkovitým grafitem

Aplikace taveb Focam na nové modely isopevnostních čar pro litiny s kompaktním i lupínkovým grafitem. Měření tvrdosti podle Brinella 5/750 a tloušťka ultrazvukem bylo realizováno na souboru osmdesáti destiček, ze čtyř různých taveb ze slévárny Focam s.r.o. Destičky byly vyrobeny z Y-bloků taveb 1, 3, 4, 5.

Jak je vidět z grafu 8.3, tavba 1 má velký rozptyl vlastností kovové matrice litiny, což je zřejmé z rozptylu tvrdosti HB. Naproti tomu tavba 4 má výrazně lepší tvar množiny bodů ve strukturní rovině. Kde vykazují malý rozptyl pevnosti i při mírně vyšších rozptylech tvrdosti HB a Eo. Množina bodů tavby 3 je poskládána rovnoběžně s izopevnostními křivkami a vykazuje minimální rozptyl hodnot tvrdosti a počátečního modulu pružnosti Eo. Má takřka ideální tvar.



Graf 8.3: Množiny strukturních bodů taveb 1Y, 3Y a 4Y

Dále je také možné použít i jiné souřadnice pro popis struktury. Například intenzitu zbytkového magnetizmu M, která je přímo úměrná tvrdosti HB nebo místo popisu počátečního modulu pružnosti Eo lze použít rychlost zvuku, neboť spolu úzce souvisí.



Graf 8.4: Množiny strukturních bodů taveb 1Y, 3Y a 4Y při použití pouze NDT měření

8.2.2 Litina s lupínkovým grafitem

Stejnému testování byla podrobena i tavba A z litiny s lupínkovým grafitem ze slévárny Focam s.r.o. Záměrem bylo ověření stávajícího modelu pro litiny lupínkovým grafitem a možnost jeho aplikace na různé zdroje litin. Měření probíhalo na 25 vzorcích, kdy byla zjišťována tvrdosti podle Brinella 5/750 a tloušťka ultrazvukem.



Graf 8.5: Isopevnostní čary pro litinu s lupínkovým grafitem ze slévárny Focam s.r.o


8.3 Sjednocení modelů pro LLG, LKG a LČG

I přes nereálnost propojení obou modelů, jak již bylo naznačeno v předchozí kapitole, uvádím graf společný pro oba modely. Pro větší přehlednost grafu jsem vynesl pouze isopevnostní čáry pro 300 a 400MPa. Je zde vidět jednoznačný rozdíl v umístění těchto čar. Spojením obou modelů dojde výraznému zhoršení kvality výsledné funkce v porovnání s oběma samostatnými modely. Kdy regresní koeficient pro LLG je 0,93 a pro LKG, LČG je 0,91, dojde jejich spojením k poklesu na 0,71 na místo posílení.



Graf 8.7 Srovnání modelů pro litiny s lupínkovým a nebo kuličkovým až červíkovitým grafitem

9 Vytvoření redukčního matematického modelu pro vzorky o různém průměru

Ne vždy je možno nalézt na odlitku vhodné dostatečně veliké místo k přesnému měření pomocí jakékoli metody. To platí i pro metodu magnetického bodového pólu. Snahou o vytvoření obecně použitelného redukčního vzorce pro posouzení strukturoskopie na průměrově různých vzorcích z grafitických litin tak navazujeme na téma modelování tvaru a množství disperze v grafitických litinách.

Vlivem v našem případě kruhového průřezu vzorku dochází ke zkreslování naměřených hodnot a tím i k výraznému ovlivnění vypočtené tvrdosti podle používaného vzorce pro výpočet tvrdosti na plochém vzorku.

$$- \text{ tvrdost dle Brinella [], M - hodnota intenzity zbytkového magnetického$$

pole [A/m], A, B – konstanty [-]

kde: HB

Tato nepřesnost se pohybuje řádově v desítkách jednotek HB a s klesajícím průměrem výrazně narůstá, jak je ukázáno v kapitole 9.1 na grafu číslo 9.1.

Na základě provedených měření bylo nutné oddělit od sebe litiny s lupínkovým a kuličkovým až červíkovitým grafitem. Důvodem byla nemožnost popisu získaných dat jediným redukčním vzorcem.

Měření byla provedena na obou sadách taveb dodaných slévárnou FOCAM s.r.o. Olomouc, jak na tavbách A, B, C, D, tak i na tavbách 1Y, 3Y, 4Y, 5Y. Měřeny byly tyčky o průměrech 8, 12, 16 a 24 mm. Měření bylo prováděno přístrojem Domena B3, příložnou sondou za pomocí přípravku k zajištění opakovatelnosti měření, jak je popsáno v kapitole 6 Použité přístroje a měřící metody.

9.1 Redukční matematický model pro litinu slupínkovým grafitem

Závislost hodnot naměřených na deskových vzorcích byla zpracována v grafu číslo 9.1. K popisu závislosti byl použit matematický model (9.1). Tímto postupem byla získána rovnice (9.2), přičemž korelační koeficient R je 0,91.

$$HB_{Z} = 0.1 \cdot M_{\text{plocha}} + 181.6 \tag{9.2}$$

kde: HB_Z – tvrdost dle Brinella změřená [-], M_{plocha} – hodnota intenzity zbytkového magnetického pole měřená na ploše [A/m].



Graf 9.1: Závislost M na plochém vzorku a tvrdosti měřené metodou Brinell 5/750

Následně byla ze závislosti rozdílu hodnot M změřených na vzorcích kruhového a plochého průřezu a převrácené hodnoty průměrů těchto vzorků, tedy křivostí získána rovnice pro popis přepočtu M na průměru na skutečnou hodnotu materiálu, kterou lze získat pouze na plochém vzorku.

$$\mathbf{M}_{\text{plocha}} = \mathbf{M}_{\text{prumer}} - 10973 \cdot \left(\frac{1}{\mathbf{D}}\right)^{1,62}$$
(9.3)

kde: M_{plocha} – hodnota intenzity zbytkového magnetického pole na ploše [A/m], M_{prumer} – hodnota intenzity zbytkového magnetického pole měřená na průměru [A/m], D – průměr měřeného vzorku [mm].



Po sloučení rovnic (9.2) a (9.3) jsem dostal hledaný redukční matematický model pro vzorky o různém průměru platný pro litinu s lupínkovým grafitem.

$$HB_{V} = 0.1M_{prumer} - 1097.3 \cdot \left(\frac{1}{D}\right)^{1.62} + 181.6$$
(9.4)

kde: HB_V – tvrdost dle Brinella vypočítaná [-], M_{prumer} – hodnota intenzity zbytkového magnetického pole měřená na průměru [A/m], D – průměr měřeného vzorku [mm], korelační koeficient R = 0,93.

Graf číslo 9.3 ukazuje srovnání procentuální nepřesnosti původního a redukovaného vzorce pro výpočet tvrdosti HB. Odchylka od osy x, která je v grafu považována za

skutečnou hodnotu tvrdosti se u redukovaného modelu pohybuje v rozmezí $\pm 5\%$ ze skutečné tvrdosti. Zatímco při použití původního vzorce se odchylka pohybuje v rozmezí 10 až 30HB a v ojedinělých případech dosahuje chyba více jak 50HB.



Graf 9.3: Porovnání procentuální nepřesnosti původního a redukovaného vzorce

Zároveň je také nutné vzít v úvahu vliv legování Cu na měření metodou magnetického bodového pólu. Zatícmo tvrdost dle Brinella je u všech čtyř taveb A, B, C i D s minimální odchylkou stejná, hodnota M remanentní magnetizace mění a je tak závislá na množství mědi v litině. Tento vztah je zřejmý z grafu číslo 9.4. Zde je vidět u obsahu Cu nad 0,4% lineární nárůst remanentní magnetizace, zatímco do této hodnoty je dá se říci konstantní stejně jako tvrdost HB.

$$M_{Cu} = 101 \cdot (Cu\%) + 59 \tag{9.5}$$

kde: M_{Cu} – hodnota zbytkové magnetizace měřená na ploše ovlivněná obsahem Cu [A/m], Cu% – obsah Cu v litině [%].



9.2 Redukční matematický model pro litiny s kuličkovým až červíkovitým grafitem

Shodný postup odvození vzorců byl zvolen i pro vzorky z taveb 1Y, 3Y, 4Y, 5Y. Již prvotní rozbory ukázaly na nutnost rozdělení dat získaných měřěním na dvě skupiny a to podle matrice litin. Na tavbu 1Y a 4Y s převážně perlitickou a 3Y a 5Y s feritickou matricí.

9.2.1 Litina s perlitickou matricí

Z naměřených dat byli získány závislosti

$$\mathbf{HB}_{\mathbf{Z}} = \mathbf{M}_{\mathbf{plocha}} + 73,2 \tag{9.6}$$

$$\mathbf{M}_{\text{plocha}} = \mathbf{M}_{\text{prumer}} - \frac{2090}{\mathbf{D}}$$
(9.7)

a výsledný redukční vzorec pro výpočet tvrdosti je poté ve tvaru

$$HB_{v} = M_{prumer} - \frac{2090}{D} + 73,2$$
(9.8)

kde: HB_Z – tvrdost dle Brinella změřená [-], HB_V – tvrdost dle Brinella vypočítaná [-], M_{plocha} – hodnota intenzity zbytkového magnetického pole měřená na ploše [A/m], M_{prumer} – hodnota intenzity zbytkového magnetického pole měřená na průměru [A/m], D – průměr měřeného vzorku [mm], korelační koeficient R = 0,93.

ECHNICK



Graf 9,5: Závislost delta M na křivosti vzorků

Zde se však již maximální a minimální odchylka od skutečné hodnoty tvrdosti zdojnásobila a pohybuje se v rozmezí $\pm 10\%$.

9.2.2 Litina s feritickou matricí

Z analýzy dat vzorků těchto dvou taveb byla zjištěna závislost

$$\mathbf{M}_{\text{plocha}} = \mathbf{M}_{\text{prumer}} - \frac{411.8}{\mathbf{D}}$$
(9.9)

kde: M_{plocha} – hodnota intenzity zbytkového magnetického pole měřená na ploše [A/m], M_{prumer} – hodnota intenzity zbytkového magnetického pole měřená na průměru [A/m], D – průměr měřeného vzorku [mm].

Z tohoto měření však nebylo možné získat členy A, B potřebné k odvození redukčního výpočtového vztahu pro HB. U těchto dvou sad vzorků se neprojevila žádná závislost, ze které by mohly tyto konstanty být odvozeny, na rozdíl od vzorků ostatních taveb, jak je patrné z grafu 9.5.



perlitickou a feritickou matrici

Fakulta stroiní

CHNICK/

10 Modelování tvaru a množství disperze (grafitu) v grafitických litinách

Toto testování se zabývalo vyhodnocením výsledků nedestruktivního měření za účelem identifikace matrice a tvaru grafitu v testovaných vzorcích. Protože je tento popis velmi složitý, nelze ho provést pomocí znalosti pouze jednoho změřeného parametru. Proto byly data doplněny o hodnoty získané ultrazvukem a tvrdostí podle Brinella. V současné době je možné měření hodnot ultrazvuku, rozměrů a intenzitu remanentního magnetického pole zjednodušit a urychlit využitím kompaktní přístroj TELIT, který sdružuje ultrazvukový tloušťkoměr, přístroj DOMENA a posuvné měřítko k měření základních veličin L, Lu M, k výpočtu a vyjádření výše popsaných vlastností a skutečností. Je používán například slévárnou SKS Krnov.

K popisu tvaru grafitu a matrice byl vybrán soubor taveb, které prezentují širší oblast možných kombinací, aby bylo možné vytvořit co možná nejpřesnější model. Jedná se o tavby 1Y, 3Y, 4Y, 5Y, A. Prezentují grafit od lupínkového přes červíkovitý až po kuličkový a matrici feritickou až perlitickou. Měření bylo prováděno na deskách z Y-bloků.

Pomocí hodnot intenzity zbytkového magnetického pole M lze, jak je vidět z grafu 10.1, v závislosti na tvrdosti dle Brinella rozdělit tento graf do dvou oblastí, které budou prezentovat matrici s převažující složkou feritickou respektive perlitickou. Na tomto základě byla vytvořena závislost vymezující přechodovou oblast, která udává přechod z matrice s převažující složkou feritickou na složku perlitickou. Je popsána vztahem (10.1).

$$\mathbf{M} = \mathbf{40,7} \cdot \mathbf{e}^{0.014 \cdot (\mathbf{P}\%)} \tag{10.1}$$

kde: M – intenzita zbytkového magnetického pole [A/m], P% – procentuální obsah perlitu v matrici, korelační koeficient R = 0.91.

Ze vztahu (10.1) lze získat přesnou přechodovou hodnotu pro 50% podíl perlitu v matrici litiny. Padesát procent obsahu perlitu v matrici odpovídá hodnotě intenzity zbytkového magnetického pole 80A/m.



Graf 10.1 Závislost intenzity zbytkového magnetického pole na tvrdosti dle Brinella



Graf 10.2 Závislost intenzity zbytkového magnetického pole na množství perlitu v matrici

Obdobně bylo postupováno při analýze dat z měření ultrazvukem. I zde byl predikován vliv tvaru grafitu na získané hodnoty rychlosti zvuku. Na základě těchto zákonitostí lze oblast grafu 10.3 rozdělit do oblasti, kdy každá znich bude prezentovat jednotlivý tbar grafitu.



Na podkladě těchto zjištěných skutečností byla vytvořena závislost hodnoty intenzity zbytkového magnetického pole versus rychlost zvuku. Z umístění skupin bodů, reprezentující jednotlivé tavby je zřejmá možnost rozdělení grafu do oblastí, které by představovaly materiál s danou matricí a tvarem grafitu. Graf 10.4 ukazuje skupiny bodů popisující skutečné vzorky. Podle těchto skupin lze graf $v_L - M$ rozdělit jednak na části perlitickou a feritickou, ale také podle tvaru grafitu na části tři, jak je patrné z grafů 10.5 a 10.6. V grafu 10.7 je výsledné schématické rozdělení oblasti do šesti částí. Spodní část určuje feritickou a horní perlitickou matrici litin. Tvar grafitu se mění z leva doprava od lupínkového přes červíkovitý až po kuličkový.



Graf 10.5 Závislost intenzity zbytkového magnetického pole na rychlosti zvuku, oblasti perlitická a feritická



Graf 10.7 Grafické znázornění jednotlivých oblastí s různou matricí a grafitem

V grafu 10.8 jsou trojrozměrně zobrazeny vzájemné vztahy rychlosti zvuku, hodnot intenzity zbytkového magnetického pole a tvrdosti dle Brinella. Z tohoto grafu je možné vyvodit stejné oblasti pro identifikaci matrice a grafitu, avšak není to tak přehledné, jako jednoduší vyjádření v dvojrozměrném grafu 10.7.



Graf 10.8 Prostorové znázornění intenzity zbytkového magnetického pole, rychlosti zvuku a tvrdosti dle Brinella.

V návaznosti na metody používané v Bělorusku jsem provedl experiment za pomoci měřiče intenzity zbytkového magnetického pole MH05. Kdy pomocí magnetizace přístrojem domena jsem měřil intenzitu ubytkového magnetického pole na obou stranách destiček z jednotlivých taveb o různých tloušťkách. Cílem bylo zjednodušeně aplikovat princip měření gradientu, který popisuje V. F. Matyuk ve svých publikacích, např.[17]. A pokusit se tak pomocí intenzity zbytkového magnetického pole rozlišit tvar grafitu v matrici.

Vzorek	M3 [A/m]	Zmsonda [kA/m]	Zmrub [A/m]	HB [-]	L [mm]	Lu [mm]	v [m/s]	rozdíl Z [kA/m]
				A2Y3				
6mm(II)	152.5	0.245	0.165	159	5.95	7.95	4583	0.08
8mm	136.5	0.206	0.12	168	7.9	10.45	4657	0.086
10mm	135	0.226	0.15	168	9.84	13.13	4400	0.076
12mm(II)	124	0.233	0.143	169	11.93	15.35	4700	0.09
				3Y2				
6mm	58.9	0.099	0.075	139	6.01	6.78	5239	0.024
8mm	56.7	0.091	0.061	140	7.9	8.92	5303	0.03
10mm(II)	50.35	0.089	0.063	140	9.92	11.21	5286	0.026
12mm	47.5	0.076	0.055	138	12	13.51	5262	0.021
		0		4Y2				
6mm(II)	152.5	0.29	0.198	204	5.97	6.9	5148	0.092
8mm(II)	143	0.232	0.146	194	8.06	9.06	5227	0.086
10mm	134.5	0.234	0.145	193	9.86	11.48	5157	0.089
12mm(II)	124	0.221	0.125	193	11.92	13.52	5251	0.096
6mm(II)	223	0.349	0.157	263	6.18	6.59	5717	0.192
8mm(II)	213	0.341	0.115	275	8.14	8.48	5678	0.226
10mm	213	0.32	0 .084	272	10.2	10.63	5700	0.236
12mm	189	0.326	0.131	263	12.2	12.68	5691	0.195
		E	Ka	5Y2	$\mathbf{\Lambda}$			
6mm(II)	60.4	0.141	0.116	164	5.96	6.35	5667.817	0.025
8mm	50	0.15	0.121	160	8.2	8.5	5626.845	0.029
10mm	42.7	0.226	0.2	164	10.25	10.8	5699.426	0.026
12mm(II)	45.5	0.263	0.239	161	11.73	12.14	5666.589	0.024
			t					

Tab. 10.1: Tabulka naměřených hodnot na deskách taveb 1Y, 3Y, 4Y, 5Y a A

Z naměřených hodnot ovšem nebylo možné získat jakoukoli spojitost mezi intenzitou zbytkového magnetického pole a tvarem grafitu. Došlo však k potvrzení správnosti postupu při získání grafu 10.7.



Graf. 10.9: Závislost gradientu intenzity zbytkového magnetického pole na rychlosti zvuku

Dále byl proveden rozbor výsledků měření Domenou B3, za účelem získání informací ohledně vlivu tvaru grafitu na hodnotu remanence, graf 10.9. Do grafu byly zakresleny průměrné hodnoty remanentní magnetizace jednotlivých taveb 1Y, 3Y, 4Y, 5Y v závislosti na množství perlitu ve struktuře. Je z něho patrný pokles hodnoty M vlivem tvaru grafitu. Kdy pro červíkovitý grafit byla tečkovanou čárou prodloužena naměřená lineární závislost do hodnoty 100% obsahu perlitu ve struktuře. A právě s rostoucím obsahem perlitu v základní hmotě matrice narůstá vliv tvaru grafitu na měřenou hodnotu M. Tento vliv začína být patrný při 30 procentním obsahu perlitu a při čistě perlitické struktuře je největší.

Červíkovitý grafit má hodnotu intenzity zbytkového magnetického pole menší o 44A/m než vzorek s grafitem kuličkovým.



11 Aplikace metody magnetického bodového pólu na podobně disperzní materiály

Tato práce se také zabývá možností aplikace této metody na podobně disperzní materiály jako jsou litiny. Byly vybrány dvě oblasti a to degradace austenitických ventilových ocelí a dále tzv. sendvičové plechy. Nejedná se o ucelený výzkum, jako spíše o ověření možnosti testování touto metodou, případně naznačit možnosti témat budoucích diplomových prací.

11.1 Modelování degradace austenitických ventilových ocelí

V austenitických ocelích používaných k výrobě ventilů se cyklickým tepelným zatížením začíná projevovat feromagnetické chování. Běžnou optickou mikroskopií však nejsou původci (strukturní složky) feromagnetického chování zjistitelné. Tyto feromagnetické složky v paramagnetické matrici byly v rámci experimentu simulovány práškem oxidu železa rozptýleného v dentakrylu.

K měření bylo vyrobeno 5 vzorků. Vzorky byly vyrobeny slisováním práškového dentakrylu s práškovým oxidem železa za působení tlaku a tepla v lisu na výrobu metalografických vzorků. Obsah oxidu železa v jednotlivých vzorcích je 0.1, 0.2, 2, 5, 20 gramů ku 20 gramům dentakrylu. Velikost jednotlivých zrn feromagnetického prášku je pod 1µm. Metalografickým rozborem bylo zjištěno, že oxid železa v dentakrylu vytváří síťoví. Toto síťoví je ale nespojité. Při vyšším obsahu feromagnetického prášku však dochází ke vzniku oblastí obsahující pouze oxid železa o velikosti řádově v mikrometrech. Tvar síťoví a četnost zmíněných oblastí je patrný z metalografického výbrusu na obrázku 11.1.





a) 0.1g oxid železa + 20g dentakryl

b) 0.2g oxid železa + 20g dentakryl



c) 2g oxid železa + 20g dentakryl

d) 5g oxid železa + 20g dentakryl



e) 20g oxid železa + 20g dentakryl

Obr. 11.1: Metalografický výbrus vzorků, zvětšeno 500x, leštěno.

Měření bylo prováděno přístrojem DOMENA B3 s příložnou sondou (průměr 21mm) na stejném místě vždy třikrát a to na obou protilehlých stranách vzorků, dle obrázku 11.2. Vzhledem k možné nepřesnosti měření byl proveden stejný postup také po obroušení povrchové vrstvy. Zjištěné závislosti jsou znázorněny v grafu 11.1.



Graf.11.1: Závislost hodnoty M na hmotnostním poměru.

Tyto vzorky byly dále poskytnuty k testování metodou magnetického adaptivního testování (MAT) na Fyzikálním ústavu akademie věd ČR v Praze u RNDr.Ivana Tomáše,CSc k posouzení srovnatelnosti a ověření obou metod, která je popsána v kapitole 4. Lze předpokládat využití pro diagnostiku rozptýlených feromagnetických částic s hmotnostními podíly i v desetinách procent v austenitické matrici ventilových ocelí.

11.2 Modelace sendvičového plechu

Výzkum těchto materiálů metodou magnetického bodového pólu by byl velmi rozsáhlý a proto byla zvolena varianta s izolační vrstvou uvnitř plechu. Jako vnější vrstva byl použit ocelový plech o tloušťce 0,6 mm. Vnitřní paramagnetická vrstva byla simulována papírem o tloušťce 0,05 mm, přičemž vnitřní vrstva byla rozšiřována od 0 do 1 mm.



Závislost hodnoty M na síle vnitřní vrstvy nejlépe popisuje polynom druhého stupně.

$$\mathbf{M} = \mathbf{137,9} \cdot \frac{\mathbf{L}_{\text{vrstva}}}{\mathbf{L}_{\text{plech}}} + \mathbf{584} - \mathbf{42,3} \cdot \left(\frac{\mathbf{L}_{\text{vrstva}}}{\mathbf{L}_{\text{plech}}}\right)^2$$
(11.1)

kde: M – hodnota intenzity zbytkového magnetického pole [A/m], L_{vrstva} – tloušťka vnitřní vrstvy [mm], L_{plech} – tloušťka plechu [mm].

Na tomto konkrétním vzorku se asymptotický blíží hodnotě 700A/m. Je zřejmé že tato metoda bude aplikovatelná pouze do limitní poměru tloušťky vnitřní vrstvy sendvičového plechu ku vnější feromagnetické vrstvě.



12 Diskuze výsledků

12.1 Křivky konstantní pevnosti pro grafitické litiny

Cílem této části práce bylo nejenom vytvořit nový model pro litiny s kuličkovým až červíkovitým grafitem, ale také aplikovat výsledky měření na již existující model pro litiny s lupínkovým grafitem. Dále také potvrdit či vyvrátit dřívější předpoklady o nemožnosti sloučení těchto dvou modelů

a) Model pro litiny s lupínkovým grafitem

Aplikovatelnost tohoto modelu byla ověřena naměřenými daty na tavbách A až D. Kdy vynesením hodnot počátečního modulu pružnosti E_0 a tvrdosti dle Brinella HB byla získána mez pevnosti v tahu Rm. Srovnání pevností odečtených z grafu a hodnot získaných ze statické zkoušky tahem je v tabulce číslo 12.1.

Označení vzorku	Mez pevnosti z grafu [MPa]	Mez pevnosti ze zkoušky tahem [MPa]	Odchylka [MPa]
A1-a1x	193	201.29	-8.29
A1-a2x	198	190.47	7.53
A1-b1x	200	205.77	-5.77
A1-b2x	202	209.42	-7.42
A2-a1x	224	237.13	-13.13
A2-a2x	Z 223	232.91	-9.91
A2-b1x	218	210.05	7.95
A2-b2x	212	270.32	-58.32
A3-a1x	210	230.05	-20.05
A3-a2x	222	221.29	0.71
A3-b1x	219	219.46	-0.46
A3-b2x	217	214.63	2.37
A4-a1x	217	220.32	-3.32
A5-b1x	205	212.65	-7.65
A5-b2x	214	217.13	-3.13
	5.18		

Tab 12.1 Srovnání hodnot meze pevnosti z grafu a statické zkoušky tahem

Z této tabulky vyplývá odchylka pohybující se řádově v jednotkách MPa. Pouze ve dvou případech došlo k výrazné neshodě hodnot u vzorku A2-b2x, A3-a1x. Kdy

vypočtená mez pevnosti v tahu vyšla podstatně méně než ze zkoušky tahem. Z tohoto důvodu je chyba zřejmě v měření ať již ultrazvukem, nebo tvrdosti.

Z výsledků je zřejmé, že tento model je platný a je aplikovatelný na běžné produkční litiny s lupínkovým grafitem. Určité problémy by mohly nastat pro použití tohoto modelu na legované litiny se zvláštním určením.

b) Model pro litiny s kuličkovým až červíkovitým grafitem

Za přispění doc. Picka z katedry aplikované matematiky FP TUL se podařilo sestavit model, který popisuje mez pevnosti v tahu v závislosti na počátečním modulu pružnosti a tvrdosti dle Brinella. Přesnost modelu pro tavby 1Y, 3Y a 4Y je ukázána v tabulce číslo 12.2. pro graf HB- E_0 a v tabulce číslo 12.3 pro graf M- E_0 .

Označení vzorku	Mez pevnosti z grafu [MPa]	Mez pevnosti ze zkoušky tahem [MPa]	Odchylka [MPa]
1Y1-a1x	858	820	38
1Y1-b1x	850	841	9
1Y1-b2x	827	825	2
1Y3-a1x	813	804	9
1Y3-b2x	825	824	1
1Y5-a1x	808	793	15
1Y5-a2x	833	826	7
3Y2-a1x	287	283	4
3Y2-a2x	295	298	-3
3Y3-a1x	308	318	-10
3Y3-b1x	303	306	-3
3Y3-b2x	303	305	-2
3Y4-a1x	[1] 304	310	-6
3Y4-b1x	302	299	3
3Y6-b1x	305	314	-9
4Y1-a1x	450	441	9
4Y1-b2x	416	418	-2
4Y2-a1x	441	437	4
4Y2-a2x	440	463	-23
4Y3-b1x	458	470	-12
4Y3-b2x	464	482	-18
4Y4-a2x	475	481	-6
4Y4-b2x	469	458	11
	7.6		

Tab 12.2 Srovnání hodnot meze pevnosti z grafu HB – E_0 a statické zkoušky tahem

818 850 837 808 840	820 841 825 804	-2 9 12
850 837 808 840	841 825 804	9 12
837 808 840	825 804	12
808 840	804	
840		4
• • •	824	16
803	793	10
835	826	9
275	283	-8
296	298	-2
300	318	-18
298	306	-8
298	305	-7
299	310	-11
297	299	-2
299	314	-15
460	441	19
503	418	85
2 505	437	68
485	463	22
487	470	17
494	482	12
494	481	13
470	458	12
Průměrná odchylka		10.3
	840 803 835 275 296 300 298 298 299 297 299 297 299 460 503 305 485 487 494 494 470 Průměrná odchylka	808 804 840 824 803 793 835 826 275 283 296 298 300 318 298 306 298 305 299 310 297 299 299 314 460 441 503 418 505 437 485 463 487 470 494 481 470 458

Tab 12.3 Srovnání hodnot meze pevnosti z grafu M – E₀ a statické zkoušky tahem

Maximální a minimální odchylka pro oba možné způsoby vyjádření se pohybuje v rozmezí \pm 6% ze skutečné hodnoty meze pevnosti zjištěné statickou zkouškou tahem. Pouze u vzorků 1Y1-a1x, 4Y1-b2x a 4Y2-a1x se vyskytl rozdíl řádově v desítkách procent. Jedná se však pouze o ojedinělé případy. Tyto rozdíly mohou být způsobeny vnitřní vadou, případně nehomogenitou struktury.

Model pro vytvoření čar konstantní pevnosti pro litiny s kuličkovým až červíkovitým grafitem byl ovšem vytvořen pouze z jedné produkční litiny ze slévárny Focam s.r.o. Olomouc a je tudíž žádoucí platnost tohoto modelu ověřit i na dalších materiálech z jiné produkce.

V současné době je již tato metoda používána v praxi a to ve firmě Tedom. Jedná se zde o diagnostiku odlévaných částí Stirlingova motoru DOMENOU B3, HB a ultrazvukem. Tyto díly jsou odlévány slévárnou Focam s.r.o. Výsledky jsou vyhodnocovány dle mnou navržených matematických modelů. Testovány jsou ojnice, kliková hřídel a válec z litiny s kuličkovým gafitem (obr.12.2) a skříň a víko skříně z litiny s lupínkovým grafitem (obr.12.1).



Obr 12.1 Části Stirlingova motoru z litiny s lupínkovým grafitem



c) válec

Obr 12.2 Díly Stirlingova motoru z litiny s kuličkovým grafitem

12.2 Redukční matematické modely pro kruhové vzorky

Snahou bylo usnadnit výběr místa vhodného ke kontrole metodou magnetického bodového pólu. Prvotním cílem bylo vytvořit model, který by pokryl celou škálu tvarů grafitu v litině. Na základě rozboru získaných dat se však ukázalo, že i zde jsou skokové změny obdobné těm, které nedovolily spojit model isopevnostních čar pro litiny s grafitem lupínkovým a kuličkovým až červíkovitým. Opět se ukázala nutnost rozdělit tyto litiny do dvou samostatných skupin.

Tavby A až D utvořily změřenými hodnotami kompaktní celek, z kterého mohl být odvozen redukční vzorec pro výpočet tvrdosti dle Brinella (9.4). Hodnoty tvrdosti spočítané dle tohoto vzorce se liší od skutečné tvrdosti změřené metodou Brinell 5/750 maximálně v rozsahu \pm 5% z této hodnoty. To je hodnota velmi příznivá, neboť norma ČSN EN ISO 6506-2 uvádí maximální možnou odchylku při kalibraci tvrdoměru při měření tvrdoměrné destičky v této oblasti tvrdostí \pm 2,5%. To znamená, že je možné se vzorcem (9.4) pracovat s tolerancí pouze dvakrát větší než je hodnota požadovaná při kalibraci. Samozřejmě se musí vzít v úvahu různý stupeň legování Cu, kdy byla prokázána souvislost mezi zvyšujícím se procentem Cu a rostoucí hodnotou remanentní magnetizace, viz. graf 9.4 a rovnice (9.5). Z tohoto důvodu je potřeba ověřit platnost získaných závislostí i na litinách s lupínkovým grafitem z jiných zdrojů.

Naproti tomu tavby 1Y až 5Y se ukázaly jako příliš rozdílné ke společnému popisu redukčního vzorce. Jako nejvýhodnější se proto jevilo rozdělení taveb dle matrice na litiny s převažující složkou perlitickou a feritickou. Z taveb s převažující perlitickou složkou, tedy TY a 4Y byl získán obdobným způsobem vzorec (9.8). Zde došlo k mírnému rozšíření mezí nepřesnosti na \pm 7% ze skutečné hodnoty tvrdosti.

Z naměřených hodnot poslední části vzorků, taveb 3Y a 5Y nebylo možné získat jakoukoliv závislost (graf 12.1), která by vedla k určení konstant A a B potřebných ke stanovení redukčního vzorce. Z tohoto důvodu by bylo potřeba data rozšířit o další získaná z odlišných taveb.

Tyto vztahy (9.5) a (9.8) lze použít nejen na výpočet hodnot tvrdosti na kruhových průřezech, ale je také možné tento postup obrátit. A u sériové výroby dle známé tvrdosti kontrolovat průměr odlitků.



12.3 Modelování tvaru disperze a matrice

Tato kapitola obsahuje hlavní cíl této práce, a to identifikace litiny pouze pomocí nedestruktivních metod. Při strukturoskopii byly využita metoda magnetického bodového pólu podporovaná ultrazvukem. Na správnost dělení litin dle rychlosti zvuku ukazuje graf 12.2 získaný z měření na litinových vzorcích s lupínkovým, červíkovitým a kuličkovým grafitem o velikosti 5. Grafit stejné velikosti je i ve vzorcích z taveb Focam s.r.o.



Graf 12.2: Závislost podélné rychlosti zvuku [m/s] na stupni eutektičnosti, platí pro grafit velikosti 5.

Vlivem tepelného zpracování odlitků by však mohlo dojít ke zkreslení výsledné rychlosti zvuku, vlivem kalení a žíhání dochází k poklesu rychlosti. Proto je nutné znát historii kontrolovaných odlitků. Opačný vliv na rychlost zvuku má ovšem velikost grafitu. Se zmenšující velikostí grafitu roste rychlost v_L , dle grafu uvedeného v diplomové práci ing.Bejčkové, graf 12.3.



Graf 12.3: Vliv velikosti grafitu na rychlost šíření zvuku litinou.

Stejný způsobem jsou ovlivnitelné i hodnoty remanentní magnetizace. Proto je nutné získané výsledky aplikovat použe na odlitky s grafitem o velikosti 5, případně ověřit platnost pro různé velikosti.

Při hodnocení struktury litin hodnotou intenzity zbytkového magnetického pole roste tato veličina s množstvím perlitu ve struktuře. Z tohoto důvodu bylo nutné k tomuto popisu vyjádřiť vliv jednotlivého tvaru grafitu na celé škále obsahu perlitu, graf 10.9. Již od 50% podílu perlitu ve struktuře je patrný výrazný vliv tvaru grafitu na tuto hodnotu. Soubor taveb ze slévárny Focam s.r.o. bohužel nepokryl potřebný rozsah ze sta procent a proto byla usečka pro červíkovitý grafit prodloužena dle předpokládaného lineárního průběhu. Pro lupínkový grafit byla k dispozici pouze hodnota pro perlitickou matrici, neboť feritická litina s lupínkovým grafitem se v technické praxi prakticky nevyskytuje. Jedním z možných způsobů získání této litiny je nechat odeznít modifikační účinek hořčíku v tavenině.

12.4 Podobně disperzní materiály

Cílem této kapitoly bylo ověřit možnosti metody magnetického bodového pólu při aplikaci na podobně disperzní materiály jako jsou grafitické litiny. Při simulaci degradace austenitických vantilových ocelí se potvrdila vysoká citlivost přístroje DOMENA B3. Tímto přístrojem bylo detekováno množství feromagnetických částeček ve vzorku, které tvořily pouze 0,5 hmotnostních procent. Byla prokázána vysoká citlivost této metody, na rozdíl od metody MAT, která takto malé množství nebyla schopná zachytit. V úvahu se musí vzít ovšem fakt, že i ve vzorku s nejmenším hmotnostním poměrem byl stále sedm krát větší hmotnostní poměr feromagnetických a paramagnetických složek, Tohoto hmotnostního poměru nebylo možné dosáhnout, vzhledem k přesnosti odvažování prášku. Tato metoda však již byla použita při kontrole a diagnostice sedlových ploch ventilů a jejich vedení, [41, 42, 43].

Jako další vhodná konstrukce materiálu pro metodu magnetického bodového pólu se do budoucna jeví tzv.sendvičové plechy. Variant těchto výrobků je celá řada. Pro jednoduchost byl vybrán typ s jednou paramagnetickou vrstvou uprostřed. Toto testování potvrdilo omezené možnosti této metody měření, jak je vidět z grafu 11.2. Při určité síle vnitřní vrstvy se bude hodnota zbytkové magnetizace M asymptoticky blížit maximální hodnotě pro daný produkt. Z variability řešení sendvičových plechů obecně, že měření je potřeba aplikovat na každý typ zvlášť a podle výsledků bude teprve možné vysledovat určité závislosti vzhledem k tloušťce krycího plechu a vnitřní paramagnetické vrstvy.

13 Budoucnost metody magnetického bodového pólu

Měření provedená v rámci této disertační práce ukázala na potřebu vývoje nového přístroje pro měření intenzity zbytkového magnetického pole, který bude schopen detekovat rozdílný vnitřní demagnetizační činitel grafitu. Lupínky grafitu činí větší magnetický odpor LLG než má LKG. Současný přístroj Domena B3 využívaný v rámci této práce měří jen absolutní hodnotu Hrn v ose snímače při povrchu vzorku.

V současné době je k dispozici nový přístroj Domena GR, která je schopná měřit gradient intenzity zbytkového magnetického pole. Tento přístroj je možné použít se sondou GR-T, jež měří rozdíl normálných Hr v tečném směru, nebo se sondou GR-N, která měří rozdíl normálných Hr v normálném směru, schéma na obr.13.2. Nevýhodou je skutečnost, že k magnetování dochází výbojem z kondenzátoru, což nedává příliš velkou reprodukovatelnost.



Obr 13.1: Domena GR se sondou GR-T (nahoře), respektive GR-N



Obr 13.2: Schéma sondy GR-N a GR-T.

Tento přístroj by k dispozici až v posledních týdnech před odevzdáním této práce. Proto bylo měření provedeno pouze na několika vzorcích. V tabulce 13.1 jsou uvedeny hodnoty získané na vzorcích z taveb A, 1Y, 3Y, 4Y a 5Y při magnetizaci M1 a následně M3.

Tavba	M1(GR-N)	rozptyl	M3 (GR-N)	rozptyl
	[A/m]		[A/m]	
Α	90.3 US	2.9	150.3	5.5
1	150,1 th	13	209	7.7
3	31.3 E	2.5	52.6	0.9
4	85.5	1.6	143	3.2
5	32.8	1.7	52.4	8.5

Tab 13.1: Hodnoty intenzity zbytkového magnetického pole změřené sondou GR-N.

Tab 13.2: Hodnoty intenzity zbytkového magnetického pole změřené sondou GR-T.

 (\mathbf{I})

Tavba	M1(GR-T)	rozptyl	M3 (GR-T)	rozptyl
	[A/m]		[A/m]	
Α	97.5	4.4	143.7	3.1
1	142	2.1	194.3	4
3	33	1.1	52.9	11.8
4	83.3	1.2	117.5	3.5
5	32.6	2.3	46.9	0.2
Již z prvních měření je možné vysledovat schopnost přístroje rozlišovat lupínkový grafit od kuličkového a červíkovitého bez ohledu na matrici, například poměrem gradientů, tab. 13.3. Tento poměr ukáže o jakou litinu z pohledu grafitu se jedná a dle toho bude možné vybrat správný výraz pro výpočet tvrdosti.

Tavba	gradN/gradT při M1 [-]	M6/M2 [-]
Α	0,926	1,714
1Y 🖯	1,057	1,582
3Y 🗡	0,946	1,626
4Y	1,026	1,546
5Y	1,01	1,534
	[[a]	

Tab. 13.3: Poměr gradientů při různé magnetizaci

První testy byly také již provedeny na přístroji Domena II – Promag, u kterého je výkonová část proudového zdroje koncipována jako převodník napětí-proud, u něhož je velikost výstupního proudu a jeho tvar jednoznačně řízen jen a jen vstupním napětím a nezávisí na změnách parametrů cívky snímače. Změna parametrů je způsobována oteplením vinutí snímače nebo jeho přiložením k povrchu vzorku. Jak bylo ukázáno rozborem tyto změny nezanedbatelně ovlivňují velikost amplitudy proudového pulsu při jeho generování kondenzátorovým vybíjením, tak jak je tomu u předchozích typů strukturoskopů Domena.



Obr. 13.3: Strukturoskop Domena II – Promag

Ze závěru zprávy z prvního testování vyplývá reprodukovatelnost hodnot elektronické části se pohybuje v mezích $\pm 0.1\%$, tedy velmi dobrá (signál z Hallových sond byl simulován dvěma monočlánky 1.5 V, zapojenými proti sobě). S připojenými Hallovými sondami byl naměřen výsledek s větší nejistotou (cca $\pm 1,5\%$). Nedostatkem tohoto přístroje je ovšem absence sond GR – T a GR – N.

Cílem je proto spojení obou přístrojů s úmyslem zajištění stabilně magnetizující Domeny spolu se sondami schopnými měřit gradient tečný a normálný. Lze předpokládat, že vzájemným vztahem <Hrn;Ngrad/TgradHrn> bude možné popisovat vliv vnitřního demagnetizačního činitele grafitu. Právě přistoupením k měření gradHrn, bude možno rozšířit aplikace na tepelné zpracování ocelí – podobně jako je tomu v Rusku (např. stav zušlechtění). Hlavně ale na topografii Hrn magnetické skvrny, kdy se dá předpokládat její rozdílnost pro LLG a LKG vlivem vnitřního demagnetizačního činitele grafitu

Fakulta strojní – Katedra materiálu CHNICKÁ UNIVERZ

14 Závěr

Zatímco dochází nejen v České republice k neustálému rozvoji automobilového průmyslu, který i přes vývoj moderních materiálů stále spoléhá na litinu s kuličkovým, potažmo s červíkovitým grafitem, jako na materiál nejvhodnější pro výrobu bezpečnostních dílů, chybí snadná, rychlá a především spolehlivá nedestruktivní metoda k popisu struktury litin a hlavně tvaru grafitu.

Bohužel není této problematice věnována téměř žádná pozornost. Světlou vyjímkou je více méně pouze Běloruská Akademie věd, avšak ani zde neaplikují metodu magnetického bodového pólu na litiny, ale na pouze ocele. Metoda magnetického bodového pólu se právě z pohledu rychlosti jeví jako jedna z nejperspektivnějších metod ke zjišťování těchto parametrů u litin, kde u LKG a LČG je hrozba ztráty modifikačního účinku hořčíku.

Shrnutí výsledků práce:

Přestože bylo testování podrobeno pouze omezené množství taveb grafitických litin, podařilo se ve spolupráci se slévárnou Focam s.r.o. Olomouc pokrýt širokou oblast litin se všemi druhy grafitu. Nesporným přínosem byl i fakt, že se jednalo o běžnou produkční litinu.

- Křivky konstantní pevnosti pro LKG a LČG navazují na již dřívější práce zabývající se pouze litinou s lupínkovým grafitem. Byl potvrzen předpoklad o nemožnosti propojení obou modelů. Tyto křivky jsou již využívány v praxi při kontrole odlitých částí motoru v Tedom s.r.o. v Jablonci nad Nisou.
- Další část práce reagovala na velmi častý problém při měření a to problém všeobecný. Přístup k měřenému povrchu a přesnost samotného měření je vzhledem ke složitosti odlitků leckdy problematická. Jednalo se o aplikaci sondy na měřený povrch o různých průměrech s cílem získat redukční vzorec. Tento postup lze však také možno obrátit a použít při známé tvrdosti odlitků ke kontrole přesnosti průměrů.
- Měření za účelem identifikace grafitu v litinách ukázala, že k tomuto popisu je potřeba znát více než jeden parametr, při použití současných přístrojů. Při

spojení metody magnetického bodového pólu a ultrazvuku je však možné popsat převažující složku matrice a tvar grafitu, což bylo ukázáno dvěmi způsoby.

 Co se týká aplikace metody magnetického bodového pólu na materiály disperzí podobné litinám, byla ověřena vysoká citlivost přístroje Domena B3 a tím i možnost širokého použití, což ovšem nebylo touto prací možné obsáhnout.

Příslibem do budoucnosti jsou tak dva nové přístroje Domena GR a Domena II – Promag. Jejichž spojením by mohl vzniknout přístroj, který by byl schopen pomocí jednoho měřeného parametru identifikovat tvar grafitu bez ohledu na matrici.

V LIBER(Fakulta strojní – Katedra materiálu CHNICKÁ UNIVERZITA

Seznam použité literatury:

- [1] PLUHAŘ J., KORITTA J.: Strojírenské materiály, SNTL, Praha 1966
- [2] PLUHAŘ J., KORITTA J.: Nauka o materiálech, SNTL, Praha 1989
- [3] MACHEK V., SODOMKA J.: Nauka o materiálu 1, ČVUT, Praha 2000
- [4] www.boucnik.cz/litiny.htm , ze dne 3.3.2008
- [5] PLACHÝ J., NĚMEC M., BEDNÁŘ B.: Teorie slévání, ČVUT, Praha 2002, ISBN80-01-02471-7
- [6] ALEXIN J.: Fyzikální metalurgie, VŠST, Liberec 1986
- [7] Boucník, P.: Simulace mikrostruktury s ohledem na dosažení požadovaných vlastností odlitků, Disertační práce, Brno, VUT, fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálového inženýrství, 2001.
- [8] www.astm.com, ze dne 22.03.2008
- [9] http://ime.fme.vutbr.cz, ze dne 24.03.2008
- [10]Norma ČSN EN ISO 945, Litina Určení mikrostruktury grafitu, Úřad pro normalizaci a měření, Praha 1996
- [11]NĚMEC M., PLACHÝ J., RŮŽIČKA A., BEDNÁŘ B., PROCHÁZKA J.: Výzkum vlivu stopových prvků a nečistot na vlastnosti šedé litiny, ČVUT, Praha 1979
- [12] Věchet, M., Kesl, J., Špika, E., Eder, V.: Defektoskopie v otázkách a odpovědích; SNTL; Praha 1989; str. 83-85
- [13] SKRBEK B.: Perspektiva nedestruktivní strukturoskopie odlitků, In Sborník přednášek konference Slévárenství ve třetím tisíciletí, Vědeckotechnická společnost západních Čech, Plzeň 2001
- [14] Svořák, Jaroslav. Nedestruktivní zkoušení platné ČSN k 31.12.2004. NDT Welding BULLETIN, II/2004, s.59-64, ISSN1213-3825.
- [15] Skrbek, B.: Nedestruktivní materiálová diagnostika litinových odlitků; disertační práce; Liberec 1988; str.73
- [16] V. F. Matyuk, M. A. Mel'gui, A. A. Osipov, V. B. Kratirov, A. L. Lyubarets, and S. V. Shepturo, On Possibility of Testing the Mechanical Properties of 50KhGFA Steel by the Pulsed Magnetic Method, Institute of Applied Physics, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus Received January 21, 2003
- [17] V. F. Matyuk, S.A. Goncharenko, H. Hartmann, and H. Reichelt, Modern State of Nondestructive Testing of Mechanical Properties and Stamping Ability of Steel Sheets in a Manufacturing Technological Flow, Institute of Applied Physics, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus Soil Quality Research Center, Brandenburg, Germany Received December 26, 2002
- [18] V. F. Matyuk, M. A. Mel'gui, A. A. Osipov, V. D. Piunov, and V. N. Kulagin, IMA-4M Pulsed Magnetic Analyzer, Institute of Applied Physics, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus Received November 14, 2002
- [19] V. F. Matyuk, M. A. Mel'gui, D. A. Pinchukov, and A. L. Lyubarets, Inspection of the Strength Characteristics and Heat-Treatment Quality of Ferromagnetic Articles Based on Parameters of the Residual-Magnetization Hysteresis Loop upon Their Local Magnetization and Magnetization Reversal in a Pulsed Magnetic Field with a Variable Amplitude: II. Steel 60C2, Institute of Applied Physics, Belarussian Academy of Sciences, ul. Akademicheskaya 16, Minsk, 22072 Belarus Received December 21, 2004
- [20]I.Tomas, Non-Destructive Magnetic Adaptive Testing of Ferromagnetic Materials, J.Mag.Mag.Mat. 268 (2004) 178

- [21]I.Tomas, O.Stupakov, J.Kadlecova, O.Perevertov, Magnetic Adaptive Testing low magnetization, high sensitivity assessment of material modifications, J.Mag.Mag.Mat. 304 (2006) 168.
- [22]G.Vertesy, T.Uchimoto, T.Takagi, I.Tomas, O.Stupakov, I.Meszaros, J.Pavo, Minor hysteresis loops measurements for characterization of cast iron, Physica B372 (2006) 156.
- [23] G. Vertesy, I. Tomas, I. Meszaros, Nondestructive indication of plastic deformation of cold-rolled stainless steel by magnetic adaptive testing, J. Mag. Mag. Mat. 310 (2007) 76.
- [24] F.Preisach, Zeit. fur Physik 94 (1935) 277
- [25] Skrbek, B.: Bezdemontážní magnetická diagnostika strukturní matrice litinových součástí.In:TechMat 04 "Perspektivní technologie a materiály pro technické aplikace";
 Pardubice : Univerzita Pardubice, 2004. str.11-14; ISBN 80-7194-707-5
- [26] Skrbek, B., Nosek, V. Lokální magnetická strukturoskopie vliv kvality povrchu na výsledky; Vědecká pojednání XI/2005. Liberec :Technická univerzita v Liberci, 2005; str. 350-356; ISBN 80-7083-966-X
- [27] Technický popis a návod k obsluze DOMENA B3.b; Elkoso,spol. s r.o.;Brno 2003; str.2
- [28]Norma ČSN EN ISO 6506-1, Kovové materiály Zkouška tvrdosti podle Brinella - Část 1: Zkušební metoda, Úřad pro normalizaci a měření, Praha 2006
- [29] Norma ČSN EN ISO 6506-2, Kovové materiály Zkouška tvrdosti podle Brinella - Část 2: Ověřování a kalibrace zkušebních strojů, Úřad pro normalizaci a měření, Praha 2006
- [30]Norma ČSN EN 10002-1, Kovové materiály Zkoušení tahem Část 1: Zkušební metoda za okolní teploty, Úřad pro normalizaci a měření, Praha 2002
- [31]Norma ČSN 420316, Zkoušení kovů. Zkušební tyče válcové se závitovými hlavami pro zkoušku tahem, Úřad pro normalizaci a měření, Praha 1980
- [32] Laser Extensometer Technical Documentation
- [33]Norma ČSN 420461, Hodnocení metalografické struktury litin, Úřad pro normalizaci a měření, Praha 1975
- [34] SKRBEK B.: Kvalita bloků válců M4209, M3341/II, Zpráva 940305 LIAZ stř.10-290
- [35] SKRBEK B.: Návod na obsluhu přístroje REMAG a provádění zkoušky, Jablonec n. Nisou 1984
- [36] ANDRŠOVÁ Z. Teplotní stabilita měření magnetickým bodovým pólem, Diplomová práce, TU Liberec 2006
- [37] SKRBEK B.: Problémy aplikace grafitických litin u vznětových motorů a nákladních automobilů, Habilitační práce, TU Liberec 2000
- [38] SKRBEK B.: Problémy aplikace grafitických litin u vznětových motorů a nákladních automobilů, Habilitační práce s komentářem, II svazek, TU Liberec 2000
- [39] www.testima.cz, ze dne 12.1.2008
- [40] www.ndt.cz, ze dne 11.11.2007
- [41] Skrbek B. Vodičková V., Diagnostics textures smalt high up-thermal alloys on sellar surface valves, TU v Liberci.
- [42] Skrbek B., Changes textures austenitic valve steel running, TU v Liberci.
- [43] Skrbek B., Identifikace materiálu vzorku vedení ventilu, zkušební protokol 0711, Tedom s.r.o., 2008

Seznam příloh:

- Příloha 1 Seznam Y-bloků taveb 1Y, 3Y, 4Y, 5Y, A, B, C, D
- Příloha 2 Tabulka naměřených hodnot pro získání isopevnostních čar
- Příloha 3 Záznamy ze statické zkoušky tahem



	První sada				
1Y1	3 Y1	4Y1	5Y1		
1Y2	3Y2	4Y2	5Y2		
1Y3	3Y3	4Y3	5Y3		
1Y4	3Y4	4Y4	5Y4		
1Y5	3Y5	4Y5	5Y5		
1Y6	3 Y6	4Y6	5Y6		
1Y7	3 Y7	4Y7	5Y7		
1Y8	3 Y8	4Y8	5Y8		
_1Y9	3Y9	4Y9	5Y9		
1 Y10	3Y10	4Y10	5Y10		
1Y11		4Y11	5Y11		
1 Y12		4Y12	5Y12		
1 Y13		4Y13			
1 Y14					
V					
, terri					
Druhá sada					
A1 st	B1	C1	D1		
A2	B2	C2	D2		
∐A3 [≥]	B3	C3	D3		
A4	B4	C4	D4		
A5	B5	C5	D5		
A6	B6	C6	D6		
A7	B 7	C7	D7		
A8 _	B8	C8	D8		
A9 🖻	B 9	С9	D9		
A10	B10	C10	D10		
A	-		-		
E					
5					
ĒC					

Příloha 1 - Seznam odlitků ze slévárny Focam s.r.o.

	<u> </u>		
Tyč	L/Lu [1]	HB [10/3000]	Rm [MPa]
1Y2-a1x	0.963846	278	786
1 Y2-a3 x	0.956938	268	793
1Y2-b1x	0.965695	246	825
1Y2-b2x	0.96577	255	824
1Y4-a1x	0.962637	265	797
1Y4-a2x	0.961818	228	804
1Y4-b1x	0.959222	233	800
1Y4-b2x	0.96251	241	789
1Y6-a1x	0.956984	239	804
1Y6-b2x	0.964596	250	799
3Y1-a1x	0.897951	152	314
3Y1-a3x	0.897464	173	318
3Y5-a1x	0.888478	140	283
3Y5-a2x	0.839672	138	307
3Y5-b1x	0.895025	153	298
3Y5-b2x	0.875271	150	299
3Y7-a1x	0.887885	135	265
3Y7-a2x	0.885623	144	300
3Y7-b1x	0.896548	139	285
3Y7-b2x	0.885962	151	306
4Y6-a1x	0.880743	165	418
4Y6-a2x	0.872143	161	382
4Y6-b1x	0.868903	179	363
4Y6-b2x	0.856708	161	408
4Y8-a1x	0.87265	187	396
4Y8-a2x	0.872156	166	410
4Y8-b1x	0.863254	171	398
4Y9-a1x	0.872452	169	411
4Y9-b1x	0.862154	175	401
4Y9-b2x	0.858965	175	385
5Y1-a1x	0.962741	161	427
5Y1-a2x	0.962607	159	410
5Y1-b1x	0.954346	161	444
5¥1-b2x	0.955415	151	439
5 Y2-a 1x	0.957325	166	432
5 Y2-a 2x	0.957401	162	427
5 Y2-b 2x	0.955544	160	452
5 Y4-a 1x	0.956854	158	441
5Y4-a2x	0.960215	161	436
5Y4-b1x	0.952366	162	440

Příloha 2 - Tabulka hodnot pro výpočet isopevnostních čar



Tahová charakteristika vzorku 1Y1-b2x



Tahová charakteristika vzorku 1Y3-a1x



Tahová charakteristika vzorku 3Y4-b1x



Tahová charakteristika vzorku 3Y3-a1x



Tahová charakteristika vzorku 4Y1-b2x