

## 2.6 Závěry

**Struktura a vlastnosti** izotermicky kalených litin byly podrobně popsány již v mnoha publikacích. Zkoumání struktury a hledání optimálních podmínek TZ také nebylo náplní této práce. I tak byly ale zjištěny a doplněny některé zajímavé vlastnosti, např. se potvrdil předpoklad rychlejších reakcí při izotermické přeměně u dosud málo známé litiny s vermikulárním grafitem – AVGI, včetně jejího potenciálu pro únavově a kontaktně namáhané díly (viz vysoké hodnoty meze pružnosti vzhledem k mezi pevnosti, snížení počátečního modulu pružnosti). Obsáhlé zkoumání mikrostruktury vznikající při různých variantách TZ a na ni navazujících mechanických vlastností zde bylo provedeno z důvodu získání vstupních dat pro nedestruktivní měření. Výsledky byly poněkud poznamenány omezeným souborem vzorků - pro získání přesnějších závislostí vlivu podmínek TZ na strukturu a vlastnosti zkoumaných izotermicky kalených litin by bylo vhodné prozkoumat ještě minimálně výdrže 30 min. (především v případě LVG), resp. 50 min. (ADI,AGI) v rozsahu „správných“ výdrží a také 90, 120, příp. 240 min (význam především pro izotermické teploty na spodní hranici a pro LVG, jejíž reakce probíhají pomaleji). V případě teplot by bylo vhodné doplnit 350°C (hranice tvorby hAF) a také 180-200°C, resp. 420-450°C (p řechodové struktury).

Hlavním cílem práce bylo **získat závislosti mezi strukturou a vlastnostmi a nedestruktivně měřitelnými parametry** a stanovit **postupy měření nedestruktivními metodami**, jež by umožnily kontrolu celého procesu TZ od vlastností vstupního materiálu přes kontrolu správnosti TZ až po případné povrchové zpevnění. Výsledky akustických měření mají význam především pro kontrolu správnosti vyloučení grafitu, tedy jako vstupní kontrola před TZ a dále jako doplňková kontrola mikrostruktury po TZ k magnetickému měření. Na mikrostrukturu matrice citlivě reaguje především hodnota  $dc_{L,TZ}$ , tedy rozdíl rychlosti UZ před a po TZ. Velmi užitečná (pro konstruktéry) je také možnost zjištění počátečního modulu pružnosti  $E_0$  pomocí ultrazvuku. Výsledky magnetických měření jsou velmi vhodné ke kontrole mikrostruktury po TZ prostřednictvím opakované magnetizace. Rozdíl  $dHr$  mezi 1. a 2. měřeními z panenského stavu jednoznačně udává typ matrice. Lze také poměrně spolehlivě predikovat obsah zbytkového austenitu. Určení mechanických vlastností jako je pevnost a tvrdost nedestruktivně přímo na součástech po TZ pomocí metody magnetické skvrny má vzhledem k poněkud rozkolísaným závislostem spíše informativní charakter. I když toto řešení NDT kontroly izotermicky kalených litin není zdaleka ideální, zcela jistě nelze přesně kontrolovat příliš úzké intervaly výdrží (př. v řádu minut) nebo izotermických teplot (rozdíl menší než desítky stupňů – obě metody sice reagují na změnu ve struktuře, ale rozdíly mezi naměřenými hodnotami  $c_L$  a  $Hr$  nejsou v případě blízkých hodnot dostatečně výrazné), jde zcela jistě o metodiku vhodnou k hlídání výrobního procesu izotermického kalení a v porovnání s metodami vyvíjenými v zahraničí (měření útlumu, vlastní frekvence, metoda vířivých proudů) mnohem méně komplikované. Měření metodou magnetické skvrny je po správném nakalibrování záležitostí několika sekund a zvládne jej i méně kvalifikovaná obsluha. Navíc přístroje DOMENA jsou již v českých slévárnách rozšířeny, přičemž jejich průměrná pořizovací cena se v současné době pohybuje kolem 70 000 Kč. Měření akustické dráhy, resp. přímo rychlosti UZ je také poměrně jednoduchou záležitostí, přičemž k měření postačí nejzákladnější UZ přístroj, např. tloušťkoměr, jehož pořizovací cena se pohybuje řádově max. v desítkách tisíc.

Ačkoli závislosti mezi strukturou a NDT parametry jsou dosti komplikované a neumožňují sestavení komplexnějších závislostí (neboť jednotlivé vlivy jsou často protichůdné v jiném rozsahu teplot), je zcela jisté, že po proměření celého původně plánovaného spektra teplot a výdrží dojde k celkovému upřesnění získaných závislostí a bude možné sestavit i vícerozměrné modely, jako např.  $Rm=f(c_L, Hr)$ ,  $Az=f(dc_L, dHr)$  aj. Také bude možné využít derivace kurčení extrémů u nemonotonních funkcí.

Získané **závislosti mezi strukturou a parametry NDT** jsou platné pro rovinné vzorky (min.24x24mm) o tloušťce min.10 mm. Tyto svědečné vzorky obrobené ze standardních tyčí (D30mm pro AGI, Y1 pro ADI) se tepelně zpracují současně s obrobky.

Nyní jsou vyvinuté metody **testovány ve výrobě** spol. TEDOM Motory, a.s. přímo na konkrétních součástech (vodítka ventilů z AGI, oběžná kola vodních čerpadel z ADI a pouzdra ložisek pohonu vstřikovacích čerpadel z ADI). Po proměření potřebných parametrů odlitků (mikrostruktury, mechanické vlastnosti, magnetické a akustické vlastnosti) budou teoretické závislosti upraveny vzhledem k naměřeným hodnotám, a korigovány vzhledem k tvaru součástí (před. poloměru zakřivení), tloušťce stěny (jedná se vesměs o tenkostěnné odlitky pod 5 mm – značný vliv před. na metodu magnetické skvrny) a hloubce oduhličení povrchu (TZ probíhá bez ochranné atmosféry). Následně budou sestaveny postupy kontrol dle konkrétních podmínek v provozu (technologický postup, dostupné přístroje apod.) a upraveny dle štábní kultury podniku. Implementace kompletní NDT kontroly výroby daných součástí od prvotních zkoušek až po vyladění postupů se pohybuje v horizontu půl roku. Další uplatnění naleznou kontrolní postupy i ve spol. AXL Semily, která zpracovává odlitky z ADI mimo jiné hlavně pro letecký průmysl a v blízké budoucnosti také v kalírně QIP Brno, která je zainteresována v možnosti zpracování tenkostěnných odlitků z AVGI. Budou – li tyto postupy v praxi ověřeny jako spolehlivé, bude podána přihláška Úřadu pro ochranu duševního vlastnictví.

Dle požadavku zpracovatele izotermicky kalených litin fy TEDOM, a.s. byly všechny varianty **TZ austenitizovány s dvojitou výdrží** na teplotě 900°C – konvenčních 90 min a krátkých 30 minut. Úkolem bylo ověřit, zda by nebylo možné dosáhnout úspor ve výrobě zkrácením austenitizační doby kalených součástí bez výraznějšího negativního vlivu na strukturu a vlastnosti. Z naměřených hodnot a analýz struktury vyplynulo, že pro dané materiály a tloušťky stěn má rozdíl v době austenitizace jen minimální vliv jak na strukturu (liší se především v obsahu Az – 90 min výdrž má obsah Az vyšší v řádu jednotlivých %), tak na mechanické vlastnosti (rozdíl v hodnotách tvrdosti v jednotkách Vickersů, rozdíl v hodnotách pevnosti v jednotkách, max. desítkách MPa). Je proto navrženo zkrácení doby austenitizace součástí z 90 až na 30 minut. Roční úspora činí cca 22 000 Kč na nákladech. (V ceně je započítána spotřeba el. energie a režie za zaměstnance podniku, celkový objem výroby činí cca 12 000 ks vodítek, 1000 ks pouzder a 1000 ks oběžných kol ročně).

Problematice **oduhličení** se také věnuje celá řada publikací. Použitím NDT detekce oduhličení se zabýval např. nedávno ukončený projekt GA101/09/1323, kde byla kromě metody magnetického bodového pólu použita i metoda magnetického adaptivního testování (MAT). Tento výzkum se však zabýval ocelí a jeho výsledky mohou sloužit pouze pro porovnání. Problematika měření oduhličení specifické skupiny materiálů ADI/AGI/AVGI je proto řešena zde samostatně a zahrnuje pouze metodu magnetické skvrny, neboť ta je použita i např. pro měření mechanických vlastností/identifikaci struktury. Závislost mezi hloubkou oduhličení a  $Hr$  není díky specifickým vlivům stejná ani pro danou skupinu litin (ADI/AGI/AVGI), ale liší se s každou variantou TZ, chemického složení či tvaru grafitu. I přes tyto podmínky lze metodu magnetické skvrny ke kontrole oduhličení využít, neboť rozdíly v hodnotě  $Hr$  mezi oduhličeným a neoduhličeným povrchem jsou vždy průkazné – velikost  $dHr_{ab}$  je i přes drobné výkyvy dostatečná přinejmenším k identifikaci oduhličené vrstvy, příp. k přibližnému určení její hloubky. Pro potvrzení předpokládaného účinku jednotlivých vlivů na hodnotu  $Hr$  a získání přesnějších průběhů  $Hr$ -*hloubka oduhličení* by však bylo vhodné provést měření pro širší škálu austenitických i izotermických výdrží a teplot v rozsahu daných intervalů. Při aplikaci metody na kontrolu oduhličení konkrétní součásti bude třeba vytvořit závislosti vždy pro konkrétní typ izotermicky kalené litiny, a měření zároveň přizpůsobit tvaru součásti. Výsledky těchto experimentů, spolu dalšími částmi výzkumu NDT strukturoskopie ADI/AGI/AVGI doplňují komplexní metodiku pro 100% nedestruktivní kontrolu správnosti TZ.

V této práci byla k měření pevnosti využita také **inovovaná mikroohybová zkouška**, která se ukázala být velmi vhodnou metodou pro zjišťování především lokálních mechanických vlastností v exponovaných částech odlitků, např. tenkých stěnách. Způsob určování mezních stavů bere v úvahu skutečné a nikoli smluvní vlastnosti (jako je např.  $R_{p0,2}$  nebo  $R_{p0,005}$  u zkoušky tahem). Velkou výhodou je podrobný elektronický záznam zkoušky s možností matematického zpracování dostupnými programy (Open Office Calc, MS Excel, Matlab). Vzhledem k rozměrům zkušebního přípravku a mobilnímu charakteru celého jeho příslušenství jej lze snadno použít téměř kdekoli. Zkouška samozřejmě nemusí být omezena pouze na oblast litin a zavádění nedestruktivní kontroly mechanických vlastností odlitků. Předpokládá se využití i pro další materiály, jako jsou kompozity, geopolymery, aluminidy železa či vzorky přírodních materiálů.

O drobném experimentu s **povrchovým zpevněním** lze říci, že především potvrdil předpoklady o účincích kuličkování povrchu izotermicky kalených litin a jeho vynikajících výsledcích a naznačil směr, kterým se mají ubírat další testy. Je nutné stále brát v úvahu, že experiment vycházel pouze z několika málo dostupných exemplářů vzorků mírně odlišných materiálů a v případě procesu kuličkování z neměnných, přednastavených parametrů. V případě dalšího výzkumu povrchového zpevnění ADI/AGI/AVGI, který by zahrnoval definici a nastavení přesných parametrů kuličkování a zkoumání jednotlivých vlivů by samozřejmě bylo možné naplánovat rozsáhlejší experimenty. Ty by kromě daleko většího spektra vzorků zahrnovaly i zásahy do nastavení stroje, samostatné programy pro konkrétní typy materiálů/součástí, testování jednotlivých druhů médií (ocel, sklo, různé průměry kuliček) apod. Teprve z těchto výsledků by bylo možné usuzovat na směrodatné závislosti mezi parametry zpevnění a nedestruktivním měřením magnetoelastického parametru.

Ačkoli byla práce realizována v omezeném rozsahu a s mnoha komplikacemi, přesto přinesla řadu užitečných poznatků jak o progresivních materiálech, kterými izotermicky kalené litiny jsou, tak i o nedestruktivních metodách, které na kontrolu těchto materiálů dosud nebyly aplikovány, nebo byly aplikovány jen v omezené míře. Většina výsledků byla v průběhu zpracování práce publikována na odborných konferencích i v časopisech, část z nich je také zařazena v databázích Scopus a Thomson-Reuters. Cílem práce bylo krom získání nových poznatků a návrhu kontrolních postupů také podpořit zájem českých výrobců o aplikaci těchto vynikajících materiálů, se zvláštním zaměřením na dosud nepříliš známou variantu s vermikulárním grafitem. V závěru roku 2013 pak byla ve spolupráci s průmyslovými partnery (Slévárna Heunisch Brno, Slévárna IEG Jihlava, kalírna QIP Brno, spol. TEDOM Motory Jablonec n/N) podána Technologické agentuře ČR žádost o přidělení grantových prostředků na společný projekt TA04010571 pod názvem „Vývoj výrobní technologie a nedestruktivní diagnostiky izotermicky kalených litin s vermikulárním grafitem (AVGI/ACGI) na odlitky pro dopravní průmysl“.