4/2021

SLÉVÁRENSTVÍ

since 1953 časopis pro slévárenský průmysl czech foundry journal

www.casopis-slevarenstvi.cz/cs/ www.svazslevaren.cz

Optimalizace technologie výroby odlitku vřeteníku z tvárné litiny

Optimization of the technology of headstock made by ductile iron

Ing. Bc. Jan Bredl, výrobní ředitel Metalurgie Rumburk, student Ph.D., Technická univerzita v Liberci, fakulta strojní, katedra strojírenské technologie

Klíčová slova: *litina s kuličkovým grafitem, těžký odlitek, optimalizace technologie*

Key words: *spheroidal cast iron, heavy casting, optimization of technology*

Abstrakt: *Tuhnutí a krystalizace litiny s kuličkovým grafitem je velmi složité a je ovlivněno celou řadou faktorů. Článek zkoumá některé tyto faktory pomocí termické analýzy. Využívá ji pro optimalizaci výroby těžkého odlitku – vřeteníku.*

Abstract: *Solidification and crystallization of spheroidal cast iron is very complex and is influenced by a number of factors. The article examines some of these factors using thermal analysis. It uses it to optimize the production of heavy casting – a headstock.*

Úvod

Litina s kuličkovým grafitem se řadí k významným konstrukčním materiálům, vykazuje velmi dobré mechanické vlastnosti již ve stavu po odlití. Dnes nalézá uplatnění v různých oblastech průmyslové výroby, jako např. strojírenský a automobilový průmysl. Litina s kuličkovým grafitem byla poprvé vyrobena ve 40. letech minulého století nezávisle ve dvou vědeckých pracovištích. Jedním pracovištěm byla výzkumná laboratoř British Cast Iron Research Association (BCIRA). Zde výzkumníci Henton Morrough a Williams prováděli pokusy s ovlivňováním tvaru grafitu v litině s lupínkovým grafitem modifikované cerem, [1], [2]. Druhým pracovištěm byla americká firma International Nickel Co. (INCO), zde se tým pracovníků pod vedením Keitha Millise zabýval ve čtyřicátých letech minulého století náhradou drahého niklu při výrobě otěruvzdorné litiny jinými kovy [3]. Zde byl použit kovový hořčík. Tím byl vyvinut druhý způsob modifikace tvaru grafitu pomocí kovového hořčíku. Brzy byly prodány licence a začala se výroba tohoto typu litiny zkoušet v různých průmyslově vyspělých zemí, také i u nás.

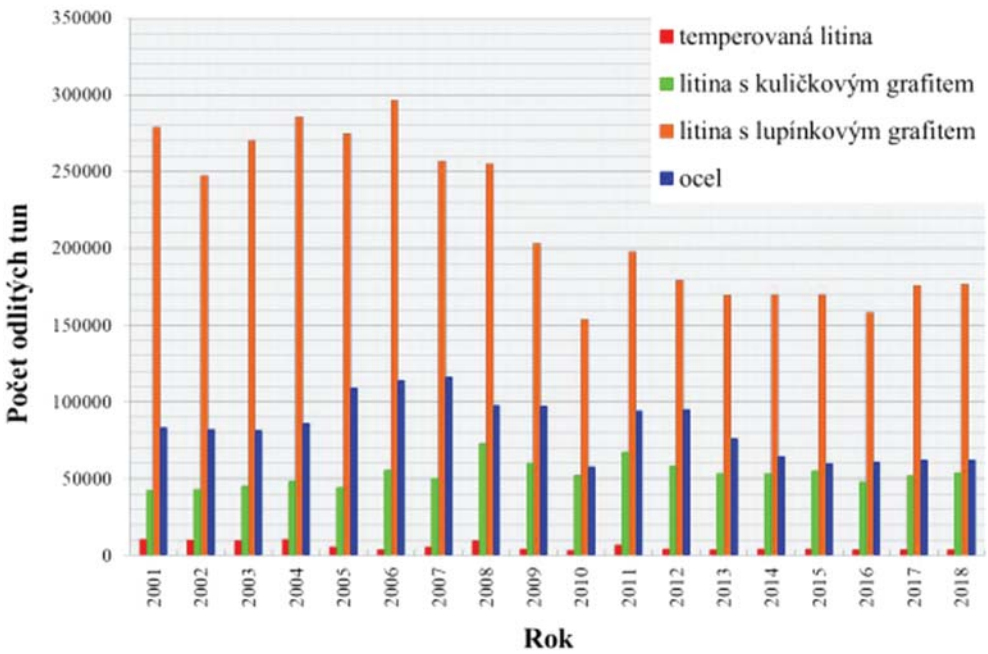
Jen pro zajímavost, je třeba se zmínit o tom, že kuličkový grafit byl v přírodě nalezen v eutektické hornině *pigmetit*, jak uvádějí GORSHKOV [2]. Není však známo, komu a jak se podařilo vyrobit tento materiál - LKG, avšak jasná struktura této litiny je zřejmá z odlitku litinového děla, které podle IVANOVA [3] údajně pochází ze 16. století. Kromě těchto nálezů je podle publikace [4] zmiňován způsob výroby jakostní litiny, který podle našich současných znalostí dává předpoklad pro vznik kuličkového grafitu.

Průmyslová výroba litiny s kuličkovým grafitem započala v roce 1948, ale její první zkušební odlití se uskutečnilo již koncem druhé světové války a následně po jejím skončení. Tehdejší vědecké práce prověřovaly především nodulační účinek ceru a hořčíku na vyloučený grafit.

V naší republice byly první tavby litiny s kuličkovým grafitem provedeny v letech 1949 a 1950 v několika českých slévárnách [5]. Mezi léty 1951 až 1953 se u nás uskutečnily zkoušky výroby litiny v tlakových pánvích, patentovaných V. Otáhalem [5]. Po mnoha zkouškách byl pro tyto účely jako vhodnější z těchto dvou prvků vybrán hořčík. Jeho hlavními přínosy byla spolehlivost a cenová dostupnost, z těchto důvodů se jevil jako vhodný kandidát pro výrobu LKG. Použití hořčíku však přinášelo jistá úskalí. Šlo především o jeho prudkou reakci s tekutým kovem, kterou bylo možné zmírnit dvěma způsoby, [7].

V počátcích výroby se provozní zkoušky a výroba realizovaly pomocí ponorného zvonu, kde byl do taveniny o vhodném chemickém složení ponořován čistý hořčík. Tato metoda pak byla nahrazena polévacími metodami. Další často používaný způsob modifikace byl pomocí tlakových pánví, kde se modifikace pomocí hořčíku realizovala při zvýšeném tlaku. Dalším významným milníkem při výrobě LKG bylo používání autoklávů, do kterého se umístila celá pánev s tekutým kovem o určitém chemickém složení. Tento způsob se v dnešní době již moc nepoužívá, [7]. Druhý způsob snížení prudkosti reakce hořčíku a taveniny byl založen na snížení obsahu hořčíku v modifikační přísadě jeho nahrazením pomocí dalších prvků, jako byly např. Ni, Cu, Si. Z těchto prvků to byl právě křemík, díky kterému se dosáhlo největšího rozšíření tohoto způsobu modifikace, vznikly tak známé předslitiny FeSiMg, které se používají dodnes a mají největší uplatnění pří výrobě LKG, [7].

I když v současnosti nelze prohlásit, že by produkce litiny s kuličkovým grafitem v ČR zažívala nárůst, ba naopak v posledních letech objem její výroby spíše stagnuje, tak se stále jedná o velmi oblíbený materiál, který má uplatnění v řadě odvětví (automobilový, potravinářský průmysl, energetika atd.). Na obr. 1 je uvedena výroba jednotlivých slitin železa v ČR od roku 2001 do roku 2018, [6].



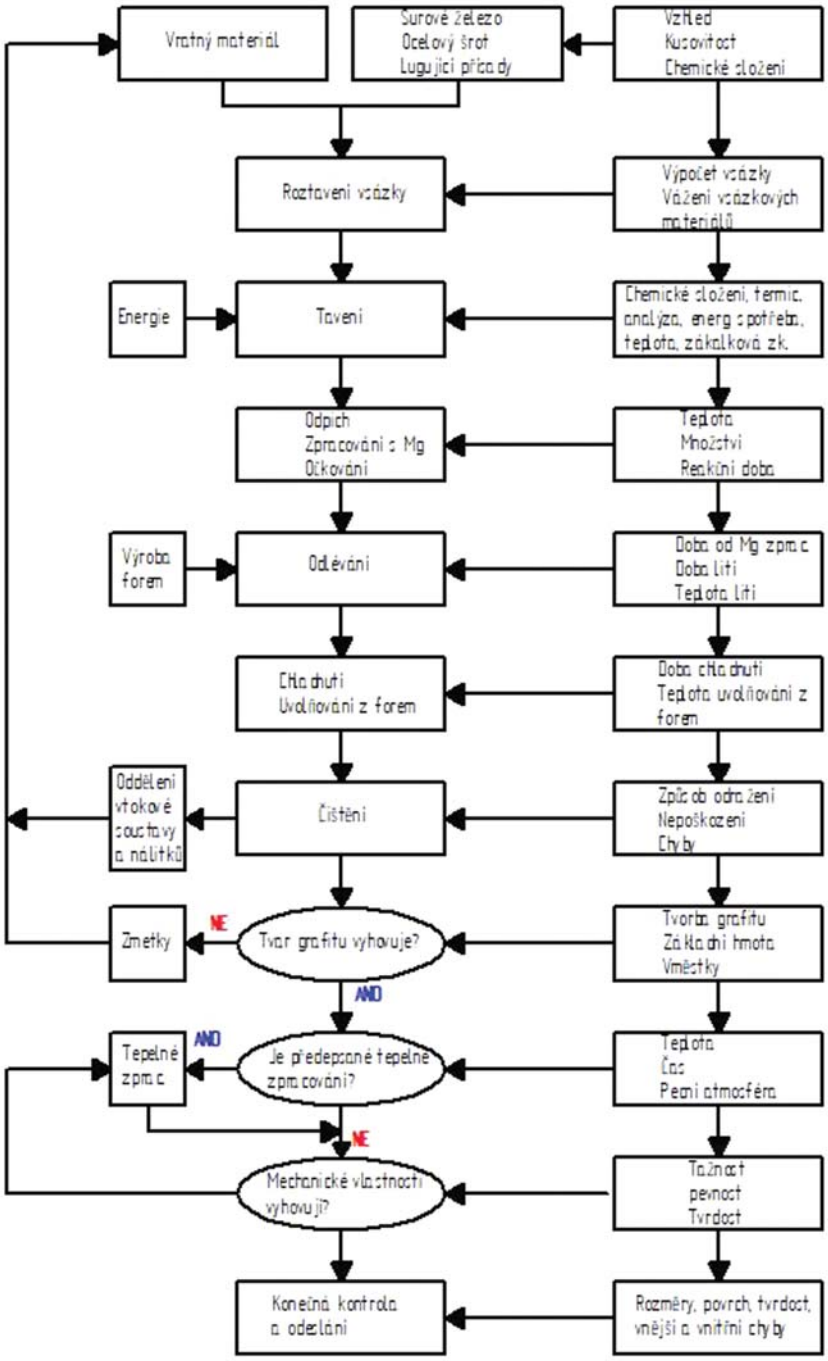
Obr. 1 Výroba odlitků ze slitin železa v ČR od roku 2001 do roku 2018, [6]

Použitelnost tohoto materiálu ke konstrukčním účelům je dána především jeho mechanickými vlastnostmi, které se se svými hodnotami přibližují k mechanickým vlastnostem oceli, ovšem výrobní cena litiny je nižší. To znamená, že litina s kuličkovým grafitem se svými mechanickými vlastnostmi nachází někde mezi litinou s lupínkovým grafitem a ocelí. Toto platí jak pro mechanické vlastnosti, tak pro technologické – konkrétně slévárenské jako je např. zabíhavost nebo sklon ke tvorbě staženin a ředin. Litina s kuličkovým grafitem je na výrobu z technologického hlediska náročnější a vyžaduje více pozornosti než litina s lupínkovým grafitem. To ještě více platí o přípravě velkého množství taveniny pro výrobu hmotných odlitků z litiny s kuličkovým grafitem. Požadavky jak na metalurgickou kvalitu, tak na mechanické vlastnosti se neustále zpřísňují, a proto se v dnešní době již v řadě sléváren využívají simulační programy pro kontrolu technologie výroby. Pro kontrolu metalurgické kvality kovu může dobře posloužit např. termická analýza.

Výroba litiny s kuličkovým grafitem

Jak je obecně známo, princip výroby LKG spočívá v přípravě výchozí taveniny o vhodném chemickém složení a její následné metalurgické úpravě, tj. provedení modifikace a očkování. Po natavení se jako první provede modifikace, tj. do taveniny se přidá modifikátor na bázi Mg, díky kterému dojde ke snížení obsahu S a O2, čímž se vytvoří předpoklad pro vznik grafitu v globulární podobě. Ve druhém kroku se provádí grafitizační očkování pomocí očkovadla na bázi křemíku. Očkování zajistí přítomnost dostatečného počtu aktivních grafitových zárodků a zároveň eliminuje výrazné podchlazení taveniny způsobené aplikací hořčíku. Použití jen samotného modifikátoru by totiž vedlo ke krystalizaci dle metastabilní soustavy a ve struktuře by se pak vyskytovaly ledeburit. Tavenina se tedy grafitizačně očkuje buď souběžně s modifikací, nebo až po ní. Účinek modifikátoru i grafitizačního očkovadla je krátkodobý, a proto musí dojít k odlití namodifikované a naočkované taveniny neprodleně po mimopecním zpracování, [8]. Jak již bylo zmíněno, vyloučení grafitu ve formě kuliček se docílí modifikací za pomoci hořčíku. K dosažení tohoto tvaru grafitu musí být obsah hořčíku v litině minimálně 0,025 %, obvykle se obsah Mg pohybuje mezi 0,03 - 0,06 %. Hořčík není jediný prvek, který lze k tomuto účelu použít, teoreticky lze aplikovat i jiné prvky, které disponují sferoidizačním účinkem, jako jsou například kovy vzácných zemin. Ale aplikace těchto prvků je technicky velmi náročná a jejich účinek není dostatečný. Z těchto důvodů je hořčík prakticky jediným technicky vhodným modifikačním prvkem, [9].

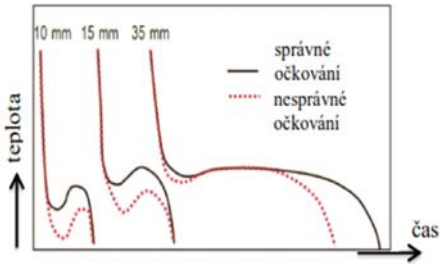
Na obr. 2 je uvedeno schéma výroby litiny s kuličkovým grafitem, kde jsou zobrazeny jednotlivé pracovní kroky, příslušné zkoušky, kontroly procesů a jakosti.



Obr. 2 Výroba odlitků z litiny s kuličkovým grafitem, [9]

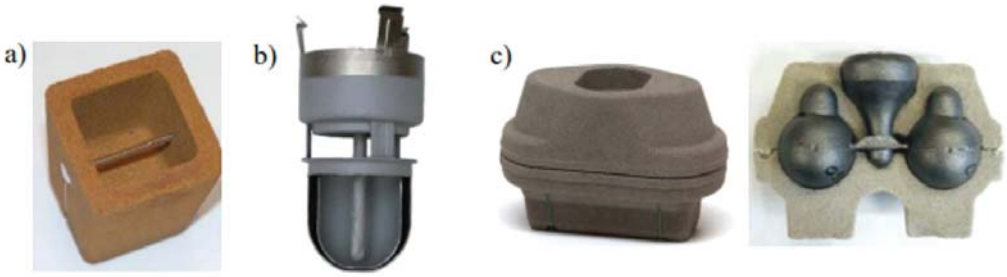
Kontrola taveniny termickou analýzou

Termická analýza (TA) zaznamenává a interpretuje změny teploty v čase při chladnutí nebo ohřívání materiálu. Ve své nejjednodušší podobě se používá ve slévárenství pro interpretaci křivky chladnutí kovu, který je analyzován při tuhnutí ve speciální formě. Fázové přeměny, ke kterým dochází v průběhu tuhnutí a chladnutí kovu, se projevují na křivce jako anomálie. Lze ji tedy použít i na hodnocení úrovně modifikace a očkování taveniny, [6]. Při měření podchlazení na křivce chladnutí u její eutektické části je pak možné odhadnout, zda je tavenina správně naočkována pro výrobu konkrétního odlitku, [6]. Ve své nejjednodušší podobě lze při TA použít pouze jeden termočlánek, který je vložený ve zkušební formičce. Samotná konstrukce testovacího kelímku má ale značný vliv na výsledky a jejich prezentaci. Tvar křivky chladnutí je určen rovnováhou mezi latentním teplem uvolněném během tuhnutí a ztrátami tepla mezi zkušebním kelímkem a okolní atmosférou. Je důležité, aby konstrukce kelímku zaručovala konzistentní podmínky při měření vzorků, především kvůli reprodukovatelnosti měření. Tvar křivky chladnutí pak může být ovlivněn zejména licí teplotou, množstvím kovu v testovacím kelímku a stupněm oxidace kovu v kelímku. Důležitá je i velikost testovacího kelímku, neboť v menších kelímcích zchladne vzorek rychleji, což ovlivní tuhnutí kovu a velikost podchlazení. Ukázka křivek získaných termickou analýzou naočkovaných vzorků je na obr. 3.



Obr. 3 Schématické ovlivnění tvaru křivky chladnutí pomocí velikosti testovacího kelímku a očkování taveniny [10]

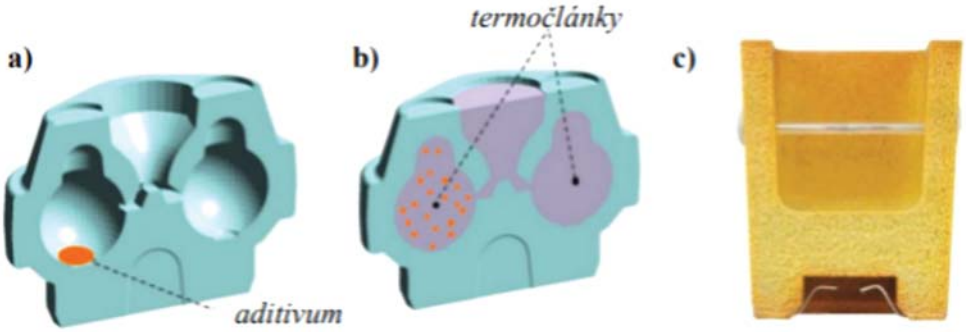
Z křivek na obr. 3 je zřejmé, že se zmenšující se velikostí zkušebního kelímku se zvyšuje podchlazení. V současnosti se používají při TA dva druhy zkušebních kelímků – pískové a kovové. Výhodou pískových je nesporně jejich pořizovací cena, ovšem kovový kelímek umožňuje přesnější umístění termočlánku a stupeň naplnění kalíšku je snadno reprodukovatelný. Touto schopností pak disponuje i speciální, uzavřený dvoukomorový pískový kelímek AccuVo, u kterého je stupeň naplnění vždy zaručen. Jednotlivé zkušební kelímky jsou zachyceny na obr. 4, [10].



a) klasický pískový kelímek (Open Cup) s termočlánkem [11],
b) ocelový kelímek s dvěma termočlánky v ochranné trubičce [10],
c) dvoukomorový kelímek AccuVo [12] a [13]

Obr. 4 Pohled na zkušební kelímky pro termickou analýzu taveniny litiny

V rámci mého výzkumu byly používány pro hodnocení úrovně očkování a modifikace pískové kelímky, a to klasický otevřený kelímek (Open Cup) a uzavřený dvoukomorový kelímek AccuVo, který obsahuje termočlánek v každé komůrce. Tento kelímek navíc umožňuje přidávat do každé komůrky různé přísady jako např. očkovadlo, díky čemuž lze rovnou vyhodnotit chování taveniny při použití určitého druhu očkovadla. Tím, že je tento kelímek uzavřený, je zajištěno, že objem vzorku bude vždy konstantní, čímž jsou eliminovány nesrovnalosti, které by mohly vznikat ve výsledcích při opakovaném měření v důsledku změn hmotnosti vzorku. Podrobnější pohled na vnitřní stavbu kelímku AccuVo a Open Cup je zobrazen na obr. 5, [13].

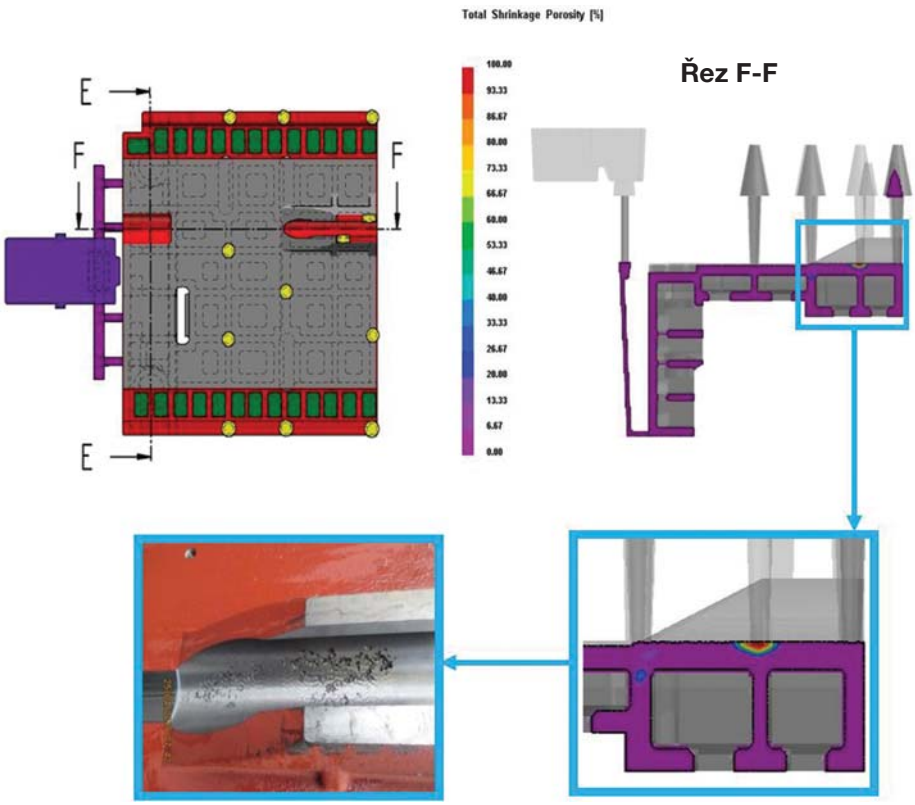


Obr. 5 Pískové kelímky pro termální analýzu

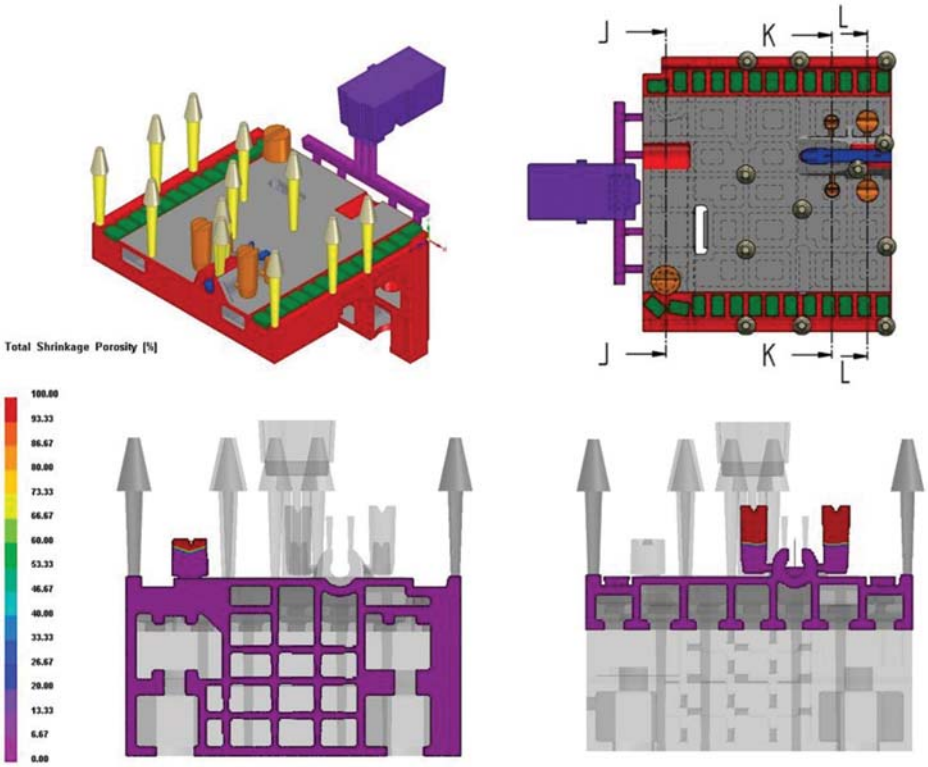
a) svislý řez středem kelímku AccuVo, kde jedna komůrka je prázdná a druhá obsahuje aditivum [13],
b) svislý řez kelímkem AccuVo po naplnění, kdy po odlití taveniny s aditivem smíchá s taveninou bez toho, aby došlo k úniku aditiva ven z komory [13]
c) svislý řez středem kelímku Open Cup s termočlánkem [13]

Optimalizace technologie výroby odlitku vřeteníku WHR 13 (Q),

Tato část mého výzkumu řešila optimalizaci stávající technologie výroby vřeteníku WHR 13 (Q), pomocí které se tento odlitek vyráběl téměř jeden rok. Během této doby se na žádném z odlitých kusů nevyskytovaly vady. Avšak po cca 20. vyrobeném odlitku se na dalších odlitých kusech začaly ve velké míře vyskytovat neopravitelné vady typu staženin a ředin. Proto byla řešena stávající technologie výroby těchto odlitků. K optimalizaci technologie byl použit simulační program pro plnění a tuhnutí odlitků QuikCAST. Výsledky kontrolní simulace původní technologie, které potvrdily výskyt výše zmíněných vad, jsou uvedeny na obr.6. Optimalizace pomocí programu QuikCAST a ukázka finální technologie je zobrazena na obr. 7.



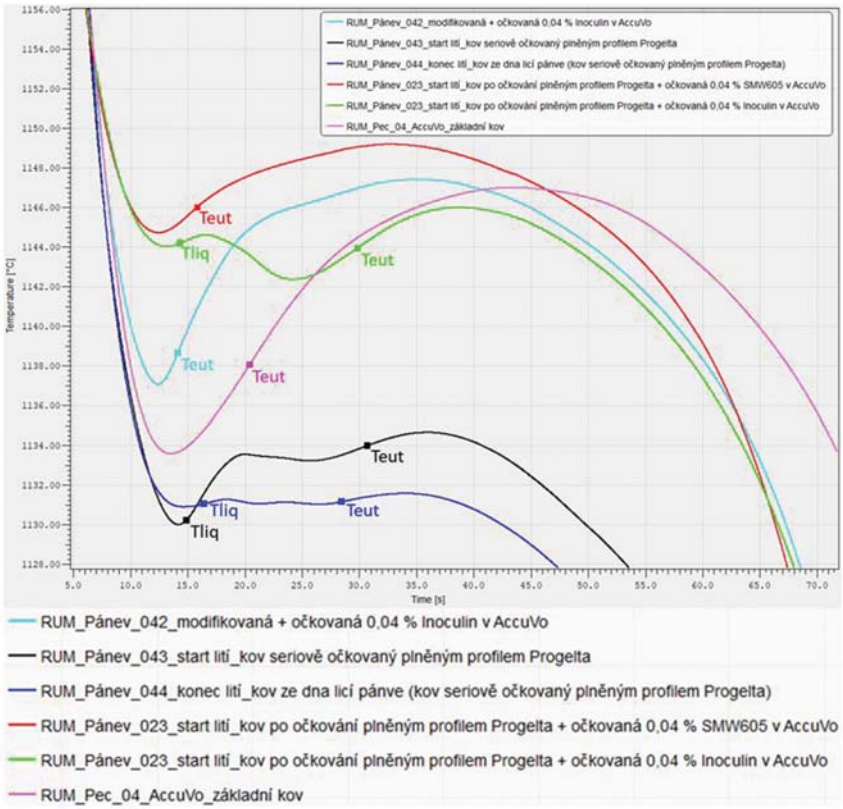
Obr. 6 Výsledek simulace původní technologie – zobrazení porezity



Obr. 7 Optimalizace původní technologie *(kombinace vnitřního chladítka a exo-nálitků)* - zobrazení porezity

Úprava technologie by však neměla být konečné řešení, protože jen zabraňuje vzniku výše zmíněných vad, ale nepředchází příčině jejich vzniku. Téměř celý rok výroby vřeteníku byla dostačující původní technologie, ke které by se slévárna chtěla vrátit, neboť byla ekonomicky výhodnější. Proto jsem se dále zabýval jakostí materiálu EN-GJS-600, ze kterého je vřeteník vyráběn. Při optimalizaci a prověření metalurgické kvality bylo ve slévárně uskutečněno měření kvality tekutého kovu pomocí termické analýzy AccuVo a následné vyhodnocení v softwaru Apromace. Cílem tohoto měření bylo zjistit metalurgickou

kvalitu taveniny v průběhu výroby litiny s kuličkovým grafitem. Výstup z měření je uveden na obr.8.



Obr. 8 Příklady eutektických tuhnutí naměřených v Metalurgii Rumburk termickou analýzou AccuVo z jedné tavby rotační tavící pece

Křivky chladnutí z obr.8 interpretují stav taveniny ze dvou pánví v různé fázi výroby LKG z jedné tavby rotační bubnové pece. Přesto, že jde o jednu tavbu, je patrné, že každý z těchto 6 vzorků se bude chovat jinak z hlediska tvorby staženin a ředin. Všech 6 křivek tuhnutí představuje jednoznačně eutektické tuhnutí se začátkem teploty tuhnutí hluboko pod eutektickou teplotou rovnovážného diagramu Fe-C. 3 křivky představují jednostupňové tuhnutí (růžová, tyrkysová a červená) a další 3 křivky dvojstupňové tuhnutí (černá, modrá a zelená). Křivky jsou navíc velmi různorodé, zobrazují minimální či rozsáhlou rekalescenci, pozvolný nebo prudký náběh teploty po dosažení TliqLOW resp. TeutLOW.

Materiálové vady (staženiny, řediny) lze řešit nálitkováním a vtokovým systémem ve spojení s licí teplotou, ale výroba se tak prodražuje a riziko kvalitativních vad přetrvává. Samotné eutektické chemické složení nezaručí eutektické tuhnutí kovu bez toho, aniž by v některých případech kov tuhl vícestupňově eutekticky či směřoval do podeutektického a nadeutektického tuhnutí. Proto je výhodné držet se lehce podeutektického chemického složení pro zajištění lehce podeutektického tuhnutí (Tliq od 1155 °C do 1162 °C), které má nízký sklon k tvorbě vnitřních vad (staženiny, řediny). Navíc lze podeutekticky nastavené litiny lépe metalurgicky řídit (nauhličení, ředění) s predikovatelným průběhem tuhnutí (nevzniká tak pestrá variabilita charakterů tuhnutí jako při eutektickém složení). Tím se naskýtá nejlepší kombinace vlastností, jako je homogenita materiálu a mechanické vlastnosti. Slévárna by se pak měla zcela vyhnout nadeutektickému tuhnutí, které má sklon k tvorbě slévárenských vad a to především u tlustostěnných odlitků.

Závěr

Obsah tohoto příspěvku potvrzuje, že tuhnutí a krystalizace litiny s kuličkovým grafitem je velmi složitá a je ovlivněna celou řadou faktorů. Současně je také zřejmé, že samotné eutektické chemické složení taveniny litiny nezaručuje její eutektické tuhnutí. Termická analýza ukázala, že tavenina litiny může tuhnout eutekticky vícestupňově nebo dokonce v některých případech může tavenina směřovat k podmínkám podeutektického nebo nadeutektického tuhnutí. To má velký vliv na tvorbu vnitřních vad odlitků z litiny s kuličkovým grafitem, jako jsou staženiny a řediny. Kontrola kvality vyráběných odlitků by měla vedle vzhledové kvality a rozměrové přesnosti také zahrnovat termickou analýzu taveniny, dále metalografickou analýzu materiálu odlitků i hodnocení jejich mechanických vlastností.

Literatura:

[1] MORROUGH, J. WILLIAMS, W. Iron and Steel Institute (1947), s. 324-334.

[2] GORSHKOV, A. A. Litejnoje proizvodstvo (1955), č. 3, s. 17.

[3] IVANOV, D. P. Litejnoje proizvodstvo (1954), č. 3, s. 18.

[4] Patent No. 4173 - P. Rossigneux, 1892, United Kingdom.

[5] SÝKORA, P. MORES, A. OTÁHAL, V. a J. HUČKA. 60. výročí od zahájení výroby litiny s kuličkovým grafitem na území České republiky a současný stav. Slévárenství. roč. LVII, 2009, č. 7-8, s. 298-303. ISSN 0037-6825.

[6] MORES, A. Výroba odlitků z litiny s kuličkovým grafitem v České republice – stav v roce 2019, Slévárenství č. 3-4/2020, s. 67-75. ISSN 0037-6825.

[7] MORES, A. Výroba odlitků z litiny s kuličkovým grafitem v České republice, stav v roce 2012, Slévárenství č. 3-4/2013. ISSN 0037-6825.

[8] ROUČKA, J. Metalurgie litin, VUT Brno 1998. ISBN 80-214-1263-1.

[9] GEDEONOVÁ, Z., JELČ I. Metalurgia liatin – vydání HT TU Košice 2000. ISBN 80-7099-5165.

[10] STEFANESCU, D. M. Thermal Analysis—Theory and Applications in Metalcasting. Inter Metalcast 9, 7–22 (2015). ISSN 1939-5981.

[11] Forma 2. Detycon Solutions s.r.o. [online]. Copyright © [cit. 31.03.2020]. Dostupné z: https://www.detycon.com/images/Portfolio/forma2.jpg

[12] Forma. Detycon Solutions s.r.o. [online]. Copyright © [cit. 31.03.2020]. Dostupné z: https://www.detycon.com/images/Portfolio/forma.jpg.

[13] ANJOS, V. Use of Thermal Analysis to Control the Solidification Morphology of Nodular Cast Irons and Reduce Feeding Needs. Disertační práce. Universität Duisburg-Essen, Abteilung Maschinenbau und Verfahrenstechnik. 2015. 197 s.