



Sborník přednášek z

8. HOLEČKOVY KONFERENCE

Metalurgie a technologie slitin neželezných kovů

20. – 21. března 2019

Hotel Skalský dvůr

ISBN 978-80-02-02857-4

Obsah:

Vajsová, V., HVH spol. s r.o.: <i>Specifika uměleckého odlévání</i>	5
Herzán, J., Armatmetal s.r.o.: <i>Návrh technologie výroby odlitků ze slitin mědi s ohledem na jejich kvalitu a pracnost dokončovacích operací</i>	9
Bryksí, B., ČVUT v Praze: <i>Odlitky ze slitin hořčíku a jejich dopad na životní prostředí</i>	21
Kubelková, I., Laempe+ Panáčková s.r.o.: <i>Řešení pro snadnou automatizaci cídění odlitků</i>	36
Hren, I., UJEP Ústí nad Labem: <i>Kvantitativní použití přípravku MIKRO-100 pro snížení porozity</i>	39
Ševčík, P., BAS Rudice spol. s r.o.: <i>Novinky ve spektrometrii</i>	47
Bryksí, V., Kovolís Hedvíkov, a.s.: <i>Analýza kvality slitin pro tlakové lití</i>	48
Neišl, V., OLYMPUS CZECH GROUP, s.r.o.: <i>Moderní metody analýzy obrazu v mikroskopii</i>	55
Henzl, D., ALMET, a.s.: <i>Porovnání kvality odlitků pístů od různých výrobců</i>	56
Kaňa, V., VUT v Brně: <i>Odezdnávání modifikačního účinku a dopad na mechanické vlastnosti slitiny AlSi10Mg</i>	64
Tlamicha, P., AIR PRODUCTS spol. s r.o.: <i>Inteligentní technologie spalování s kyslíkem a strategie sekundárního tavení neželezných kovů v komorové peci</i>	72
Lána, I., Slévárna a modelárna Nové Ransko, s.r.o.: <i>Měrná elektrická vodivost podeutektického siluminu v závislosti na ošetření taveniny</i>	83
Merta, V., VŠB-TU Ostrava: <i>Mikrostruktura odlitků kovových hub z hliníkové slitiny AlSi10MgMn</i>	98
Vrábel, P., BENEŠ a LÁT a.s.: <i>Vítězství gravitačního odlévání nad nízkotlakým –případová studie lití Al odlitku</i>	104
Procházka, P., KERAMTECH s.r.o.: <i>Nové poznatky v oblasti filtrace hliníkových slitin</i>	113
Krňávek, Š., TIESSE PRAHA s.r.o.: <i>Optimalizace procesu tlakového lití ložiskových štítů pomocí nové ošetrovací hlav</i>	122
Luňák, M., BENEŠ a LÁT a.s.: <i>Již 4. generace nízkotlakých licích strojů ve slévárně BENEŠ a LÁT a.s.</i>	129

Specifika uměleckého odlévání

Vajsová, V. ¹⁾

¹⁾ HVH spol. s r.o., Umělecká slévárna, Horní Kalná 65, Hostinné, hvh@hvh.cz

Klíčová slova

Umělecké odlévání; Umělecká slévárna; Sochy; Bronz; Metoda ztraceného vosku

Abstrakt

Článek se zabývá seznámením s historií a současností rodinné umělecké slévárny HVH spol. s r.o. Popisuje používané materiály a způsob výroby uměleckých odlitků.

ÚVOD

Slévárna HVH spol. s r.o. se zabývá uměleckým odléváním již více než 25 let. Rodinný podnik se sídlem v Horní Kalné v Podkrkonoší se specializuje výhradně na bronz, ale čas od času odlévá i jiné materiály. Bronz byl od nepaměti používán pro zhotovení soch a monumentů a je tomu tak dodnes. V podkrkonošské slévárně tak každý rok vzniknou stovky menších či větších odlitků, výjimkou nejsou ani rozměrné monumenty o výšce až 6 metrů. V takovém případě se odlévají menší části, které se pak postupně skládají a svažují do většího celku.

Naprostá většina odlitků vzniká tzv. „metodou ztraceného vosku“, někdy také nazývanou „metoda ztracené formy“, která zaručuje dokonalý přenos detailů z originálního díla na odlitek. Jedná se o tisíce let starou metodu, která má své zásady a svá pravidla. Základem je zhotovení odlévací formy, tomu však předchází několik neméně důležitých fází.

POSTUP VÝROBY MODELU A FORMY

Z originálního modelu, který je většinou vytvořen ze sochařské hlíny, sádry, plastelíny nebo jiných materiálů je nejprve třeba sejmout otisk pomocí tekutých silikonových směsí. Silikon postupně ztuhne a zpevní. Je naprosto nezbytné, aby byl tento nátěr prováděn ručně s maximální opatrností a citem, zejména v případě předloh zhotovených ze sochařské hlíny, které mají jemné detaily. Příliš velký tlak by mohl zdeformovat křehkou hliněnou předlohu. Silikon se následně fixuje sádrou, popř. modernějšími materiály jako je epoxidová pryskyřice. Vždy je třeba dobře uvážit, jakým způsobem bude forma dělena. Naprostá většina uměleckých artefaktů je mnohotvará, s různými detaily často v záporných úhlech. Je tedy nutné uvažovat tak, aby negativní forma při další manipulaci nedeformovala voskový model, a aby šla rozebrat. U menších objektů se forma často dělí na dvě ideální poloviny. V případě větších děl je pak dělena na jednotlivé sekce. V horní-kalenské slévárně již sestavovali monument i ze stovky dílů. Negativní forma může být, a často bývá, použita opakovaně, tudíž musí být zhotovena maximálně precizně a pevně, aby vydržela opakované použití. Často také bývá na určitou chvíli tím jediným médiem, který nese původní otisk originálu.

V porovnání s metodou výroby matric např. u přesného lití, které taktéž pracuje metodou ztraceného vosku, je v případě uměleckého odlévání stále zcela zásadní využití lidské pracovní síly. Lidskou ruku a její jemnost a cit nelze nahradit strojem. Stejně tak je tomu i

v dalších fázích procesu. V té následující je nutno zhotovit voskový model za použití již připravené negativní formy.

Rozehřátý vosk se do formy buď vylívá, natírá nebo mačká. Většinou je to kombinace všech těchto postupů. Velmi záleží na teplotě vosku a na propojení všech vrstev. Používá se včelí vosk s dalšími příměsemi, které mají zaručit tvárnost, ale i pevnost a stálost. Opět se nabízí srovnání s postupy přesného lití, které ke zhotovení voskových modelů běžně používá tlak a vstřikování. V případě uměleckého díla a složitějších detailů je opět nezbytně nutné, aby byl vosk nanášen do všech míst v pravidelné vrstvě, ovšem někdy je třeba sílu vosku upravit. Jinými slovy, opět je ideální a nejpřesnější, aby toto dělaly lidské ruce. Každý voskový model je třeba prohlédnout a vyretušovat k naprosté dokonalosti a shodě s originálem. Svoji podobu následně přenese do výsledného odlitku.

Na voskový model se dále aplikují tzv. nálitky a vtokové kanály. Jedná se o velmi důležitou strukturu kanálů vyrobených taktéž z vosku, které poslouží pro dokonalý tok roztaveného kovu a kompletní naplnění lící formy. I tato část výrobního procesu vyžaduje zkušenost a znalost věci. Pokud je struktura řídká, hrozí nedokonalé odlití způsobené zejména pomalým tokem roztaveného bronzu, který postupně chladne. Pokud je struktura příliš hustá, dochází k přehřívání a tím způsobeným lícím vadám. Je tedy velmi důležité vyrobít strukturu kanálů tak, aby v optimálním čase za ideální teploty proudil roztavený bronz do všech částí lící formy.

Voskový model s vtokovou strukturou se následně obalí formovací hmotou. Přesné složení této hmoty je často výrobním tajemstvím každé slévárny, po léta zkoušená a zdokonalovaná směs, která nejlépe vyhovuje. V Horní Kalné je to směs vody, sádry a jemné a hrubší antuky v přesně daném poměru. U modelů se složitými detaily je vhodný prvotní nátěr řidší směsí a další vrstvy jsou již pevnější a kompaktní.

Vzniklou „syrovou“ lící formu je následně třeba vysušit v peci a docílit efektu „ztraceného vosku“. Uvnitř lící formy je uzavřen voskový model, jehož tvar je do materiálu dokonale okopírován. Vosk se používá zcela záměrně – lze ho vytavit. Lící formy se vysouší v peci po dobu cca 6 dnů na teplotu do 640°C. Při teplotě nad 550°C vosk vyhoří a zbytky vosku částečně vsáknou do formy. Teplota je samozřejmě velmi důležitá a po celou dobu vysoušení je třeba pečlivě sledovat její postupné zvyšování a následné chladnutí.

ODLÉVÁNÍ A NÁSLEDNÉ OPERACE

Nyní přichází na řadu samotné lití roztaveného bronzu. Potřebné množství je roztaveno v tavící peci. Nejčastěji používaná slitina bronzu pro umělecké odlévání je dvousložkový cínový bronz (CuSn8) s obsahem cínu kolem 9%. Ve slitině je také nepatrné množství dalších prvků, jako je olovo, zinek, hliník, nikl či mangan. Dříve se běžně používal bronz s vyšším obsahem olova. V současné době od něj slévárna HVH již ustoupila z důvodu negativního dopadu na životní prostředí, ale i zdraví osob, které s odlitkem přijdou do styku. Ideální odlévací teplota cínového bronzu je 1100° - 1140°. Jak již bylo uvedeno, je důležité, aby v optimálním čase za ideální teploty proudil roztavený bronz do všech částí lící formy.

Po odlití a po úplném vychladnutí je lící forma rozbita, vytlučena a hrubý odlitek je nutno dále opracovat. Primárně je třeba odstranit vtokové kanály, které jsou nyní taktéž odlité z bronzu. Celý proces by měl být po celou dobu natolik precizní, aby se v závěru eliminovala

nutnost složitého opracování odlitku a úprav jeho povrchu. Přesto je třeba použít frézky všech velikostí, dlátka, pilníky a jiné nářadí a odlitek ručně opracovat a dokončit. V případě odlévání větších objektů po částech je třeba jednotlivé díly svařit a veškeré sváry vycizelovat do naprosté dokonalosti.

Závěrečnou fází je aplikace umělé patiny na hotový opracovaný odlitek a nanesení konzervačního vosku. Toto téma by mohlo být samostatnou kapitolou. Přírodní patinu by bronzová socha získala až za nějaký čas působením vlivu ovzduší a vody. Běžně se tedy používá tzv. umělá patina, která vzniká působením různých kyselin a oxidantů. Lze tak docílit celé řady odstínů od černé a hnědé, přes šedou, zelenou, namodralou až po červenou. Patina zvýrazňuje plastičnost předmětu. Konzervační vosk povrch zafixuje a naleští.



Obr. 1: J. V. Pekárek – František Josef I

ZÁVĚREM

Podkrkonošská slévárna HVH je rodinná firma s 15 zaměstnanci, kteří jsou špičkovými odborníky ve svém oboru. Dnes už je možná zajímavostí fakt, že ani jeden ze tří zakladatelů a spoluvlastníků nebyl slévač. Slévárna byla postavena tzv. „na zelené louce“ přestavbou rozpadlé venkovské usedlosti a jen díky neuvěřitelnému úsilí a těžké práci zde byly realizovány prestižní a unikátní zakázky. Slévárna dnes patří ke špičce ve svém oboru jak v České republice, tak v Evropě.

Kromě sochařů, výtvarníků a osob zabývajících se uměním a designem, slévárna spolupracuje s desítkami měst a obcí, státními i privátními institucemi a spolky a významně se tak podílí na zlepšení soukromého i veřejného prostoru. Od konce 90. let se rozvinula spolupráce se zahraniční klientelou, která v současné době v podstatě převažuje nad tuzemskou. Výsledkem této spolupráce jsou realizované projekty, o kterých se zakladatelům slévárny snad ani nesnilo. Bronzové sochy z Podkrkonoší se dnes nachází téměř po celém světě ... navíc na takových místech jako je Buckinghamský palác v Londýně, budova Kapitolu ve Washingtonu v USA, v budovách Evropského parlamentu a Rady Evropy, ve starých aristokratických sídlech a dalších zajímavých a prestižních místech. Největším specifickým činnosti umělecké slévárny je bezpochyby spolupráce s velkými lidskými individualitami, kteří vidí svět a život trochu jinou optikou. Umělec je bohém. A slévárna s ním musí najít společný jazyk a pohled na věc. Umělec si vybírá slévárnu, které musí stoprocentně důvěřovat. Slévárna pracuje s jeho dílem, s jeho „dítětem“, kterému věnoval spoustu času. Bronzová podoba musí být totožná s původní předlohou a musí tam vždy zůstat původní rukopis. Slévárně HVH se daří zachovávat staré slévačské řemeslo a odvádět poctivou práci v perfektní kvalitě. Ochotně nese odpovědnost za kvalitu věcí, které zde na zemi v dobrém případě setrvávají desítky, stovky let a možná i déle.

Volba technologie výroby odlitků ze slitin mědi s ohledem na jejich kvalitu a pracnost dokončovacích operací

Herzán, J.¹⁾

¹⁾ Armatmetal spol. s r.o., Řepčinská 86, 779 00, Olomouc, armatmetal@armatmetal.cz

Klíčová slova

Kokilový stroj; Slitiny mědi; Sklopné lití; Gravitační lití; Simulace

Abstrakt

Celý článek má za cíl popsat rozvíjející se trend zjednodušování výroby ve firmě Armatmetal s.r.o., vzhledem k nedostatku kvalitních pracovníků v oblasti neatraktivních pozic na trhu práce. Příspěvek popisuje zaměření a stručnou historii firmy Armatmetal s.r.o., navazující na vývoj nové technologie ve firmě. V textu jsou naznačeny důvody vedoucí k úvaze o převodu některých odlévaných položek k lití do kovových forem. Text obsahuje popis kokilového sklopného stroje IMR C55H, jeho možnosti, výhody a omezení. Na závěr textu jsou popsány jednotlivé kroky řešení problémového odlitku určeného k lití do kovové formy.

HISTORIE A ZAMĚŘENÍ FIRMY ARMATMETAL spol. s r.o. [1]

Firma Armatmetal spol. s r.o. byla založena v roce 1992 a její hlavní činností bylo zpracování a prodej slévárenských surovin. Postupně docházelo k rozšíření podnikatelských aktivit firmy i ve výrobních oborech a původní činnost firmy byla postupně zrušena.

Výroba hliníkových radiátorů

V roce 1994, na základě vlastního vývoje, byla zahájena výroba hliníkových radiátorů. Jednotlivé komponenty byly, podle vlastní dokumentace, vyráběny u externích výrobců (odlitky, profily). V roce 1996 byla po rozsáhlých investicích zahájena výroba odlitků pro výrobu radiátorů a výrazně tak byl redukován objem externích dodávek. Od roku 1996 bylo vyvinuto několik typů radiátorů a v roce 2000 firma začala podnikat v oboru vodoinstalatérství, topenářství, montáži a oprav vyhrazených plynových zařízení.

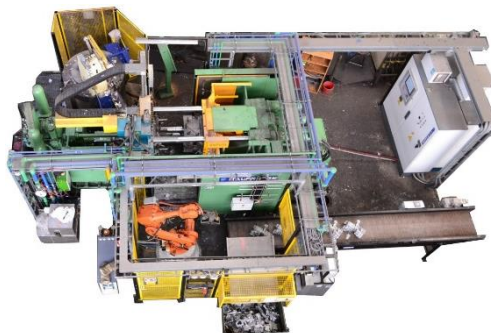


Obr. 1: Ukázka hliníkových radiátorů [1]

Tlakové lití

V roce 2006 byla v rámci vytížení kapacit na tlakových licích strojích zahájena výroba odlitků ze slitin hliníku pro externí zákazníky. V současné době firma disponuje čtyřmi tlakovými licími stroji. V roce 2018 byl jeden ze strojů nahrazen strojem novým, včetně robotizovaného pracoviště.

Součástí robotizovaného pracoviště je tlakový licí stroj IP400 SC, robot ABB, mikropostřik Wollin, temperovací zařízení, pec RKL 600T a pásový dopravník.



Obr. 2: Robotizované pracoviště

Výroba odlitků ze slitin Al a Cu do pískových forem

V roce 2007 byly vybudované kapacity pro výrobu odlitků ze slitin Al a Cu do pískových forem a postupně byla zahájena výroba.

V současnosti firma odlévá několik položek odlitků ze slitin Cu pro trakční vedení, dále odlitky ventilátorů ze slitin Cu i Al, odlitky chladičů apod. Jedná se o prototypovou až středně sériovou výrobu.



Obr. 3: Ukázka odlitků na pracovišti gravitačního lití

Na Obr.3 vpravo je zobrazena ukázka prototypové výroby odlitku ventilátoru ze slitiny hliníku o $\varnothing$ 520 mm litého do vytištěné formy. Firma má významné zkušenosti s metodou „SandPrinting“. Bylo zde odlito již několik stovek odlitků (různých rozměrů) do zmíněného typu formy.

VOLBA TECHNOLOGIE S OHLEDEM NA PRACNOST DOKONČOVACÍCH OPERACÍ [2], [3]

S ohledem na vývoj na trhu práce, kdy sílí problémy při hledání vhodné pracovní síly, zejména na pozicích řemeslníků a opravářů, pomocných a nekvalifikovaných pracovníků a technických a odborných pracovníků, je firma nucena uvažovat o zjednodušování a částečné robotizování výroby, za účelem snížení pracnosti v jejím závěru. Zásadním krokem firmy, bylo rozhodnutí převést některé položky odlévané do pískové formovací směsi na lití do kovových forem a následné zakoupení vhodného kokilového stroje.

Kokilový stroj IMR C55H

Jako vhodný stroj pro lití odlitků ve firmě Armatmetal s.r.o. byl vybrán sklopný kokilový stroj C55H od italské společnosti IMR E&R S.r.l. Kokilový stroj je přímo určený pro lití odlitků

z neželezných kovů, zejména slitin Cu. Maximální hmotnost kokily určené pro tento typ stroje je 150 kg a její maximální velikost je Ø 500 mm (Obr.7).

Velkou výhodou je snadná obsluha a nastavitelnost jednotlivých úkonů stroje, včetně možnosti poloautomatického ochlazování a mazání kovové formy v průběhu lití. Pohyb stroje je řízen hydraulicky. Základem stroje je polohovací lavice, na které jsou umístěna dvě pohyblivá ramena s upínacími deskami. Uzavírání formy je řízeno pouze levou stranou ramene. To znamená, že levá část formy je pohyblivá a pravá část formy je pevná. Na pravé části ramene se nachází vyrážecí. Pod strojem je umístěna nádrž o objemu 860 litrů. Prostor nádrže slouží k naplnění směsí grafitu a vody za účelem poloautomatického mazání a ochlazování formy. V nádrži se nachází ohřívací zařízení a míchadlo. Celé zařízení je umístěno v bezpečnostní kleci s optickými čidly.

Tab. 1: Základní parametry stroje IMR C55H [2]

Max. hmotnost formy	150 kg
Max. velikost formy	Ø 500 mm
Boční náklon stroje	0-90°
Přední rotace formy	0-90°
Rozevření ramen	0-90°
Max. rozevření formy	500 mm
Max. sevření formy	270 mm
Objem nádrže	2x430 l
Hmotnost stroje	2 000 kg
Rozměry stroje	1660x2368x1916 mm



Obr. 4: Sklopný stroj IMR C55H [2]

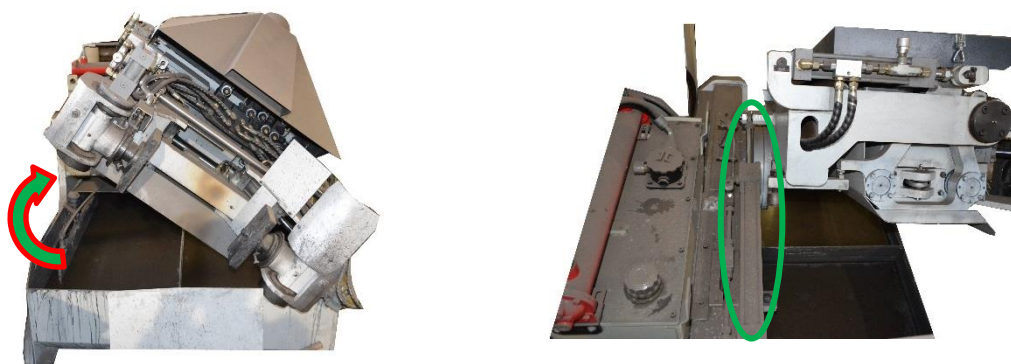
Kokilový stroj C55H je schopen několika pohybů. Hlavní pohyby slouží zejména k založení jader, k zachlazení a mazání kovové formy a k rotaci formy v průběhu lití. Pohyby jsou řízeny jednotlivými hydraulickými písty na zařízení. Stroj nabízí tři způsoby (cykly) lití viz Tab.2. Každý krok je spouštěn sešlápnutím pedálu nebo stisknutím spouštěcího tlačítka na ovládacím panelu.

Tab. 2: Možnosti lití na kokilovém stroji IMR C55H

I. PŘÍMÉ SKLOPNÉ LITÍ		II. BOČNÍ LITÍ		III. KOMBINOVANÉ LITÍ	
1. KROK	Máčení formy (zapnuto)	1. KROK	Máčení formy (zapnuto)	1. KROK	Máčení formy (zapnuto)
2. KROK	Boční náklon stroje a vložení jádra	2. KROK	Boční náklon stroje a vložení jádra	2. KROK	Boční náklon stroje a vložení jádra
3. KROK	Sevření formy a vrácení stroje do základní polohy	3. KROK	Sevření formy + boční lití	3. KROK	Kombinované lití – přímé sklopné lití + boční lití
4. KROK	Přímé sklopné lití				

- **Boční náklon lavice**

Hlavním účelem tohoto pohybu je možnost založení jádra. Po sešlápnutí spouštěcího pedálu nebo po stisknutí startovacího tlačítka je levá strana lavice stroje zvedána pístem ze základní polohy až do předem nastaveného maximálního náklonu (0-90°). Po dosažení definovaného náklonu stroje je stroj zastaven a pracovníkovi je umožněno vložit jádro do formy. Po vložení jádra pracovník opět sešlápne spouštěcí pedál a následně dojde k uzavření formy a vrácení lavice do základní polohy.



Obr. 5: Boční náklon kokilového stroje IMR C55H

- **Sklápění lavice**

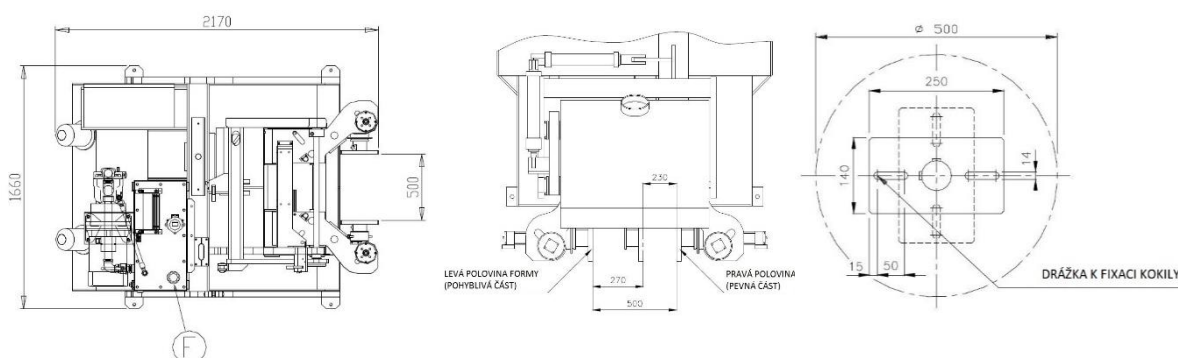
Sklápění lavice je využito tehdy, jeli povolena možnost chlazení a mazání formy („máčení formy“). Při přepnutí tlačítka „máčení formy“ do polohy zapnuto, dojde před každým cyklem lití ke sklopení lavice stroje a následně ramen stroje. Tím je ponořena forma do grafitové lázně.



Obr. 6: Sklápění lavice kokilového stroje IMR C55H [2]

- **Pohyby ramen a zápěstí stroje**

Sevření formy, přímá rotace formy a rozevírání formy je umožněno hydraulickými písty ramen a zápěstí stroje. Sevření formy je řízeno pouze levým ramenem. Maximální sevření formy je 270 mm a maximální rozpětí ramen je 500 mm.



Obr. 7: Maximální rozměry při pohybu ramen a zápěstí stroje IMR C55H [2]

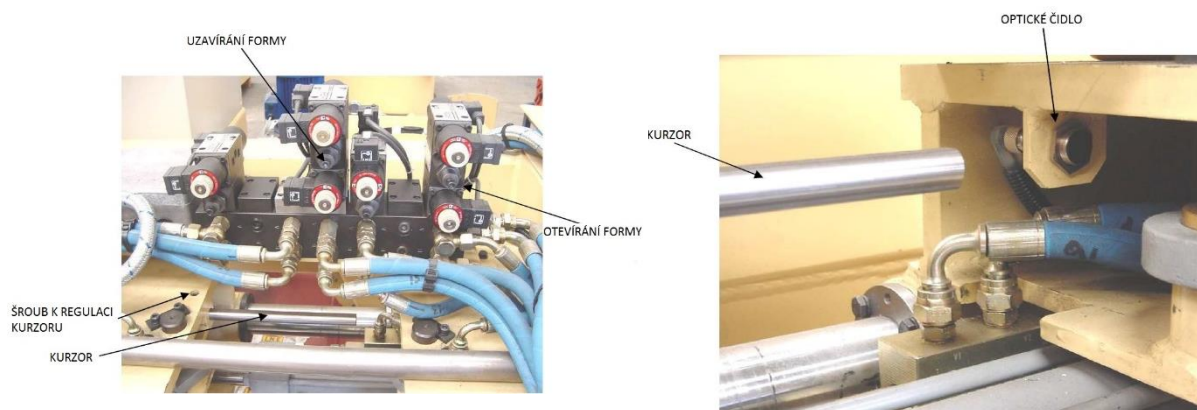
Rotace formy, která je využívána při sklopném lití nebo k pohybu formy v grafitové lázni, je řízena zápěstím stroje. Na zápěstí stroje jsou fixovány upínací desky. Kovová forma je na upínací desku připevněna pomocí vhodných šroubů.

- **Nastavení jednotlivých parametrů**

Pohyby lavice, rotace formy, jednotlivá zpoždění při cyklu lití a další parametry lze jednotlivě na stroji nastavovat pomocí příslušných ventilů nebo v rámci softwaru uloženého v rozvaděči stroje.

Důležitým parametrem při každé výměně formy je uzavírací brzda. Jedná se o řízené zpomalení uzavírací rychlosti. Uzavírací rychlost lze rozdělit na dvě fáze. Každá fáze má jinak definované rychlosti pístu. V druhé fázi se jedná o zpomalení fáze první. Na Obr.7 jsou zobrazeny ventily, kterými lze zpomalovat nebo naopak zrychlovat uzavírací rychlost pístu. Ke zmíněnému brždění a zpomalení na definovanou rychlost (změna rychlosti první fáze na

rychlost druhé fáze), dochází ve chvíli, kdy se tyčový kurzor dostane před optické čidlo. Délka kurzoru je nastavitelná. Zpomalením poslední fáze je předcházeno poškození jader a forem.



Obr. 8 Detail prvků pro řízení rychlostí uzavírání formy (Operative manual - C55H, 2018)

Regulováním ventilů jsou řízeny i další rychlosti pohybů stroje (boční náklon, sklápění stroje při bočním lití, pohyby ramen apod.), nicméně parametry, jako jsou zpoždění jednotlivých kroků v cyklu, vypínání/zapínání pohybů nebo úhly natočení forem při jednotlivých krocích v cyklu, jsou nastavovány v softwaru stroje.

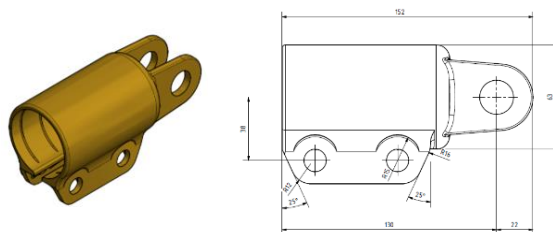
Pomocí softwaru lze nastavit 14 parametrů.

Tab. 3: Nastavitelné parametry pomocí softwaru zařízení IMR C55H [2]

1	Zapnutí/vypnutí rotace formy při „máčení“	8	Zpoždění rotace formy při přímém lití
2	Zapnutí/vypnutí: Bočního náklonu lavice	9	Zpoždění sklápění lavice do základní polohy (boční lití)
3	Zapnutí/vypnutí: Boční lití, Kombinované lití	10	Zpoždění rotace formy při kombinovaném lití
4	Úhel formy při máčení	11	Zpoždění rozevření formy (čas tuhnutí)
5	Čas „máčení“ levé poloviny formy	12	Zpoždění vyhazovače
6	Čas „máčení“ pravé poloviny formy	13	Doba vyhazovače v aktivní poloze
7	Zpoždění rotace formy při namáčení	14	Počet kavit v jednom cyklu

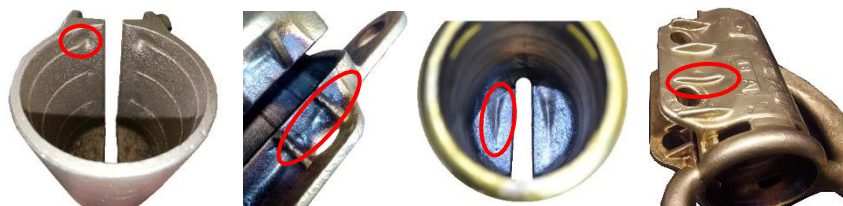
Odlitek „Kloub 55“

Jedním z odlitků k lití do kokily byl zákazníkem zadán výrobek „Kloub 55“ (dále K55). Jako materiál je požadována hliníková bronz CuAl10Fe5Ni5.



Obr. 9 Odlitek „Kloub 55“

Kovová forma a veškerá technologie pro výrobu odlitku „K55“ byla vytvořena specializovanou společností pro výrobu kokilových forem v Itálii. Jako materiál formy byla doporučena beryliová bronz. Formy zhotovené z tohoto materiálu se vyznačují vyšší životností. Na druhé straně jsou méně přístupné květším zásahům do kokil a jejich rozsáhlejším opravám. Po prvních zkouškách nového výrobku se vyskytovaly, vzhledem ke konstrukci odlitku, následující vady: **Staženiny uvnitř odlitku v oblasti pod žebry, Staženiny v oblasti dna odlitku, Staženiny v oblasti napojení žeber, Nedoběhnutí vnějších žeber na odlitku.** Po několika jednáních mezi slévárnou a italským výrobcem kokil, bylo rozhodnuto o zhotovení stejných zkoušek přímo v Itálii ve společnosti se zkušenostmi s litím do kovových forem na sklopném kokilovém stroji.



Obr. 10 Vyskytující se vady na odlitku „Kloub 55“

V této firmě bylo odlito celkem padesát testovacích kusů z mosazi MS60. Tento materiál byl pro zkoušku vybrán pro jeho příznivější slévárenské vlastnosti. Vzhledem k tomu, že se vady vyskytly i na těchto kusech, byla slévárna nucena k úpravě nebo změně technologie. Konstrukteřem a technologem slévárny bylo navrženo několik verzí technologie lití, které byly následně simulovány.

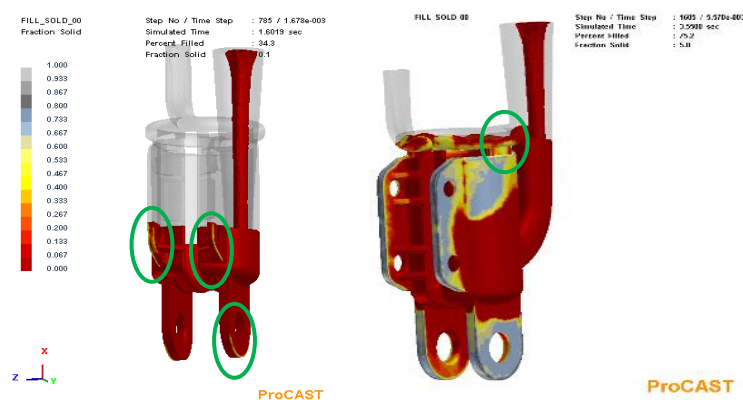
- **Simulace T1**

V rámci výuky na VUT v Brně byla ověřena technologie T1 simulací, pomocí softwaru ProCast. Bylo ověřováno teplotní pole při plnění dutiny formy, rychlostní pole při plnění dutiny formy a tuhnutí odlitku se zaměřením na zjištěná kritická místa.

Simulace T1 byla provedena pouze pro gravitační lití. Při zadávání simulace nebyl definován sklopný parametr. Nicméně ze simulace bylo i tak vyčteno několik užitečných informací, které byly využity k dalšímu řešení odlitku.

Z průběhu plnění vyplývá, že v místech, kde se tavenina dotýká formy, se téměř okamžitě tvoří kašovitá až tuhá fáze odlitku. Jedná se zejména o oblasti ramen odlitku a úchytů pro čep. Dále lze ze simulace vysledovat, že kov, který v závěru plnění doputuje do dosazovacího

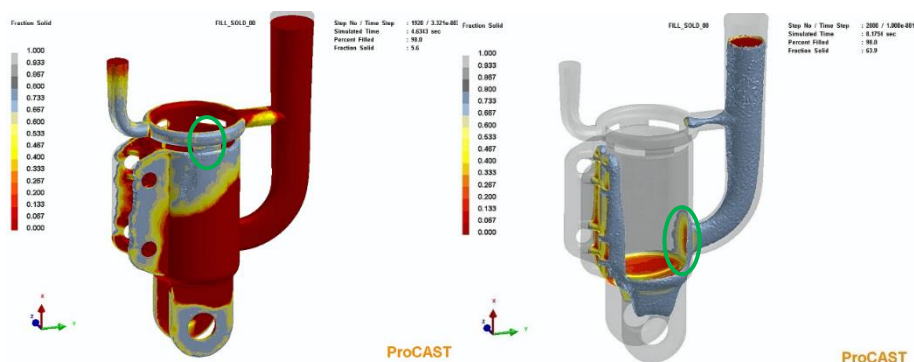
kroužku na odlitku, obsahuje velké množství tuhé fáze, zejména v oblasti zářezů mezi odlitkem a dosazovacím kroužkem.



*Obr. 11 Místa počátečního tuhnutí taveniny vlevo
a tuhá fáze v oblasti dosazovacího kroužku vpravo*

Zatímco ve zmíněných částech odlitku dochází s přibývajícím časem ke ztuhnutí taveniny, je vtokovou soustavou neustále dosazován nový kov, který intenzivně ohřívá stále se zužující oblasti tekuté fáze. Taveninou je intenzivně prohříváné také pískové jádro, které po přehřátí udržuje vzniklé teplo mezi jádrem a odlitkem.

Simulací je předpovězeno, že v čase 4,63 vteřiny od počátku lití začíná docházet k oddělování tekutého kovu od odlitku v oblasti napojení dosazovacího kroužku s odlitkem (Obr.12 vlevo).

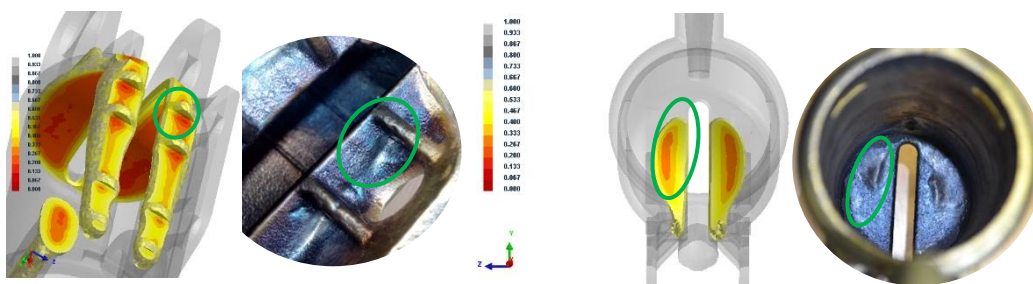


Obr. 12 Zobrazení CutOff – oddělení tekuté fáze od odlitku

Dále, v čase 8,2 vteřiny od počátku lití, začíná docházet k oddělování tekutého kovu mezi odlitkem a vtokovou soustavou (Obr. 12 vpravo).

Z toho plyne, že příliš rychle zatuhlé „dosazovací“ oblasti uzavrou stále ještě tekuté části odlitku a brání tak v dosazování výše uvedených kritických míst. Což vede ke vzniku staženin, propadení povrchu odlitku apod.

Tato simulační zkouška, byť nebylo možné zadat přesné vstupní hodnoty, ukázala předpokládané chování kovu při lití a tuhnutí v dutině formy. Výsledek simulace zobrazuje místa vyskytující se vady na dně odlitku, v oblasti žeber a na vnitřní straně odlitku pod žebry. Vady předpokládané simulací se shodují s reálným odlitkem K55.



Obr. 13 Porovnání výsledků simulace s reálnými výsledky na odlitku

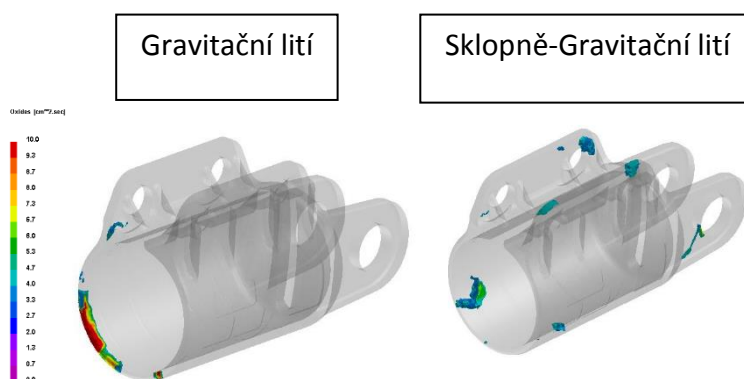
- **Simulace T2 [3]**

Simulace T2 byla zadána společnosti Mecas esi s.r.o. Cílem práce bylo analyzovat technologie gravitačního a sklopného lití, zhodnotit vzniklé vady, porovnat výsledky gravitačního a sklopně-gravitačního lití a zanalyzovat výskyt vad při změně technologie lití.

Obsahem souboru je simulace cyklování teplotního pole kokily pro 10 odlitků a simulace plnění a tuhnutí gravitačního a sklopně-gravitačního lití.

Simulace T2 potvrdila, že **způsob gravitačního nebo sklopně-gravitačního lití** nemá výrazný vliv na tuhnutí odlitku, nýbrž má velký vliv na výskyt oxidů a vad s oxidy spojených. Sklopně-gravitační lití zajišťuje plynulejší plnění a usměrněný odvod plynů z dutiny formy.

Vzniklé oxidy jsou díky plynulejšímu plnění u sklopně-gravitačního lití lépe rozmístěny a nedochází k jejich shlukování na hraně odlitku.

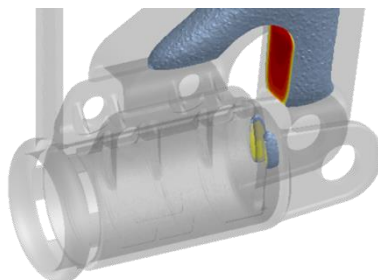


Obr. 14 Možný výskyt oxidů v odlitku [3]

Na totožných místech jako u T1 byla detekována výrazná porozita, která v tepelných uzlech vystupuje na povrch odlitku a tvoří otevřené staženiny. Materiál CuAl10Fe5Ni5 je vzhledem k úzkému dvoufázovému pásmu náchylný na tvorbu soustředěných staženin.

Dochází tedy k rychlému zatuhnutí vtoků do odlitku a vzniku porozity v uzavřených objemech tekutého kovu a v místech rozšíření stěn odlitku (v oblasti značení).

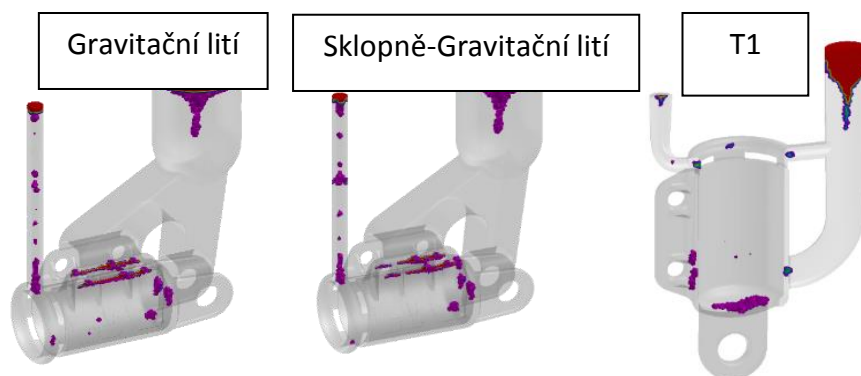
Zobrazení CutOff v čase 14 s



Obr. 15: Výskyt staženiny v oblasti dna odlitku [3]

Zobrazení CutOff, v čase 14 vteřin od počátku lití, ukazuje polotekutý kov, který je stále v kontaktu s povrchem prohřátého jádra. Vysoké teploty v místě dna odlitku udržují tekutou fázi. Z důvodu objemových změn tuhnoucího kovu a již zatuhlých zářezů mezi vtokem a odlitkem, dochází k propadení povrchu odlitku a vzniku soustředěné staženiny.

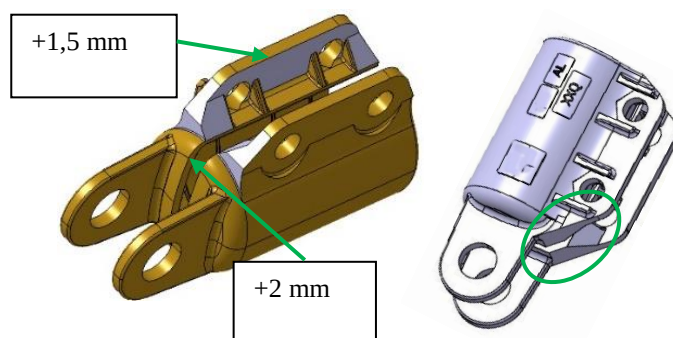
Porovnáním porozity T2 sklopně-gravitačního, gravitačního lití a T1 byl zjištěn totožný výskyt vad. Dle zhotovené simulace nemá změna způsobu zavedení vtokové soustavy, dle T2, vliv na vznik vad typu staženiny a propadení povrchu odlitku. Jako vhodnější způsob lití byl simulací určen gravitačně-sklopný systém, vzhledem k nižšímu výskytu oxidů v odlitku při lití. Dále bylo doporučeno zvážit další úpravy vtokování, nálitkování či změny tvaru odlitku.



Obr. 16: Porovnání možného výskytu porozity jednotlivých technologií [3]

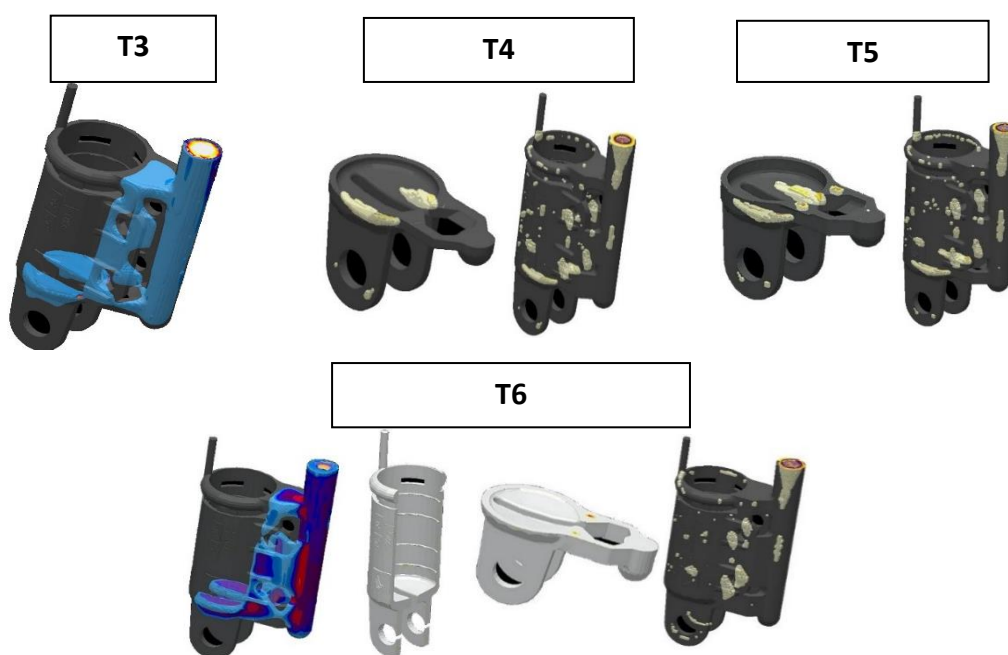
- **Simulace T3, T4, T5, T6**

Na základě získaných informací ze simulací T1 a T2, zkušeností technologů ve slévárně a konzultací s odborníky na kokilové lití a zákazníkem, bylo zhotoveno několik dalších technologických variant.



Obr. 17 Úprava 3D dat odlitku

V těchto případech již došlo k zásahům do odlitku. Na odlitku bylo rozšířeno dno a ramena. Ramena u případu T6 byla prodloužena a napojena na dno odlitku. Veškeré zásahy byly provedeny pouze v 3D datech a ověřeny simulováním pomocí softwaru Magma firmou Foseco.



Obr. 18 Výsledky simulací technologií T3-T6

Simulací technologií T3-T6 bylo zjištěno, že změnou způsobu lití by doba dosazování kovu do kritických míst na odlitku byla prodloužena. Porozita by se na odlitcích se změnou technologií snižovala, nicméně by zcela nevymizela. Kritické místo v oblasti dna, kde se tvoří nejrozsáhlejší staženiny, by bylo zřejmě vyřešeno napojením vtokového kůlu na dno odlitku, ale porozita v oblasti žebor by byla větší, viz Obr. 18 - T6.

ZÁVĚRY

Odlitek „Kloub 55“

Vzhledem k nepřesvědčivým výsledkům získaných nejenom ze simulací a vzhledem k dalším nákladům v případě výroby zcela nové kovové formy, bylo rozhodnuto ponechat původní technologii T1 a provést několik změn na stávající formě.

Bylo odlito několik testovacích kusů, na kterých se ukázala pozitivní funkce chladítka na eliminaci stažení v oblasti dna (Obr. 19). Chladítko bylo vloženo do spodní části odlitku mezi úchyty pro čep. Nahradilo tak část původního, „ColdBoxového“, jádra. Na základě této zkoušky byl upraven původní jaderník.



Obr. 19 Zkouška zachlazení dna odlitku K55

Na formě byl dále rozšířen dosazovací kroužek, s cílem prodloužit dobu propojení tekuté fáze s odlitkem v oblasti zářezů a eliminování tak vyskytujících se vad uvnitř odlitku pod žebry.

Rozšířeno bylo také napojení vtokového kůlu na spodní část odlitku, které by mělo zlepšit dosazování tekutého kovu do dna odlitku. V poslední řadě byly do formy, v oblasti nacházejících se vnějších žebor, vyfrézovány dírký o $\varnothing$ 2 mm, které by měly zajistit lepší odvod plynů a tím zdokonalit dobíhání žebor.

Sklopné kokilové lití

Kokilový stroj IMR C55H splnil očekávání firmy Armatmetal s.r.o. V současné chvíli je výroba ve fázi testování. Firma si od tohoto typu výroby slibuje výrazné zjednodušení dokončovacích operací i přípravy k lití.

LITERATURA

- [1] Úvodní stránka. Armatmetal spol. s r.o. [online]. Olomouc: Armatmetal spol. s r.o., 2017 [cit. 2019-03-08]. Dostupné z: <http://www.armatmetal.cz/>
- [2] Operative manual - C55H: Foundry machines and installations. Gorizia(GO) - ITALIA, 2018, 97 s. IMR E&R S.r.l.
- [3] PROCHÁZKA, Zdeněk a Marek KOVÁČ. Simulace gravitačního a sklopného lití: Odlitek vidlice s kloubem. 2018. Prezentace, Mecas ESI s.r.o.

Odlitky ze slitin hořčíku a jejich dopad na životní prostředí

Bryksí Stunová, B.¹⁾

¹⁾ ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie, Technická 4, Praha 6, 166 07, barbora.stunova@fs.cvut.cz

Klíčová slova

Hořčík; Odlitky; Životní prostředí

Abstrakt

Hořčík a jeho slitiny jsou ze slévárenského pohledu velice zajímavým fenoménem. Při relativně nízké hmotnosti dosahují dostatečných hodnot mechanických vlastností a dobrého poměru hmotnost/výkon u odlitků. Mají také dobré slévárenské vlastnosti. Historicky se nabízí jejich masivní nasazení za účelem snižování hmotnosti sestav, např. v automobilovém průmyslu. Zejména na konci 20. století byla slitinám hořčíku věnována význačná pozornost z hlediska výzkumu a vývoje. S odstupem času se ukazuje, že bezpečnostní, hygienická a environmentální úskalí provázející výrobu odlitků ze slitin hořčíku nedovolují jejich významnější rozšíření mimo aplikace, kde jsou tradičně používány. Tento článek si klade za cíl zmapovat jednotlivé výrobní a životní etapy odlitků ze slitin Mg z hlediska dopadů na životní prostředí.

ÚVOD

Trend posledních let, kterým je snižování hmotnosti, snižování spotřeby paliva a tím emisí škodlivých látek do ovzduší a celkové odlehčování konstrukcí zejména v automobilovém průmyslu a dalších oblastech vedl k hledání alternativ za konvenční konstrukční materiály. V 80. letech 20. století přišla masivní vlna použití slitin hliníku, které se nyní dostávají i do strukturních aplikací karoserií automobilu v podobě odlitků. V posledních letech se diskutují a uplatňují kompozitové konstrukce propojující kovové a polymerní materiály do hybridních celků.

Samostatnou kapitolou v dané oblasti jsou slitiny hořčíku. Historie používání hořčíkových slitin je poměrně krátká a je spojena s rozvojem automobilového a leteckého průmyslu. Mezi nejznámější příklady patří sériové nasazení hořčíkových odlitků při výrobě auta VW-Brouk v dobách hitlerovského Německa ve 30. letech minulého století. Na jednom vozidle VW Brouk bylo použito přes 20 kg hořčíkových slitin a to díky prof. Ferdinandu Porsche. Velký rozvoj výroby byl zaznamenán zejména po začátku 2. světové války, kdy byla potřeba snížit hmotnost zbraní dopravovaných na frontu a tím zlepšit zásobovací logistiku dle možností armády.

Odlitky ze slitin hořčíku v ČR mají tradici několika sléváren: Kovolís Hedvíkov, Metalis Nejdek, Strojmetal Kamenice, Tatra Kopřivnice, ČKD Tatra Smíchov, ze které byla výroba hořčíkových odlitků v roce 1958 přesunuta do nové slévárny ČKD v Hradci Králové (dodnes fungující pod názvem Explat), kde se ale za války již hořčík odléval, apod. Paradoxně, v polovině 20. století byla produkce hořčíku výrazně vyšší než dnes, alespoň z pohledu naší země.

Po válce výroba poměrně dlouho stagnovala, přičemž prudký nárůst je zaznamenán zhruba začátkem 80. let minulého století. Další vlna zájmu o hořčíkové odlitky přišla na přelomu tisíciletí jak z pohledu vývoje nových materiálů s lepšími vlastnostmi, tak potažmo v aplikacích, kde doposud hořčík nenacházel uplatnění. Např. automobilka BMW přišla v roce 2004 s unikátním řešením hliníkového zálitku v hořčíkovém bloku řadového šestiválcového motoru. Záměrem celého rozsáhlého projektu bylo snížit hmotnost o 10 kg, snížit spotřebu paliva o 12% a zvýšit výkon o 20 kW [1]. Touto cestou se vydalo mnoho dalších automobilek (např. Audi – VW Group [2]) a to nejen pro zážehové, ale i pro vznětové motory (motor pro VW Lupo, Fox), které kladou větší nároky na mechanické vlastnosti a zejména teplotní odolnost. Slitiny hořčíku nalézají uplatnění kromě bloků motorů i v jiných oblastech a to jak v takzvaných sekundárních částech, tak ve strukturálních dílech (např. Mercedes AMG SLS).

Při snaze snížit dopady na prostředí provozem dílu je ale nutné brát v potaz i aspekty procesu výroby dílu a možnosti jeho recyklace. Místo na trhu a konkurenceschopnost výrobků jsou stále více posuzovány mimo jiné také z hlediska dopadu na životní prostředí. Tím je myšlen environmentální efekt jak produkce primárního materiálu, výroby produktu, jeho užívání, ale také recyklace dílů po skončení jejich životnosti [3]. V případě slitin Mg jde zejména o primární výrobu hořčíku z rud či mořské vody a výrobu slitin hořčíku. Dále jde o procesy zpracování, jako je tavení a odlévání, následné obrábění a povrchové úpravy a nakládání s výrobními odpady. Po skončení provozu dílu je nutné vzít v potaz jeho recyklaci.

HOŘČÍK A JEHO VLASTNOSTI

Hořčík je pojmenován po dávném městě Magnesia, historicky byl používán v léčitelství (MgSO_4) - „hořká sůl“. Poprvé byl redukován elektrolýzou z taveniny MgCl_2 v r. 1808 (H. Davy). Chemicky byl poprvé získán působením par kovového draslíku na bezvodý MgCl_2 v r. 1830 (Bussy). Jedná se o alkalický kov druhé skupiny, velmi reaktivní, volně se vyskytující pouze ve sloučeninách (Mg^{+2}). Má těsnou hexagonální soustav, u které je charakteristická deformace dvojčatěním.

- hustota: při 20 °C 1738 g/cm³, při 700 °C 1580 g/cm³
- teplota tání: 650 °C
- teplota varu: 1090 °C
- nízká zápalná teplota (< 500 °C)
- vysoká teplota hoření (> 2000 °C)
- špatná odolnost proti korozi

Hořčík je velmi rozšířený jak na Zemi, tak ve vesmíru. Je to 6. nejrozšířenější prvek na Zemi:

- tvoří přes 2 % hmoty zemské kůry (27,6 g/kg)
- řadí se za O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K
- obsažen 1,3 % v mořské vodě (1,35 g/l) a je po draslíku druhým nejzastoupenějším kationtem (v obj. % se řadí za O, H, Cl, Na)

Ve vesmíru se vyskytuje 1 atom Mg/30 000 atomů H. Je to biogenní prvek, který se vyskytuje ve všech zelených rostlinách (součást chlorofylu) a je také nenahraditelně potřebný pro živočichy.

Tab. 1: Zásadní chemické reakce Mg [4]

Oxidace / hoření	$2\text{Mg} + \text{O}_2 = 2\text{MgO}$
Rychlé odpařování (expanze) vody ve styku s tekutým Mg	$\text{Mg (liq.)} + \text{H}_2\text{O (liq.)} = \text{H}_2\text{O (vap.)} + \text{Mg (jemné kapičky)}$
Reakce vody / exploze vodíku	$\text{Mg} + \text{H}_2\text{O} = \text{MgO} + \text{H}_2$ $2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$
Termitická reakce (s korozní zplodinou)	$3\text{Mg} + \text{Fe}_2\text{O}_3 = 3\text{MgO} + 2\text{Fe}$
Reakce s SiO_2	$2\text{Mg} + \text{SiO}_2 = 2\text{MgO} + \text{Si}$

PRIMÁRNÍ VÝROBA MG A SLITIN MG A JEJICH SPOTŘEBA

Mezi zásadní zdroje Mg patří rudy a mořská voda. Z rud jsou to zejména:

- dolomit $\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$ ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ uhličitan hořečnato-vápenatý)
- magnezit MgCO_3 (uhličitan hořečnatý)
- karnalit $\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
- periklas, brucit, kieserit, epsomit, kainit, polyhalit, boromagnesit, hydroboracit, spinel, magnesioferit, pleonast, picotit, olivín, ...

U mořské vody se jedná zejména o tyto zdroje hořčíku:

- chlorid hořečnatý $\text{MgCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ = bischofit
- bromid hořečnatý MgBr_2
- síran hořečnatý MgSO_4

Tradičním a historicky prvním způsobem redukce hořčíku z rud je elektrolýza. Od tohoto procesu je však upouštěno a přežívá pouze v technicky méně vyspělých zemích, které jsou však také tlačeny k jeho eliminaci. Alternativou je tepelná redukce hořčíku, jejímž nejznámějším způsobem je tzv. Pidgeonův proces (1940 Kanada). I tento proces má negativní environmentální dopady a proto neustále probíhá jeho zdokonalování. Moderním způsobem získávání hořčíku je jeho redukce z mořské vody, která obsahuje zejména Bischofit ($\text{MgCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) a dále MgBr_2 a MgSO_4 v obsahu asi 1,35 g/l mořské vody. Hořčík je získáván odvodněním Bischofitu, jeho následným tavením, ustátím a elektrolýzou.

Zajímavý je rozvoj primární výroby hořčíku na dálném východě, zejména v Číně (viz tab. 2), která se tak na přelomu milénia stala lídrem na trhu v primární výrobě hořčíku.

Tab. 2: Produkce primárního Mg v letech 1996 – 2002 [5]

Stát	Výroba primárního Mg (v tis. tun)			
	1996	1998	2000	2002
USA	142	117	74	74
Brazílie	9	9	9	9
Kanada	42	57	55	107
Čína	60	120	195	205
Izrael	-	25	25	34
Indie	1	1,5	1	1
Francie	10	16	17	-
Norsko	35	49	50	20
Srbsko	1	3	2	4
Ukrajina	8	6	2	10
Rusko	51	53	40	62
Kazachstán	12	15	10	15
Celkem	371	485	480	541

Čína se snaží vyhovět globálním environmentálním požadavkům a zavádí tzv. „clean production“, což je zlepšené vybavení pro redukci hořčíku Pidgeonovým procesem z dolomitu. Soustředí se na energetickou strukturu a využití vázané energie (zkrácení času, míchání, čištění a legování v jednom procesu), na prvky ochrany prostředí (řízení emisí), na mechanizaci procesu a na automatizaci řízení teploty, přípravu materiálu a zavážení. Používá nové typy redukčních pecí s vyšší účinností díky efektivnímu předávání tepla, přehřevu, ejektorovým pumpám a vakuu a řeší komplexní využití odpadů. Hořčíkový průmysl v Číně začíná jít ekologickou a ekonomickou cestou využívání odpadů, recyklace, zvýšení úrovně procesu a snížení spotřeby energie [5]. Světová spotřeba hořčíku výrazně vzrostla mezi lety 2002 a 2005 přes hodnotu 800 tis. tun, ale následně se růst zastavil i přes stále rostoucí spotřebu v Číně. Poklesla totiž poptávka v USA a v Evropě. Pokles v roce 2008 (7 %) a v roce 2009 (19 %) způsobil meziroční růst v letech 2008 – 20015 pouhé 1,6 %. Dobrý byl rok 2010 (růst 18 %) a 2011 (růst 9 %), v letech 2012 a 2013 byl opět roční nárůst nízký, významný nárůst přišel v roce 2014 na 1 Mt. Celkově se ale po roce spotřeba zvyšuje právě díky Číně. V současné době Čína produkuje 78 % globální primární produkce (900 tis. tun/2015), spotřebou 30 %. V roce 2015 vykazovalo primární výrobu hořčíku pouze 7 zemí, z nichž nejvýznamnější jsou Čína (78 %), Rusko (necelých 8 %) a USA (6 %), ostatní země celkem 8 %.

Sekundární produkce má stále významnější zastoupení, polovinu celkové sekundární produkce zajišťují USA (125 tis. tun). [6, 7]

V dalších letech se předpokládá růst spotřeby průměrně 3,4 % ročně s výhledem na 1 200 tis. tun v roce 2020. Pro srovnání, spotřeba hliníku by měla mít nárůst 4 % ročně). O růst spotřeby by se měl postarat automobilový průmysl. Předpokládá se také zvýšená poptávka po kompozitech s hořčíkovou maticí vyztužených nanočásticemi karbidu křemíku, použité v Mg-ION bateriích, které mají dvojnásobnou kapacitu oproti Li-ION bateriím. [7]

Do roku 2020 by měly být realizovány 4 velké projekty v oblasti produkce hořčíku:

- Qinghai Salt Lake v Číně s předpokládanou produkcí 100 tis. tun ročně (2017)

- Alliance Magnesium v Magnole v Kanadě s předpokládanou produkcí 50 tis. tun ročně (2018)
- Latrobe v Austrálii s předpokládanou produkcí 40 tis. tun ročně (2019)
- SilMag v Norsku s předpokládanou produkcí 65 tis. tun ročně (2018)

Pouze asi 40 % primárního hořčíku je využito na slitiny, dalších 40 % je použito při výrobě slitin Al, cca 10 % se používá na zpracování slitin Fe a cca 10 % na další procesy, jako je například anodická ochrana, a v dalších oborech, jako je chemický průmysl, pyrotechnika a další [8].

Odlitky ze slitin hořčíku nacházejí uplatnění kromě automobilového průmyslu také v leteckém průmyslu, v armádních aplikacích, elektronice a elektrotechnice. Největší zastoupení má technologie tlakového lití. [6, 7]

TAVENÍ A ODLÉVÁNÍ SLITIN Mg

Tavení slitin hořčíku je energeticky velmi náročný proces. Jak ukazuje tab. 3, k natavení 1 kg Mg je třeba 1185 kJ. Z hlediska tavení jde o jeden z energeticky nejnáročnějších kovů, vztahujeme-li potřebné teplo k hmotnosti. Vzhledem k velmi nízké hustotě při přepočtu na objem odlitku je tento údaj příznivější, než se na první pohled zdá. Pro tavení hořčíku se používají pece bez přímého předávání tepla a to jak elektrické odporové, tak plynové, tak elektrické indukční. Pro odlévání se používají všechny běžné způsoby od gravitačního do písku, do kokil, až po tlakové lití. Nicméně vzhledem k velmi vysoké reaktivitě hořčíku s kyslíkem je třeba tavení i odlévání provádět pod ochrannou atmosférou nebo tavicími solemi. Tento fakt je z ekologického hlediska velmi nepříjemným aspektem výroby hořčíkových odlitků, jelikož většina používaných plynů se může do určité míry negativně podílet na globálních klimatických změnách.

Tab. 3: Tepelné vlastnosti některých kovů [9]

Materiál	Teplota tavení T_t [°C]	Měrná tepelná kapacita c_s [J/kg]	Skupenské teplo tavení l_t [J/kg]	Teplo k ohřevu z 20°C natavení a přehřátí 100°C nad T_t q [kJ/kg]
železo čisté	1539	497	268	1073
ocel uhlíková	1500	500	272	1062
litina	1150	540	230	894
měď	1083	385	209	657
hliník	658	896	402	1063
hořčík	650	1107	377	1185
zinek	420	389	103	298
cín	232	230	59	131
chróm	1920	469	316	1194
molybden	2620	251	251	929
nikl	1455	446	301	986

Prudká reaktivita taveniny hořčíku se vzdušnou vlhkostí a kyslíkem s sebou nese nutnost použití ochranné atmosféry, nebo přinejmenším tavící soli na povrchu taveniny. Typickým plynem, provázejícím tavení slitin Mg je SF₆. Ten je z ekologického hlediska velmi nepříznivý – jeho vliv je asi 24 000x silnější než u CO₂. Emise SF₆ lze snižovat několika způsoby:

- Náhrada SF₆ jinými chemickými látkami
- Optimalizace použití SF₆ a jejich izolace
- Zachycování a recyklace SF₆

Kjótským protokolem, platným od 1. 1. 2007, je užívání plynu SF₆ výrazně omezeno a celosvětový trend je jej zcela nahradit. V ČR legislativa nestanoví přesně limit pro emise SF₆, nicméně jako směrodatný je brán údaj vypuštění max. 50 kg SF₆ za rok. Nejčastěji používané ochranné atmosféry včetně zkoumaných náhrad za SF₆ jsou zachyceny v tabulce 5. Použití jednotlivých typů směsí plynů je dáno typem slitiny a použité technologie, resp. teplotou tavení a přehřátí.

Tab. 4: Směsi a koncentrace ochranných atmosfér [10]

Účinná látka	Koncentrace ve směsi [obj. %]	Nosný plyn	Použití
SF ₆	0,1 – 0,5	N ₂ , CO ₂ , Ar, VZD	průmysl
SO ₂	0,5 – 1,5 100	N ₂ , CO ₂ , Ar, VZD	průmysl
BF ₃	0,01 – 0,5	N ₂ , CO ₂ , Ar, VZD	výzkum
C ₂ H ₂ F ₄ HCF 134a	0,3 – 1	N ₂ , CO ₂	výzkum průmysl
C ₃ F ₇ C(O)C ₂ F ₅ Novec 612	0,05	N ₂ , CO ₂ + 1 – 5% VZD	laboratorně
CO ₂	100		laboratorně
Ar	100		laboratorně
N ₂	100		laboratorně

Tab. 5: Doporučované ochranné atmosféry pro různé podmínky a teploty [10]

Teplota taveniny [°C]	Doporučovaná směs [obj. %]	Rozrušování povrchu	Kontaminace strusky	Ochrana taveniny
650 – 705	vzd + 0,04 SF ₆	N	N	výborná
650 – 705	vzd + 0,04 SF ₆	A	N	výborná
650 – 705	75 vzd + 25 CO ₂ + 0,2 SF ₆	A	A	výborná
705 – 760	50 vzd + 50 CO ₂ + 0,3 SF ₆	A	N	výborná
705 – 760	50 vzd + 50 CO ₂ + 0,3 SF ₆	A	A	velmi dobrá

Tab. 6: Vliv jednotlivých ochranných atmosfér na globální oteplování [11]

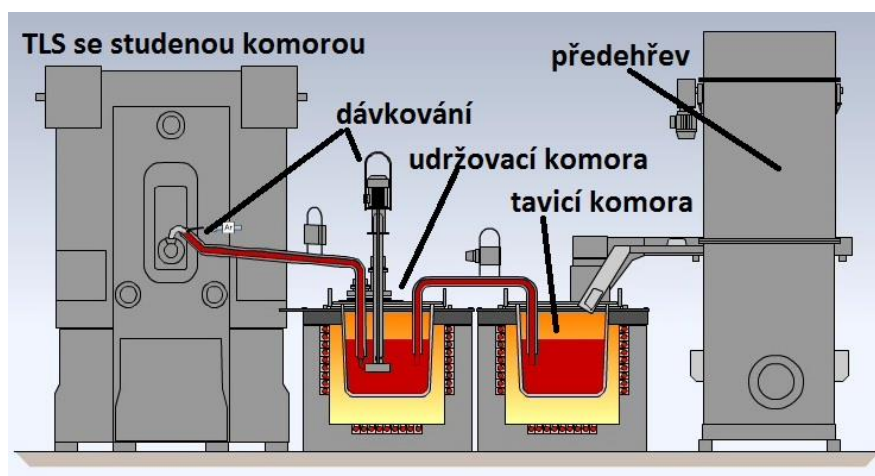
Plyn, ochranná atmosféra	Životnost/rozpad [roky]	GWP*
CO ₂	100 – 150	1
SF ₆	3 200	22 200
C ₃ F ₈	2 600	8 600
C ₄ F ₁₀	2 600	8 600
C ₆ F ₁₄	3 200	9 000
CF ₃ CH ₂ F	13,6	1 600
CF ₃ CHF ₂	32,6	3 800
CHF ₃	243	14 800
C ₃ F ₇ C(O)C ₂ F ₅ (Novec 612)	0,014	1
HCF 134a	14	1,3

* Global Warming Potential

Transport tekutého kovu

Obecně platí zásada s tekutým kovem co nejméně manipulovat. Veškerý transport, stejně jako proces tavení, by měl probíhat v uzavřených prostorech pod ochrannou atmosférou. V moderních slévárnách je doprava kovu na jednotlivá pracoviště prováděna uzavřeným tlakovým potrubím. K tomu jsou využívány různé typy pump, jako naklápěcí, automatické, rotační a mechanické. Často je také v tlakových slévárnách využit systém předehřevu, tavení a dávkování kovu v rámci jednoho zařízení u každého lícího stroje. Tím je dosaženo maximální efektivity procesu tavení s použitím minimálního množství ochranné atmosféry při velmi přesném dávkování kovu do komory stroje pod ochrannou atmosférou argonu.

Před vsazením housek do tavicí pece je bezpodmínečně nutné housky předehřát a tím je zbavit vlhkosti, která by s rostoucí teplotou vyvolávala reakce a mj. způsobovala naplynění taveniny. Při tavení je nutné používat výše uvedené (tab. 4, 5) ochranné atmosféry. V moderních slévárnách je doprava kovu prováděna uzavřeným tlakovým potrubím na jednotlivá pracoviště. Z ekologického hlediska hrají významnou roli právě energetická náročnost procesu tavení, nutnost zajištění ochranných atmosfér, nižší stupeň využití kovu z důvodu nemožnosti přetavování vratu, nakládání se stěry a další.



Obr. 4 – předehřívací, tavicí a dávkovací jednotka Striko pro technologii tlakového lití na stroji se studenou komorou [Striko Westofen GmbH]

Odlévání do pískových forem

Lití do písku je používáno pro hořčíkové slitiny od prvních pokusů s litím hořčíku. Proces se pro hořčík principiálně neliší od ostatních kovů litých touto technologií, nicméně je třeba brát v úvahu několik specifík hořčíku:

- Tavenina hořčíku reaguje s běžně používanými materiály slévárenských forem včetně křemíkových sloučenin a mimoto dochází k velmi bouřlivé reakci s vodou. V důsledku těchto faktů musí být vlhkost formovacích směsí udržována na minimu a do směsí přidávány nejrozdílnější inhibitory hoření pro zabránění interakce taveniny s formou.
- Tavenina hořčíku velmi snadno oxiduje a potahuje se vrstvou oxidů, která se snadno zamíchá do roztaveného kovu, proto musí vtoková soustava navržena tak, aby nedocházelo k víření a turbulencím v tavenině.
- Hustota hořčíku je nižší než u většiny běžně používaných slévárenských kovů. Při běžném gravitačním lití je tedy metalostatický tlak plnění formy relativně nízký. Formy tedy musí být dobře prodyšné a mít zajištěný dobrý odvod plynů, aby nedocházelo k nezaběhnutí taveniny do užších míst, případně k úplnému zamrznutí taveniny v úzkých místech. S nízkým metalostatickým tlakem souvisí také omezená dosazovací schopnost náliťků, které se pro Mg předimenzovávají – mj. také z důvodu širokého dvoufázového pásma.
- Významná je samovolná konvekce, což je zapříčiněno velkou tepelnou roztažností tekuté fáze. Tepelná roztažnost hořčíkových slitin v tekutém stavu je cca 7 % při přehřátí o 100 °C, naproti tomu tepelná roztažnost slitin hliníku je pouze cca 1,2 % při přehřátí o 100 °C. Díky tomu začne lehčí teplejší kov proudit směrem nahoru a směrem dolů proudí těžší chladnější kov, čímž lze dosáhnout usměrněného tuhnutí i u spodního vtoku, který je pro slitiny Mg charakteristický [12].

Historicky nejpoužívanější formovací směsi jsou bentonitové směsi s přísadami inhibitorů hoření. Jako inhibitory hoření jsou používány prášková síra a kyselina boritá (H_3BO_3).

Při plnění formy dochází za podpory předávaného tepla k prudké reakci síry s kyslíkem za vzniku SO_2 , který se chová jako inhibitor hoření. Tento toxický plyn ovšem uniká z formy a vytváří dráždivý až dusivý kouř, který je třeba z důvodu ochrany zdraví pracovníků odvádět ventilací. Environmentální dopady SO_2 jsou velmi negativní, proto je třeba v moderních formovacích směsích obsah síry minimalizovat. Lze ji nahrazovat např. KBF_4 .

S rozvojem použití Mg slitin v automobilovém průmyslu je třeba dále rozvíjet i formovací směsi. Formovací směsi na bázi bentonitu sice přináší mnoho komplikací, ale zároveň jsou velmi výhodné pro svoji nízkou cenu, snadnou recyklaci a relativně bezproblémové likvidování odpadu. V poslední době je dosahováno snížení obsahu vody a tedy i potřeby inhibitorů hoření ve formovací směsi přidáváním močoviny.

Dalším typem formovacích směsí pro slitiny hořčíku jsou směsi s chemickým pojivem. Typicky se pro formy samotné používají samotuhnoucí směsi, pro jádra se používají směsi vytvrzované tepelně nebo plynným katalyzátorem. Základní rozdělení je zachyceno v tabulce 7.

Tab. 7: Typy chemicky pojených směsí pro slitiny Mg [13]

Vytvrzovací proces	Druh směsí, pojiv	Příklad
tuhnutí na vzduchu	silikáty vytvrzované estery fenolická močovina fenolické vytvrzované kysel fenolické vytvrzované zásaditě močovinový furan fenolický furan močovinovo/fenolický furan	Pepset, Novathane Alphaset
teplem	olejové směsi croning warm box hot box	
plynem	CO ₂ /silikátový proces amino/fenolické uretanové SO ₂ proces fenolické plynem vytvrzované	Isocure Isoaset Betacure, Novaset

Typický obsah chemických pojiv ve formovací směsi je 1%, vzhledem ke konkrétním potřebám odlitku může být i vyšší. Jako písek se pro hořčík používá nejvíce plavený, sušený křemičitý písek (50 – 100 AFS). Pro jemnější detaily je vhodnější např. zirkoniový písek.

Jak již bylo uvedeno, tavenina hořčíku reaguje s vodou a za vyšších teplot i s křemičitým pískem. Použitím chemických pojiv se sice reakce s vodou omezí na minimum, nicméně použití inhibitorů hoření se nelze zcela vyhnout především z důvodů bezpečnosti. Nejrozšířenější inhibitory jsou zachyceny v tabulce 8.

Tab. 8: Inhibitory hoření pro pískové formy [13]

Inhibitor	Množství [%]	Poznámka
síra	1 – 2	velmi efektivní, ale dochází k uvolňování SO ₂
KBF ₄	1 – 2	efektivní, může produkovat kouř obsahující fluor nebo HF
50% KBF ₄ / 50% HBO ₃	2	nižší obsah fluoridů než KBF ₄ samotný, ale podobný účinek
K ₂ SiF ₆	1 – 2	horší účinek než KBF ₄
75% K ₂ SiF ₆ / 25% S	1 – 2	přídavek síry výrazně zlepšuje účinnost, ale uvolňuje se SO ₂
Na ₂ SiF ₆	1 – 2	srovnatelný s K ₂ SiF ₆ , směs lze následně použít i pro Al

Tlakové lití

Tlakové odlévání je nejzastoupenějším technologií odlévání slitin Mg. Výrazně se neliší od odlévání slitin Al, přesto má tato technologie pro slitiny Mg charakteristické rysy. Slitiny Mg lze odlévat jak na stroji se studenou komorou (větší odlitky), tak na stroji s teplou komorou (menší odlitky). Vlastní proces z hlediska cyklu je podobný, s tím rozdílem, že díky tepelně fyzikálním vlastnostem Mg je jak plnění formy, tak tuhnutí odlitku kratší a např. čas postřiku kratší, čím se zkracuje celkový čas cyklu a zvyšuje se produktivita ve srovnání se slitinami Al. Rozdíl je také v konstrukci vtokové soustavy – masivnější naříznutí, v konstrukci formy – větší tloušťka stěny mezi tvarem a chladicím kanálem, pracovní teplota formy atp., a také např. v použitých postřikových materiálech – pro Mg by neměly být na bázi vody.

OBRÁBĚNÍ A POVRCHOVÉ ÚPRAVY ODLITKŮ

Obrábění odlitků ze slitin Mg přináší také určitá omezení a vyžaduje dodržování přísných bezpečnostních předpisů. Zcela zásadní je volba řezné rychlosti, aby nedošlo k lokálnímu zvýšení teploty až na teplotu zápalnou, která je u slitin Mg nižší než teplota tání (cca 450 °C). Z ekologického hlediska je také významná volba řezné kapaliny, která nesmí být na vodní bázi, právě vzhledem k uvedené reaktivitě Mg. Další oblastí, kde hořčík a jeho slitiny vyžadují specifika, je nakládání s odpady, zejména s třískami po obrábění a prachem. Veškeré činnosti manipulace, skladování a likvidace hořčíkových třísek popisuje norma [14] a musí být přesně definovány v interních bezpečnostních předpisech podniku.

Problémy, které způsobuje velká reaktivnost hořčíkové taveniny s kyslíkem a vodou, nejsou jediné, které výroba odlitků z hořčíkových slitin přináší. Přestože hořčík má z fyzikálně chemického hlediska velmi podobné vlastnosti jako hliník, na rozdíl od hliníku mají hořčíkové odlitky výrazně horší odolnost proti korozi. Hořčík je primárně ohrožen galvanickou korozí, která vychází z jeho elektrochemického potenciálu -2,37 V. Díky velkému rozdílu potenciálu vůči kyslíku i vodě je s těmito velmi reaktivní a vytváří hydroxidickou vrstvu. Hořčík se v atmosféře tedy snadno povlakuje tenkou (cca 1 μm) vrstvou $Mg(OH)_2$ a hydratovaných oxidů legur a to až do doby než na povrchu dosáhne $pH = 8,5$, kdy se tato vrstva stane stabilní. Zatímco u hliníku je vytvoření pasivní oxidické vrstvy na povrchu ochranou před korozí, u hořčíku toto bohužel nefunguje. Podstata problému tkví v nekonzistentnosti povrchové vrstvy. Na povrchu kovu se vytváří ve skutečnosti trojitá pasivační vrstva – spodní, hydratovaná vrstva, tenká, ale hustá prostřední vrstva a silně porézní povrchová vrstva. Díky hexagonální mřížce hořčíku, která se neshoduje s geometrickým uspořádáním hydroxidu hořečnatého, vzniká v povrchové vrstvě silné pnutí, díky kterému pasivační vrstva (především prostřední) praská. Prasklinami pak pronikají nečistoty, voda a vzdušný kyslík do spodních vrstev a koroze proniká hlouběji do odlitku. Praxe ukazuje, že nechráněné hořčíkové odlitky ze slitin, které nemají zvýšenou korozivzdornost, mají velmi krátkou životnost, mnohdy v týdnech či dnech.

Výrobky z hořčíkových slitin je tedy nutné opatřit vhodnou povrchovou úpravou. Nejrozšířenější způsoby povrchové úpravy hořčíku jsou konverzní povlaky. Po očištění, odmaštění a aktivování povrchu jsou hořčíkové odlitky umístěny do aktivní chemické lázně, kde bez působení vnějších zdrojů energie dochází k chemické reakci mezi hořčíkem a danou lázní. Aplikace lázně může probíhat buď tradičně ponořením, sprayováním nebo natíráním. Chemickou reakcí tak vznikne povrchová vrstva, typicky tloušťky 1 – 5 μm. Vznik tohoto

konverzního povlaku se jeví jako anodická reakce, která probíhá v několika fázích. Primárně se aktivovaný povrch potáhne vrstvou $\text{MgO}_x(\text{OH})_y$, který se dále působením chemické lázně rozpouští a transformuje na výslednou ochrannou konverzní vrstvu.

Z hlediska ekologické zátěže jsou bohužel problematické obě fáze tvorby konverzních povlaků. Lázně používané pro aktivování povrchu odlitků jsou zachyceny v tabulce 9.

Tab. 9: Aktivační lázně [13]

Druh	Aplikace	Lázeň	Vana
kyselina chromitá	odstranění oxidů, produktů koroze, staré chromátové povlaky a jiné povrch. povlaky	1 – 15 min v lázni CrO_3 (180 g/l), teplota lázně 20-200°C	nerezová ocel, hliník 2S
kyselina fluorovodíková	aktivace povrchu před aplikací konverzních povlaků	0,5 – 5 min v lázni 70% HF (160mg/l), teplota lázně 20-30°C	olovem plátovaná ocel, syntetická guma, polyethylen
nitrat kyseliny chromité	odstranění oxidických vrstev, lubrikantů	3 min v lázni CrO_3 (180 g/l) + NaNO_3 (30 g/l), teplota lázně 20-30°C	nerezová ocel, konstrukční ocel plátovaná olovem nebo potažená gumovým povlakem, PVC
kyselina sírová nebo dusičná	odstranění nečistot po tryskání	10 – 15 s v lázni 65% HNO_3 (90 ml/l) + 98% H_2SO_4 (20 ml/l), teplota lázně 20-30°C	keramika, sklo, guma, PVC

Po aktivaci povrchu je nutný důkladný oplach. Po oplachu je co nejdříve aplikována chemická lázeň pro vytvoření konverzního povlaku. Nejrozšířenější jsou chromátové povlaky. Postup vytváření chromátových povlaků je zachycen v tabulce 10.

Tab. 10: Chromátování [13]

Chromátování typ I, MIL-M-3171	
složení elektrolytu	180 g/l dichromát sodný $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ 190 ml/l 65% HNO_3
parametry	máčení 30-120 s, teplota lázně 20-40°C tloušťka vrstvy cca 10-15 $\mu\text{m}/\text{min}$
Chromátování typ II	
složení elektrolytu	140 g/l dichromát sodný $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ 110 ml/l 65% HNO_3 4 ml/l konc. H_2SO_4
parametry	máčení 10-30 s, teplota lázně 20-40°C tloušťka vrstvy cca 3-5 $\mu\text{m}/\text{min}$

U tlakových odlitků se často projeví tzv. propustnost – tedy netěsnost porézní struktury, která vzniká při nedodržení konstrukčních, metalurgických a technologických parametrů výroby. Jako zajímavé řešení se jeví použití nízkotavitelných slitin, zejména slitina cínu, olova, vizmutu a kadmia, jak uvádí britský patent [15] z roku 1934. Odlitky předeřáté na teplotu 160 °C se napouští uvedenou slitinou o teplotě asi 80 °C pod dostatečným tlakem. Slitina je zalita do póru, ale na povrchu odlitku nezůstává žádný film. Vzhledem k použitým toxickým prvkům a těžkým kovům je však v dnešní době realizace takovéto impregnace nepřijatelná a je nutné ji řešit ekologicky příznivějšími napouštědly na bázi pryskyřic.

RECYKLACE SLITIN Mg

Hořčík a jeho slitiny jsou plně recyklovatelné. K recyklaci nutí i skutečnost, že primární výroba hořčíku a jeho slitin z přírodních surovin je velmi energeticky náročná ve srovnání s energií potřebnou k získání slitin z druhého tavení [1]. Při recyklaci se spotřebovává pouze 5 % energie potřebné pro výrobu primárního kovu.

Hlavním kritériem, ovlivňujícím, zda budou či nebudou součásti recyklovány, je chemické a fyzikální složení. Před recyklací bývají součásti drceny, tříděny, briketovány a jsou z nich odstraňovány nátěrové hmoty. Jako další se můžou provést kroky vhodné pro zlepšení ekonomičnosti tavení a účinnosti recyklace.

V současné době je možné snadno recyklovat pouze hořčíkový odpad bez nečistot, a to do velmi vysoké čistoty, recyklace ostatního hořčíkového odpadu s vyšším obsahem nečistot vyžaduje vyšší energetickou náročnost pro dosažení vysoké čistoty hořčíku a stává se tak ekonomicky méně výhodnou. Pro co nejdůkladnější odstraňování povlaků se stalo nejpoužívanějším termální zpracování, které umožňuje odstraňovat organické povlaky před tavením hořčíku co možná nejdůkladněji se současně minimálními náklady. Jako další metodu lze použít rozpouštědla, která jsou ale méně šetrná k životnímu prostředí a současně cenově nákladná.

Vratný materiál ve slévárnách aplikujících gravitační odlévání do písku je recyklovatelný přetavením na místě. U tlakových sléváren je přetavování vratu problematické, přetavují se pouze zmetky a ještě teplé vtoky hned na pracovišti. Po vychladnutí není běžnou praxí vrat přetavovat a odváží se do hutí. Dle průzkumu společnosti Hydro Magnesium je materiál vystupující z procesu tlakového lití z 50 % vlastní odlitek, 42 % čistý tříděný vrat, 3 % vratný materiál netříděný (např. odlitky se zálitky, materiál mastný, povrchově upravený, přestálé odlitky), 3 % třísky, 2 % stěry. Výzkum ukazuje možnost lisování strusky a stěrů do bloků pomocí kovové bedny a jejich následné drcení a mletí (v rotačním drtiči), třídění a opětovné použití Mg při výrobě litiny. Zbytkový prášek je nutno deaktivovat. Třísky je doporučeno stlačovat do briket či dlouhých válců při teplotě 300 °C, aby došlo k vypaření lubrikantů a nečistot a tím se následné tavení briket stalo bezpečnější a ekologičtější [16]. Zajímavé řešení zpracování vratu přímo ve slévárně navrhuje společnost Advanced Magnesium Technologies Pty Ltd. [17]. Tato firma vyvinula konvertor na rychlé tavení ingotů a vratu, který může souběžně pracovat s tavicí pecí. Je založen na principu proudění tekutého kovu kolem vsázky bez narušení hladiny, která je krytá atmosférou, a na pumpování kovu z lázně, takže nedochází k nasátí strusky a oxidických plen. Další výhodou tohoto agregátu je přesné řízení a sledování teploty, což zaručuje taveninu bez segregace a precipitace intermetalických fází a tedy konstantní kvalitu kovu. Agregát má výkon 1,5 t/hod, ztráty tavením jsou

minimalizovány na 1 %. Autoři uvádějí, že konvenčním způsobem stojí natavení 1 kg Mg slitiny 3,12 EUR zatímco v AM – konvertoru 2,09 EUR. Jako další výhody autoři uvádějí rychlost a výkonnost, přímý reprocesing vratu, teoretickou eliminaci stěrů, ve spolupráci s pecí zvýšení její kapacity a prodloužení životnosti kelímku. Tento agregát je instalován ve slévárnách v Norsku a získal cenu IMA Awards of Excellence.

Pro dekorativní úpravy hořčíkových slitin se používají povrchové úpravy, které současně chrání odlitek před korozí. Dle požadovaného konečného stavu výrobku volíme vhodné chemické a mechanické úpravy povrchu, kterých je široká škála. Právě z těchto důvodů je recyklace hořčíku značně obtížná. Povrchové úpravy lze odstraňovat třemi způsoby, a to rotačními pecemi, pásovým odstraňováním a fluidně. Plynne emise, vznikající z organických povlaků se dají snadno sledovat, tím pádem i omezovat a neutralizovat, což je značná výhoda při odstraňování povlaků.

Nebezpečím pro tavení hořčíkového odpadu je obsah zbytkové vlhkosti a proto je nutné tuto vlhkost eliminovat. Obsah organických látek v obsahu hořčíkového odpadu nesmí přesahovat 10 % objemu, přičemž barva a lak tvoří na povrchu ulpívající tenkou vrstvu, jejíž hmotnost obsahuje až 5 % hmotnosti povlakovaných dílů. Hořčíkové čipy kontaminované ropou se nejprve musí odstředit, aby podíl zbytkového oleje klesl na 7 – 10 % z celkového objemu.

Přes samozápalné vlastnosti tenkostěnných tlakových odlitků z hořčíkových slitin a hořčíkových čipů je tepelné zpracování bezpečný a efektivní způsob odstraňování barev a olejů. Teplota potřebná pro rozklad celého organického povlaku je závislá na použité atmosféře, složení organických sloučenin a bodu tání slitiny hořčíku. Pro odstranění většiny organických sloučenin je nutné použít teplot v rozmezí 200 – 400 °C. Pouze v případech kdy je inertní plyn použit pro tepelné zpracování, může být zkrácen čas tepelného rozkladu spolu se zvýšením mezní teploty až na 450°C. Okolní atmosféra se stává redukční při rozkladu organických látek, proto bývá oxidace hořčíku omezená.

Rozkladem organických látek získáváme tuhé, kapalné a plynné látky, přičemž dehtem nazýváme kapalnou fázi. Pevná fáze je tvořená směsí hořlavého materiálu a inertních látek. Podíl jednotlivých fází závisí na rychlosti ohřevu, na atmosféře, na procesu odstraňování povlaků a na povaze organického materiálu. Při vystavení horkých hořčíkových dílů přímému styku se vzduchem hrozí nebezpečí vznícení hořčíku, toto vznícení je omezeno povlakem směsí uhlíku a oxidů hořčíku, vznikajícím na povrchu hořčíkového odpadu. [18, 19, 20, 21]

Vlastní hořčíkové díly jsou po ukončení životnosti recyklovány běžným způsobem přetavení v hutích (pokud jsou ovšem rozpoznány od slitin Al), samozřejmě s dodržением veškerých pravidel pro nakládání s Mg, jako jsou výše uvedené ochranné atmosféry, skladování a nakládání s materiálem atd. V ČR funguje pouze jedna nadnárodní firma zabývající se recyklací.

ZÁVĚR

Lze říci, že technologie primární výroby hořčíku, tavení, odlévání a následná recyklace dílů ze slitin hořčíku jsou technologicky zvládnuté procesy. Jak však vyplývá z výše uvedeného textu, při zpracování slitin hořčíku je ve všech fázích výroby a životního cyklu odlitku používáno velké množství skleníkových plynů, toxických a nebezpečných látek při vysokých energetických potřebách. Vzhledem ke stále se zpříšňujícím environmentálním předpisům

jsou producenti hořčíkových dílů tlačeni kužívání procesů a prostředků, které mají co nejmenší negativní dopad na životní prostředí. V těchto oblastech je stále prostor pro výzkum a vývoj za účelem snížení dopadů výroby odlitků ze slitin Mg na životní prostředí s minimálními náklady, které často rozhodují při volbě mezi hořčíkem a jiným konstrukčním materiálem.

LITERATURA

- [1] FISCHERWORRING-BUNK, A. *New BMW In-Line 6Cylinder Engine Block in Mg/Al Composition*. 62nd Annual World Magnesium Conference – Conference Proceedings. [Sborník]. Wacuonda: International Magnesium Association, 2005.
- [2] SCHUMANN, S. *Audi Hybrid Magnesium Cylinder Block – The Challenge for Development and Production*. 62nd Annual World Magnesium Conference – Conference Proceedings. [Sborník]. Wacuonda: International Magnesium Association, 2005.
- [3] *Magnesium Die Casting Handbook*. NADCA Publication # 201. NADCA, Wheeling: 2006.
- [4] *Safety in Magnesium Die Casting*. [Firemní příručka]. Hydro Magnesium, Brussels: 2007. Dostupné z www.hydromagnesium.com. Cit.: 12/2007.
- [5] SHUKUN, M. *Zvýšení úrovně Pidgeonova procesu redukce hořčíku v Číně a vývoj recyklační ekonomiky*. 62nd Annual World Magnesium Conference – Conference Proceedings. [Sborník]. Wacuonda: International Magnesium Association, 2005.
- [6] China Magnesium Corporation Limited. *Magnesium overview*. Dostupné z: <http://www.chinamagnesiumcorporation.com/our-business/magnesium-overview>. Cit. 15.5.2018.
- [7] Roskill. *Magnesium Metal, Global Industry, Markets & Outlook*. Dostupné z: <https://roskill.com/market-report/magnesium-metal/>. Cit. 15.5.2018.
- [8] MICHNA, Š. *Výroba hořčíku*. [Studijní podklady]. Dostupné z: <http://www.stefanmichna.com/download/technicke-materialy-II/vyroba-horciku.pdf>. Cit.: 8/2010.
- [9] PLACHÝ, J., NĚMEC, M., BEDNÁŘ, B. *Teorie slévání*. [Skriptum]. Vydavatelství ČVUT, Praha: 2002. ISBN 80-01-02471-7.
- [10] Recommended Practices for the Conservation of Sulfur Hexafluoride in Magnesium Melting Operations, IMA Technical Committee Report, 1998.
- [11] MILBRATH, Dean S. 3M Novec 612 Magnesium Protection Fluid. In: International Conference of SF6 and the Enviroment, 2004.
- [12] ZAVŘEL, J.; STUNOVÁ, B. *Analýza aspektů tuhnutí slitin Mg*. XVI. medzinárodná konferencia slovenských, českých, poľských zlievačov SPOLUPRÁCA 2010, Tatranská

Lomnica, 2010. [Sborník – časopis Technológ]. Strojnícka fakulta Žilinskej univerzity, Žilina: 2010. Str. 249 – 253. ISSN 1337-8996.

- [13] FRIEDRICH, H. E., MORDIKE, B. L. *Magnesium Technology*. Springer – Verlag, Berlin: 2006. ISBN-10 3-540-20599-3, ISBN-13 978-3-540-20599-9.
- [14] ČSN 42 1801. *Hořčík a slitiny hořčíku : Bezpečnostní předpisy*. [s.l.] : Český normalizační institut., 1994. 13 s.
- [15] Velká Británie, 1934. High Alloys Duty Limited, Slough : *Způsob dodávání nepropustnosti za tlaku odlitkům ze slitin, neobsahujících železo*. Patentní úřad Republiky československé. Patentový spis č. 58008. 1937, Třída 40 b, s. 5.
- [16] FRANKE, G. *Recycling of Mg Chips and Slug*. 62nd Annual World Magnesium Conference – Conference Proceedings. [Sborník]. Wacuonda: International Magnesium Association, 2005.
- [17] BOLSTAD, J. *Nákladově účinné řešení pro zpracování Mg slitin ve slévárnách*. 62nd Annual World Magnesium Conference – Conference Proceedings. [Sborník]. Wacuonda: International Magnesium Association, 2005.
- [18] HEJDUK, Oldřich. Tvarově lité odlitky z Mg slitin pro automobilový průmysl [online]. Brno, 2010. 35 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z WWW: <http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=28457>.
- [19] Použití hořčíkových slitin ve slévárenství. VUT FS [online]. 2009, [cit. 2011-03-13]. Dostupný z WWW: <http://www.explat.cz/files/pouziti_mg_slitin_ve_slevarenstvi.pdf>.
- [20] Magnesium industry partneship. EPA [online]. 2002, [cit. 2011-03-13]. Dostupný z WWW: <http://www.epa.gov/magnesium-sf6/documents/tms_paper.pdf>.
- [21] The Magnesium Ecosystem for Next-Generation Automobile Structures. Worcenter Polytechnic Institute [online]. 2010, 10, [cit. 2011-03-13]. Dostupný z WWW: <<http://www.wpi.edu/Images/CMS/MPI-CR3/201010WPI.pdf>>.

Řešení pro snadnou automatizaci cídění odlitků

Kubelková, I.¹⁾

¹⁾ Laempe + Panáčková s.r.o., Osadní 12a, Praha 7, kubelkova@laempe.cz

Klíčová slova

Broušení odlitků; Cídění odlitků; Slitiny hliníku;

Abstrakt

Zařízení Koyama slouží k broušení a řezání odlitků, zejména pak pro odstranění zateklin, vtokových soustav a nálitku. Tyto automaty jsou navrženy pro odlitky ze slitin železa, hliníku, mědi a mosazi v hmotnostech od 1 kg do více než 400 kg. Odlitky jsou opracovány 2-5 rychleji než u ručního cídění, navíc za konstantní kvality. Stroj se vyznačuje jednoduchou a bezproblémovou obsluhou - programování Koyamy se provádí na místě, bez nutnosti předchozích zkušeností s CNC programováním.

ÚVOD

Jedním z nejnáročnějších úseků ve slévárenském provozu, ať již z hlediska zajištění pracovníků či obtížnosti vykonávané práce, je cídění. Firma Koyama tak přichází s automatickým cídícím zařízením, které je určeno pro broušení a řezání odlitků. Odlitky jsou opracovány 2-5 rychleji než je tomu u ručního cídění (u složitých dílů to může být ještě rychleji), navíc za konstantní kvality. V porovnání s robotickým řešením se Koyama vyznačuje jednoduchou a bezproblémovou obsluhou - programování stroje se provádí na místě, bez nutnosti předchozích zkušeností s CNC programováním. Nezanedbatelný je také fakt, že svým provedením minimalizuje rizika úrazů očí a prstů (např. Von Willebrandův faktor), která jsou typická pro manuální cídění.



Obr. 20: Cídící a brousící stroj Koyama 400

ÚČEL POUŽITÍ

Stroj byl navržen tak, aby řešil problémy spojené s úzkými výrobními místy, vysokými náklady na pracovní sílu, proměnlivou kvalitou a bezpečnostními otázkami. Zařízení Koyama slouží k broušení a řezání odlitků, zejména pak pro odstranění zateklin, vtokových soustav a nálitků. Tyto automaty jsou navrženy pro odlitky ze slitin železa, hliníku, mědi a mosazi v hmotnostech od 1 kg do více než 400 kg.

Při konstrukci se vycházelo z klasických operací prováděných na odlitcích – broušení a řezání. Bylo tedy třeba z ručního cídění vyjmout nástroje pro broušení a řezání a implementovat je do uzavřeného systému po vzoru CNC obrábění, avšak uzpůsobeného pro náročné prostředí slévárny a požadavky procesu cídění.



Obr. 21: Hlavní broušící kotouč a uchycení odlitku

Funkce zařízení je jednoduchá: odlitek se založí do přípravku a zajistí přidržovačem. Poté se, dle odlitku, zvolí vhodný program a provede se vlastní opracování. Ke stroji je možné si vybrat z velmi rozsáhlého portfolia mnoha nástrojů tak, aby byl stroj použitelný pro většinu odlitků.

Zakládací přípravek nemusí být vůbec složitý – pouze je nutné, aby díl v přípravku držel. Tvarový přípravek se zhotovuje například z epoxidové pryskyřice a kontrolní body/ místa z oceli či slitin hliníku. Pro velké série mohutných odlitků jsou pak přípravky zhotovené z konstrukční oceli.

Velmi podstatnou ekonomickou výhodu tvoří kotouče, které jsou potažené diamantovou drtí. Jakmile se kotouč obrousí, tak se povlak nechá odstranit a potáhne se novým.

OD NÁPADU KE SVĚTOVÉMU TRHU

Automatický brousící stroj Koyama byl vyvinut a patentován společností Koyama Corporation, přední japonské slévárny, která si tak chtěla usnadnit náročnou operaci cídění. Po čase byl o tyto stroje takový zájem, že je společnost Koyama začala prodávat i ostatním slévárnám.

Výjimečnost zařízení Koyama je v samotném nápadu: „Vytvořit stroj, který nebude složitý jako CNC a hlavně nebude třeba odborný personál se znalosti CNC programování, nebude klást takový důraz na přesnost dílů a jejich umístění jako robot a výsledek opracování nebude tolik závislý na schopnostech a momentální kondici operátora.“



Obr. 22: Brousící zařízení Koyama ve slévárně GIFF a.s.

Více jak 3000 automatických brousících a cídících zařízení Koyama v současnosti cídí více jak 100 miliónů odlitků ve 22 zemích světa včetně České republiky a Slovenska. Rekordmanem je holandská slévárna, která má v provozu 46 těchto brousících zařízení při pouze 6 pracovnících cídírny. Ve většině případů si zákazníci, po zakoupení prvního stroje, kupují druhý.

LITERATURA

- [1.] RAWNSON, Phil. A medical emergency – not for this company. In: *Foundry Trade Journal Ltd.* [online]. United Kingdom: Foundry Trade Journal, 2016.
- [2.] WESTLEY, Mike a Holger SCHWARZ. A European flurry for automatic grinding. In: *Foundry Trade Journal Ltd.* [online]. United Kingdom: Foundry Trade Journal, 2017.
- [3.] SIMS, Bob. Automated Grinding Made Easy. In: *Institute of Cast Metals Engineers* [online]. United Kingdom: National Foundry Training Centre, 2016.
- [4.] WESTLEY, Mike a Holger SCHWARZ. Finishing costs drastically reduced with automatic grinding machines. In: *Foundry Trade Journal Ltd.* [online]. United Kingdom: Foundry Trade Journal, 2016.
- [5.] WESTLEY, Mike. The least finishing is the best finishing thanks to automatic grinding solutions. In: *Foundry Trade Journal Ltd.* [online]. United Kingdom: Foundry Trade Journal, 2017.

Kvantitativní použití přípravku MIKRO-100 pro snížení porozity

Hren, I.¹⁾, Michna, Š.¹⁾, Cais, J.¹⁾, Lysoňková, I.¹⁾

¹⁾ Fakulta strojního inženýrství, Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, 400 01 Ústí nad Labem. Česká republika. E-mail: iryňa.hren@ujep.cz

Klíčová slova

Klíčová slova; Hliníkové slitiny; Porozita; Mikrostruktura; Mikro 100.

Abstrakt

V posledních letech jsou hliníkové slitiny stále důležité kvůli jejich nízké hustotě a dobrým technologickým vlastnostem, spolu s dobrými mechanickými a korozními vlastnostmi. Pro výrobu komponentu z hliníkové slitiny, jsou k dispozici různé procesy, jako je válcování, vytlačování a prášková metalurgie, ale významnou roli hrají slévárenské procesy. Při odlévání těchto slitin se často setkáváme s vnitřními vady typu staženin a bublin, které jsou hlavními faktory ovlivňující kvalitu odlitku. Požadavky na kvalitu odlitku se neustále zvyšují, a proto je cílem tyto vady eliminovat na co nejmenší množství a velikost. Z tohoto důvodu jsou současné slévárny nucené zaručit co největší možnou kvalitu odlitků. Staženiny v hliníkových slitinách vznikají převážně u odlitků s nepříznivou tloušťkou stěny nebo v místech tepelných uzlů, které nelze nalitkovat například z důvodu nevhodné konstrukce odlitku. Staženiny mají negativní dopad především na mechanické vlastnosti a tlakotěsnost vyráběných odlitků. K zvýšení kvality odlitků napomáhá přípravek Probat Fluss Mikro100. Článek se zabývá vlivem přídatku přípravku Mikro100 na množství porozity v odlitcích ze slitiny AlSi7Mg0,3. Mechanické vlastnosti slitiny jsou hodnoceny prostřednictvím statické zkoušky tahem. Analýza porozity byla provedena pomocí konfokálního mikroskopu.

ÚVOD

U všech kovových materiálů dochází během tuhnutí a ochlazování k objemovým změnám. Objemové změny u slitin hliníků jsou záporné. Je-li ve formě 100% taveniny o teplotě 720°C, tak po ztuhnutí a ochlazení na 20°C v závislosti na obsahu křemíku bude ve formě úbytek objemu 7%. Nachází-li se na odlitku nebezpečné místo, například určitý teplotní uzel, a tento uzel není dostatečně nebo vůbec nalitkovaný, dochází k deficitu tekutého kovu a k tvorbě otevřených nebo uzavřených staženin. Takto vzniklá staženina má silný vrubový účinek a to má za následek snižování mechanických i únavových vlastností materiálu. [1,8] Abychom takto vzniklou staženinu eliminovali, můžeme slitiny řízeně naplyňovat vodíkem. Vyloučení plynu ve formě bublin nastává v místě, kde dojde k dosažení přesyceného stavu. Pokud se atomy vodíku již nevejdou mezi atomy hliníku, začnou vytvářet vlastní útvary, tedy bubliny. Počet a velikost takto vzniklých bublin je závislý na množství rozpuštěného vodíku a množství vhodných heterogenních zárodků, které se vyskytují v tavenině. Je-li v tavenině obsaženo velké množství vodíku a malé množství vhodných zárodků, na kterých by mohla začít inicializace bubliny, vytvoří se ve výsledné struktuře malé množství velkých bublin. S takhle vzniklými bublinami se setkáváme, použijeme-li ke zvýšení obsahu vodíku v tavenině naplyňovací tablety a tyto tablety zvyšují pouze obsah vodíku a ne i počet vhodných

zárodků, na kterých by mohla začít inicializace bubliny. Principem metody řízené tvorby mikropórů je zavedení nanostrukturních oxidů hliníku do slitiny, které slouží jako krystalizační jádra pro tvorbu plynových bublin. Tyto jemné částice vznikají kvůli tomu, že kapalný hliník je postřikován do proudu vzduchu; následně jsou tvořeny do kompaktních tyčí. Toto činidlo bylo vyvinuto firmou Schäffer a prodáváno pod názvem Probat-Fluss Mikro100 ve tvaru prutů - *Obr. 1: Tyče agentu Mikro100.*



Obr. 1: Tyče agentu Mikro100, zvětšení 5x

Pokud se zachová v tavenině stejné množství vodíku a zvýší se počet vhodných heterogenních zárodků, získá se v takto vzniklé struktuře větší množství bublin, jejichž velikost bude menší. Princip zvýšení krystalizačních zárodků je podobný principu očkování hliníkových slitin. Bude-li slitina obsahovat větší množství zárodků, podaří se využít i více vodíku k tvorbě bublin a konečná změna nebude vykazovat objemový deficit. Z uvedených souvislostí vyplývá, že pokud tavenině dáme k dispozici větší množství heterogenních zárodků, tak již při malém množství vodíku obdržíme v konečné struktuře větší počet malých bublin. Ve struktuře proto eliminujeme nedostatek tekutého kovu dosazovaného do teplotního uzlu během tuhnutí pomocí tvorby bublin, které však nejsou vidět na rentgenu, dokonce nejsou ani patrné po jemném obrobení. Součet objemu bublin eliminuje stahování, ke kterému by během tuhnutí docházelo.

EXPERIMENT

Jako experimentální materiál byla použita sekundární slitina AlSi7Mg0,3 (ve formě 4 kg ingotů). Slitina byla roztavena a následně pomocí technologie gravitačního odlévání se vzorky odlily do předehřáté kovové formy. Teplota tavení byla udržována na $720\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Roztavený kov byl před litím vyčištěn rafinační solí. Tavenina nebyla modifikována. Chemická analýza hliníkové slitiny AlSi7Mg0,3 byla provedena za použití spektrální analýzy na optickém emisním spektrometru. Analýza chemického složení je uvedeno v *Tab. 1: Chemické složení odlitku [hm. %]*.

Dalším krokem v daném experimentu bylo použití přípravku Mikro 100. Proto byla připravena a použita stejná slitina AlSi7Mg0,3 (ve formě 4 kg ingotů), a následně pomocí technologie gravitačního odlévání se vzorky odlily do předehřáté kovové formy (za stejných podmínek).

Tab. 1: Chemické složení odlitku [hm. %]

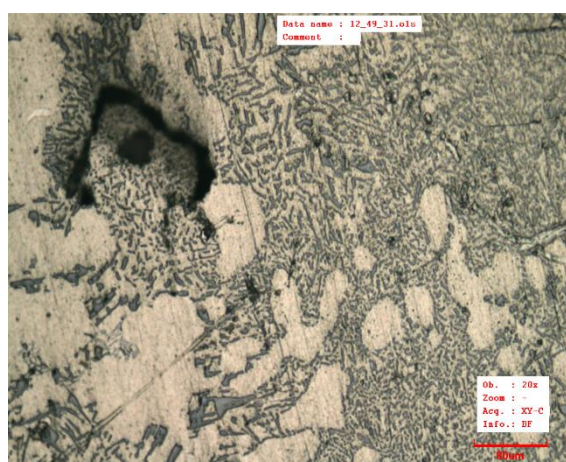
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Pb	Ti	Al
7,32	0,2	0,05	0,1	0,4	-	-	-	-	zbytek

Čtyři reprezentativní vzorky s různou porozitou byly vybrány z jednotlivých odlitků založených na přítomnosti makroporozity. Vzorek označený A1 vykazoval nejvyšší pórovitost, zatímco vzorek A4 byl nejnižší. Metalografické vzorky používané pro kvantitativní měření pórovitosti a vzorky používané pro mechanické testování byly připraveny z vzorků A1 - A4. Pro každý vzorek A1 - A4 bylo provedeno pět měření velikosti pórů. Pórovitost byla měřena v různých oblastech pomocí laserového optického mikroskopu Olympus LEXT OLS 3100 a metod analýzy obrazu (měření plošného podílu ke snímku).

POREZITA

Porezita vzorku A1

Vzorek A1 vykazoval nejvyšší pórovitost materiálu u všech vzorků. V některých oblastech vzorku A1 se objevily větší póry viděné očima. Oblasti s největšími póry jsou uvedeny na Obr. 2: Mikrostruktura s pórovitostí vzorku A1 (pórovitost 3,822% plochy snímku).



Obr. 2: Mikrostruktura s pórovitostí vzorku A1, zvětšení 20x

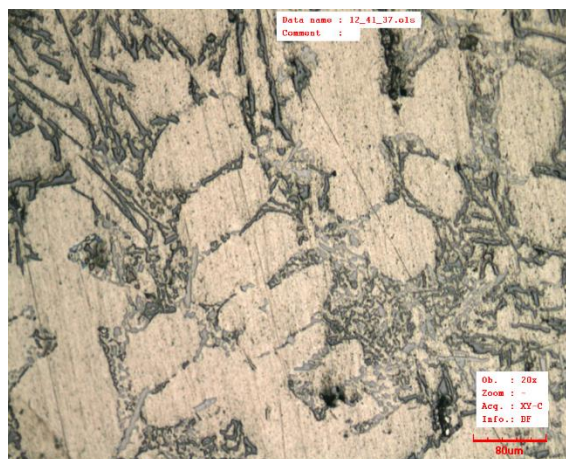
V Tab. 2: Měření pórovitosti vzorku A1 odlitého ze slitiny [hm.%], jsou uvedeny naměřené hodnoty pórovitosti vzorku A1, který byl připraven z nejpórošnější části odlitku slitiny AlSi7Mg0.3 (průměrná hodnota pórovitosti 2,801% plochy snímku).

Tab. 2: Měření pórovitosti vzorku A1 odlitého ze slitiny [hm. %]

Vzorek	Měření	Hodnota [% plochy snímku]	Průměrná hodnota [% plochy obrázku]
A1	1	1.735	2.801
	2	2.104	
	3	3.822	
	4	2.353	
	5	1.192	

Porozita vzorku A2

Mikrostruktura vzorku A2 s měřenou pórovitostí (porozita 1,573% oblasti obrazu) je vidět na *Obr. 3: Mikrostruktura vzorku A2 s zvýrazněnou pórovitostí*. Ve srovnání s mikrostrukturními obrazy vzorku P1, rozdíl ve velikosti a tvaru dendritických buněk a vyloučených intermetalických fází. Velikost dendritických buněk je v desítkách mikrometrů a jejich tvar je prodloužený (ve směru intenzivnějšího přenosu tepla z litiny). Hodnoty měřené pórovitosti vzorku A2 jsou uvedeny v *Tab. 3: Měření pórovitosti vzorku A2 odlitého ze slitiny [hm.%]* (průměrná hodnota pórovitosti je 1,406 % plochy obrazu).



Obr. 3: Mikrostruktura vzorku A2 s zvýrazněnou pórovitostí, zvětšení 20x

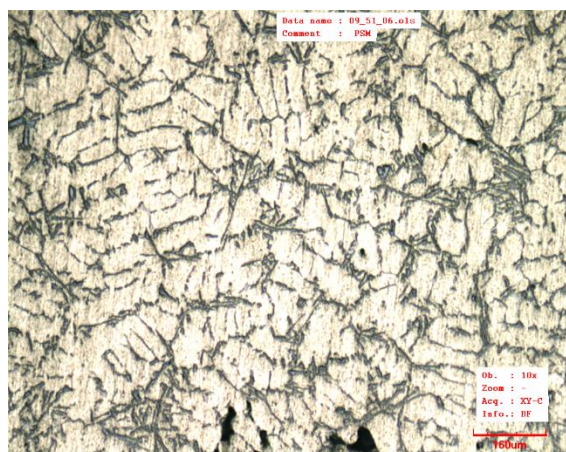
Tab.3: Mikrostruktura vzorku A2 s zvýrazněnou pórovitostí, ukazuje naměřené hodnoty pórovitosti vzorku A2, který byly připraveny z poréznější části odlitku slitiny AlSi7Mg0.3 (průměrná hodnota pórovitosti 1,725% plochy obrazu).

Tab. 3: Měření pórovitosti vzorku A2 odlitého ze slitiny [hm. %]

Vzorek	Měření	Hodnota [% plochy snímku]	Průměrná hodnota [% plochy obrázku]
A1	1	1.653	1.725
	2	1.222	
	3	1.573	
	4	2.331	
	5	1.848	

Porozita vzorku B1

Na *Obr. 4: Mikrostruktura s pórovitostí vzorku B1*, je znázorněna mikrostruktura vzorku a zvýrazněna pórovitost použitou pro analýzu obrazu (pórovitost 1,01% z plochy obrazu). Naměřené hodnoty pórovitosti vzorku P3 jsou uvedeny v *Tab. 4: Měření pórovitosti vzorku A1 odlitého ze slitiny [hm.%]* (průměrná hodnota pórovitosti je 0,712% z plochy obrazu). Pokud jde o vzorek A2, vidíme na mikrostruktuře vzorku B1 zdánlivě orientované dendritické buňky. Primární osa dendritů je výrazně prodloužena podél jedné osy díky intenzivnímu odvodu tepla z odlitku v jednom směru. Velikost dendritických buněk a intermetalických fází je ve srovnání se vzorkem A1 výrazně menší.



Obr. 4: Mikrostruktura s pórovitostí vzorku B1, zvětšení 10x

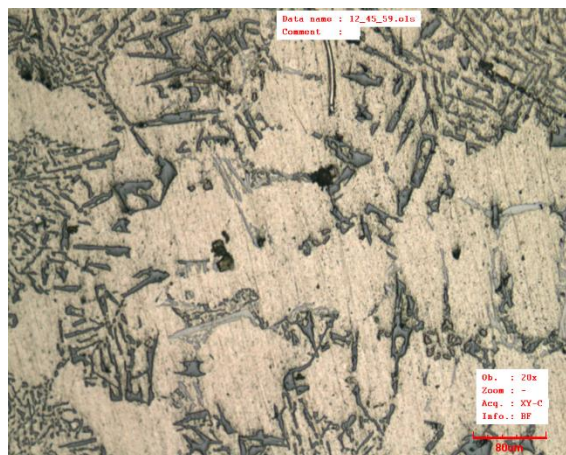
V Tab.4: Měření pórovitosti vzorku B1 odlitého ze slitiny [hm.%], jsou uvedeny naměřené hodnoty pórovitosti vzorku B1, který byl připraven z nejporóznější části odlitku slitiny AlSi7Mg0.3 s přidavkem Mikro100.

Tab. 4: Měření pórovitosti vzorku B1 odlitého ze slitiny [hm. %]

Vzorek	Měření	Hodnota [% plochy snímku]	Průměrná hodnota [% plochy obrázku]
B1	1	0.52	0.712
	2	0.89	
	3	0.79	
	4	0.35	
	5	1.01	

Porozita vzorku B2

Vzorek B2 byl připraven z části s nejmenší viditelnou pórovitostí. Mikroskopická analýza potvrdila, že ze všech měřených vzorků, má vzorek B2 nejmenší naměřená porozita velikost. Hodnoty pórovitosti vzorku B2 jsou uvedeny v Tab. 5: Měření pórovitosti vzorku B2 odlitého ze slitiny [hm.%]. Nejvýznamnější směrové orientace dendritických buněk způsobené intenzivní přenos tepla v jednom směru v této části formuláře je vidět na mikrostruktuře vzorku B2 (viz Obr. 5: Mikrostruktura vzorku B2).



Obr. 5: Mikrostruktura vzorku B2, zvětšení 20x

Tab.5: Měření pórovitosti vzorku B2 odlitého ze slitiny [hm.%] ukazuje naměřené hodnoty pórovitosti vzorku B2, který byl připraven z poréznější části odlitku slitiny AlSi7Mg0.3 (průměrná hodnota pórovitosti 0,422% plochy obrazu).

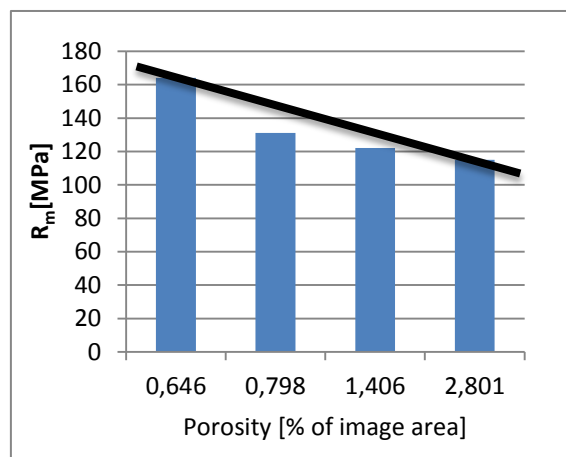
Tab. 5: Měření pórovitosti vzorku B2 odlitého ze slitiny [hm. %]

Vzorek	Měření	Hodnota [% plochy snímku]	Průměrná hodnota [% plochy obrázku]
B2	1	0.32	0.422
	2	0.49	
	3	0.52	
	4	0.37	
	5	0.41	

STATICKÁ ZKOUŠA TAHEM

V druhé části experimentu byly slitiny AlSi7Mg0.3 odlitek a poté testovány vzorky (podle ČSN EN ISO 4287) byly podrobeny statistické zkoušce tahem.

Vztah mezi meze pevností v tahu a pórovitostí je uveden na Obr. 6: *Závislost pevnosti v tahu na poréznosti, slitiny AlSi7Mg0.3*. Osa x zobrazuje hodnoty měřené pórovitosti (pomocí mikroskopické analýzy) z % plochy obrazu. Na svislé ose jsou uvedeny hodnoty meze pevností v tahu. Související porozita a meze pevností odpovídají vzorkům připraveným ze stejné části studovaného odlitku (vzorky A1 - A4). Existuje silná závislost velikosti meze pevnosti v tahu a velikosti pórovitosti na obrázcích. Při zvýšení velikosti poréznosti z 0,646% na 1,4 - 2,8% lze pozorovat pokles meze pevnosti v tahu o 20 - 30%.

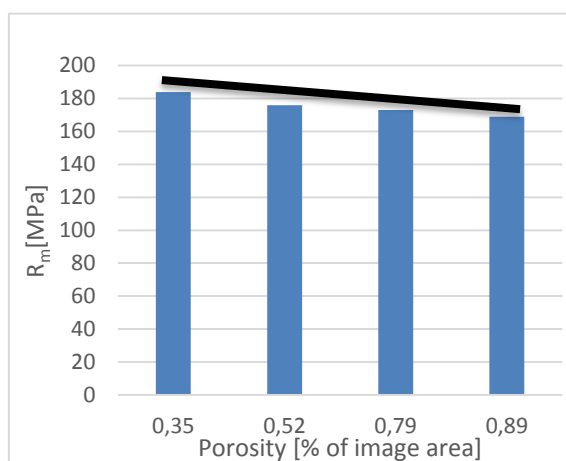


Obr. 6: Závislost pevnosti v tahu na poréznosti, slitiny AlSi7Mg0.3

Tab. 6: Průměrné hodnoty naměřené statickým tahovým testem u vzorků odlitých ze slitiny AlSi7Mg0,3

Vzorek	R _m [MPa]	Ø R _m [MPa]	A [%]	A [%]
1	115	133	2.7	3.8
2	122		3.5	
3	131		4	
4	164		5	

Použití přípravku mikro100 způsobilo snížení porezity v mikrostruktuře slitiny AlSi7Mg0,3. Vztah mezi pevností v tahu a pórovitostí je uveden na *Obr. 7: Závislost pevnosti v tahu na porézności, slitiny AlSi7Mg0,3 s použitím přípravku Mikro100*. Osa x zobrazuje hodnoty měřené pórovitosti (pomocí mikroskopické analýzy) z % plochy obrazu. Na ose y jsou uvedeny hodnoty meze pevností v tahu. Související porozita a meze pevností odpovídají vzorkům připraveným ze stejné části studovaného odlitku (vzorky B1 - B4). Existuje silná závislost mezi meze pevností v tahu a porezitou která je znázorněná na grafech. Při snížení velikosti porézności z 0,89% na 0,35% lze pozorovat zvýšení meze pevnosti v tahu o 40 - 50%.



Obr. 7: Závislost pevnosti v tahu na porézności, slitiny AlSi7Mg0,3 s použitím přípravku Mikro100

Tab. 7: Průměrné hodnoty naměřené statickým tahovým testem u vzorků odlitých ze slitiny AlSi7Mg0,3

Vzorek	R _m [MPa]	Ø R _m [MPa]	A [%]	A [%]
1	173	176	5.3	5.8
2	176		6.8	
3	184		6.1	
4	169		5.1	

ZÁVĚR

Kvantitativní měření pórovitosti bylo provedeno pomocí analýzy obrazu jako procento porozity z celkové plochy obrazu pro vzorky připravené ze slitiny AlSi7Mg0,3. U každého vzorku bylo provedeno pět měření byla prováděna v různých oblastech a byla vypočtena průměrná hodnota. Rozsah měřené pórovitosti je široký, od 1.331 % do 3.822 %. Zkoušky preparátu Probat Fluss Mikro100 prováděného za provozních podmínek gravitačních odlitků slitiny AlSi7Mg0,3 vysílaly, že příprava významně ovlivňuje morfologii vnitřních dutin v odlitcích. Při vysokém stupni naplynění má slitina tendenci vytvářet bubliny nepravidelných tvarů, u nichž lze očekávat velmi nepříznivý vliv na mechanické vlastnosti a plynutěnost odlitků. Při vyšším obsahu vodíku se tyto dutiny mění na kompaktnější typ poměrně velkých plynových pórů. Aplikace přípravku Mikro100 má za následek vznik rozptýlené pórovitosti tvořené velmi malými dutinami namísto velkých místně koncentrovaných pórů. Tato změna morfologie a rozložení pórů, jak byla stanovena v testech, se obvykle projevuje ve zvýšené meze pevnosti v tahu.

Statická zkouška tahem ukázala vztah mezi mezidendritickou pórovitostí ve struktuře materiálu a mechanickými vlastnostmi materiálu. Zvýšení pevnosti v tahu o 40 – 50 % může být viděn pro sníženou pórovitost, velikosti od 0,89 % na 0,35%. Lze dospět k závěru, že vliv pórovitosti na mechanické vlastnosti je bezvýznamné, když pórovitost je pod 0,5 % z celkové plochy. Pórovitost nad 1 % z plochy již výrazně ovlivňuje mechanické vlastnosti materiálu.

LITERATURA

- [1] MICHNA, Š. a kol. *Encyklopedie hliníku*. 1. Vydání, Prešov, SR: Adin s. r. o., 2005.
- [2] BOLIBRUCHOVÁ, D., TILLOVÁ, E. *Zlievarenské zliatiny Al-Si*. Žilina: EDIS – vydavateľstvo ŽU, 2005.
- [3] MONDOLFO L. F. *Aluminium Alloys, Structure and Properties*. Butterworths, London, 1979.
- [4] HREN, I., SVOBODOVA, J., MICHNOVA, L., MICHNA, Š., BENEŠ, L. *Research on the effect of beryllium on the modification and change of mechanical properties of al-si alloys*. Advanced manufacturing and repair technologies in vehicle industry monograph, 2018. 123 – 136 str.
- [5] TILLOVA, E., CHALUPOVA, M., HURTALOVA, L., DURINIKOVA, E. *Quality Control of Microstructure in Recycled Al-Si Cast Alloys*. *Manufacturing Technology*. Vol. 11, No. 11. 2011. 70-76 str.
- [6] NÁPRSTKOVÁ, N., CAIS, J., SVOBODOVÁ, J. *The Effect of Modification by Strontium of the AlSi7Mg0.3 Alloy on the Surface Roughness*. *Manufacturing Technology*, Vol. 13, No. 3. 2013. 380-384 str.
- [7] LIPIŇSKI, T. *Microstructure and Mechanical Properties of the AlSi13Mg1CuNi Alloy with Ecological Modifier*. *Manufacturing Technology*, Vol. 11, No.11. 2011. 40-44 str.
- [8] HREN, I., MICHNA, Š., CAIS, J., LYSONKOVÁ, I., HODINAŘ, L.: *Výzkum vlivu beryllia na modifikaci a změnu mechanických vlastností u slitiny AlSi7Mg0,3*. *Strojírenská Technologie*. XXIII, Č. 1. 2018. 12-17 str.
- [9] HONZÁTKO, R., MICHNA, Š., CAIS, J. *The Influence of Porosity on Mechanical Properties of Casts Produced from Al-Si Alloys*. *Manufacturing Technology*. Vol.13, No 3. 2013. 319-324 str.
- [10] MICHNA, Š., LUKÁČ, I. *Praktická fraktografie*. Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, OPTYS, spol. s r. o. 2012. 237 s.

PODĚKOVÁNÍ

Tento příspěvek vznikl v rámci podpory projektu SGS 48207 15 2022-48 01 na UJEP.

**Dynamicky rostoucí a úspěšná firma v oblasti
spektrometrie, Váš silný partner v analytické technice.**

BAS Rudice působí na trhu ČR a SR již od roku 1990. Dodává spektrometry a analyzátory s vysokou kvalitou, rychlým odborným servisem a příznivými cenami. Výsledkem dlouhodobého profesionálního přístupu k zákazníkům a výborných parametrů dodávaných přístrojů je řada instalací v ČR a SR, která již nyní dosáhla 1300 instalací. V posledních letech realizuje ročně firma BAS Rudice pravidelně více jak 100 dodávek spektrometrů dle ISO 9001:2016.



Důvody ke koupi spektrometru od firmy BAS Rudice:

- Technické parametry, kvalita a přesnost spektrometru.
- Příznivá pořizovací cena a nízké provozní náklady.
- Výhodný splátkový prodej bez navýšení.
- Profesionální, zkušený, rychlý a spolehlivý servis.
- Technická vyspělost a výborná pověst distributora spektrometrů.
- Renomovaná světová značka výrobce spektrometru.
- Výborné reference i u největších firem.



Q4 TASMAN

Stolní jiskrový spektrometr pro širokou škálu aplikací, včetně ocelí, šedé a tvárné litiny, slitin Al, slitin Cu, slévárny, ocelárny, hutě. **Špičkové přesnosti a stabilita.** Včetně analýzy dusíku.



Q2 ION

Nový stolní spektrometr pro Fe, Al, Cu matrice. Vhodný pro menší slévárny, strojírenské podniky a kontrolu výroby. Široké analytické možnosti, nízké provozní náklady.



VANTA NOVINKA

Zcela nový ruční spektrometr pro přesné analýzy za všech okolností. Odolnost IP 64, přístroj testován na pád dle armádní specifikace MIL 810G. Vynikající výkonnost.



BELEC COMPACT PORT

Kvalitní mobilní jiskrový spektrometr nové generace s výbornou přesností analýz včetně uhlíku. Odolné průmyslové provedení a moderní design.



ICP-OES PRODIGY 7

Laboratorní ICP-OES spektrometry pro analýzy kapalných vzorků (odpadové hospodářství, analýza mezproduktů, ferorud, speciálních materiálů). CMOS detektor.



GB GALILEO O/N/H

Přesné stanovení kyslíku, dusíku a vodíků v rozmanitých typech materiálů včetně ocelí, mědi, hliníku a dalších typech. Výborná citlivost a správnost měření.



G4 ICARUS C/S

Elementární analyzátor uhlík/síra pro přesné stanovení prvků ze vzorků (úloмки, špony, dř, dráty,...) a to nehlédě na jejich metalografickou strukturu.



GENIUS IF

Stolní rentgenfluorescenční spektrometr (ED-XRF) se sekundárními terčiky a výkonným SDD detektorem s vysokou citlivostí. Výkon 50W při 50kV.

Analýza kvality slitin pro tlakové lití

Vítková, J.¹⁾, Bryksí, V.¹⁾

¹⁾ Kovolís Hedvíkov a.s., Hedvíkov 1, P.O. Box 31, 538 43 Třemošnice,
j.vitkova@kovolís-hedvíkov.cz; v.bryksi@kovolís-hedvíkov.cz

Klíčová slova

Slitiny pro tlakové lití; Ingoty pro přetavení; Metalografie; AlSi10Mg(Fe); AlSi9Cu3(Fe)

Abstrakt

Text pojednává o probíhající práci na stanovení kritérií pro hodnocení vstupního materiálu pro tlakové lití na základě mikrostruktury dodaných ingotů.

ÚVOD

Vstupní kontrola nakupovaných slitin v Kovolíse Hedvíkov se v současné době omezuje pouze na kontrolu chemického složení. Dlouhodobým cílem je stanovit kritéria pro hodnocení vstupního materiálu také s ohledem na mikrostrukturu.

Slitiny jsou nakupovány od více dodavatelů, variabilita mezi dodávkami od jednotlivých dodavatelů, i mezi tavbami od jednoho dodavatele ovlivňuje následnou stabilitu procesu a výslednou kvalitu odlitků.

Stanovení kritéria pro hodnocení struktury vstupního materiálu by mělo pomoci zajistit stabilitu dodávek a následně tedy i procesu.

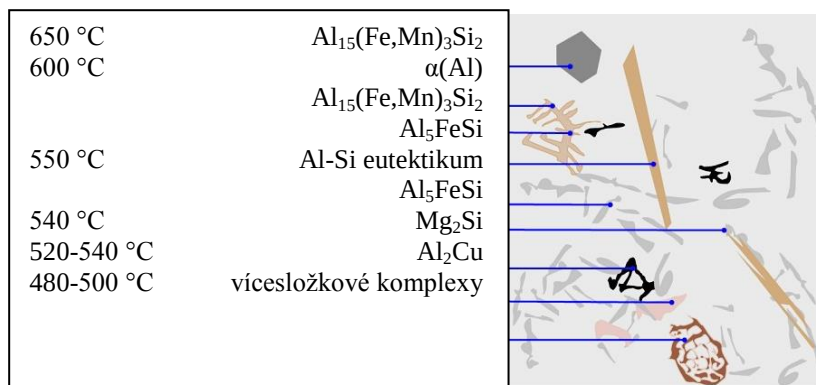
Pro sledování mikrostruktury byly vybrány slitiny EN AB-AlSi10Mg(Fe) a EN AB-AlSi9Cu3(Fe) dle normy EN 1676. Slitina AlSi9Cu3(Fe) byla analyzována v rámci diplomové práce [1]. Chemické složení obou slitin ve zúženém rozpětí používaném v Kovolíse Hedvíkov je uvedeno v Tab. 4.

Tab. 4: Chemické složení ingotů EN AB-AlSi10Mg(Fe) a EN AB-AlSi9Cu3(Fe) – zúžené rozpětí pro Kovolís Hedvíkov

Slitina	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	Jiné prvky		Al
												Každý	Celkem	
AlSi10Mg(Fe)	9,0- 11,0	0,60- 0,90	≤ 0,05	0,30- 0,55	0,25- 0,50	-	≤ 0,15	≤ 0,15	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,15	≤ 0,05	≤ 0,15	Zbytek
AlSi9Cu3(Fe)	9,6- 10,6	0,70- 1,00	2,50- 3,50	0,30- 0,50	0,25- 0,35	≤ 0,05	≤ 0,50	≤ 1,0	≤ 0,15	≤ 0,15	≤ 0,20	≤ 0,05	≤ 0,25	Zbytek

MIKROSTRUKTURA

Mikrostruktura ingotů byla pozorována pod stereomikroskopem při zvětšení 63x. V mikrostruktuře byly patrné dendrity $\alpha(\text{Al})$ a eutektikum Al-Si, typické pro siluminy. Mikrostruktura byla tvořena dále intermetalickými fázemi, obsahovala bubliny a staženiny či kombinovanou porezitu a ve velmi malé míře exogenní vměstky. Z intermetalických fází byly v mikrostruktuře patrné převážně fáze Al-Fe-Si (morfologie – jehlice Al_5FeSi), Al-Fe-Mn-Si (morfologie – čínské písmo $\text{Al}_{15}(\text{Fe,Mn})_3\text{Si}_2$ a hvězdice – téměř totožné chemické složení jako čínské písmo, tvoří se pravděpodobně při vyšší teplotě – Obr. 23).



Obr. 23: Tvorba fází během tuhnutí podeutektické slitiny AlSiCuFe [2]

Při vyhodnocení bylo počítáno množství primárních částic Si a intermetalických fází. Množství intermetalických fází Mg_2Si nebylo počítáno, protože z výbrusu nebylo možné tyto fáze jednoznačně určit. V případě fází Al-Fe-Mn-Si v morfologii hvězdic byl ještě měřen průměr kružnice, do které se vešla celá intermetalická fáze. U vzorků slitiny AlSi10Mg(Fe) byla také měřena oblast, kterou zaujímá porezita na ploše výbrusu.

Jelikož vzorky nebyly zcela stejné velikosti, množství částic a fází a plocha částic, a porezity byly pro lepší porovnání vztaheny na jednotku plochy.

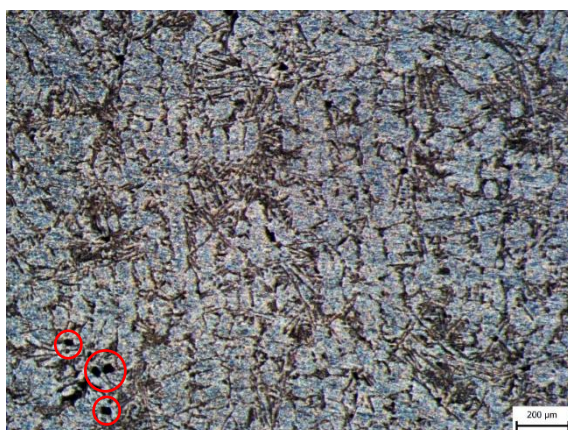
Příprava vzorků

Z každé dodavatelem dodané tavby byl náhodně vybrán jeden ingot. Z tohoto ingotu byl ze střední části vyříznut vzorek. Vzorek byl broušen na ruční kotoučové brusce brusnými papíry o zrnitosti P80 až P2500. Po broušení byl vzorek leptán 10% roztokem NaOH po dobu 2 minut.

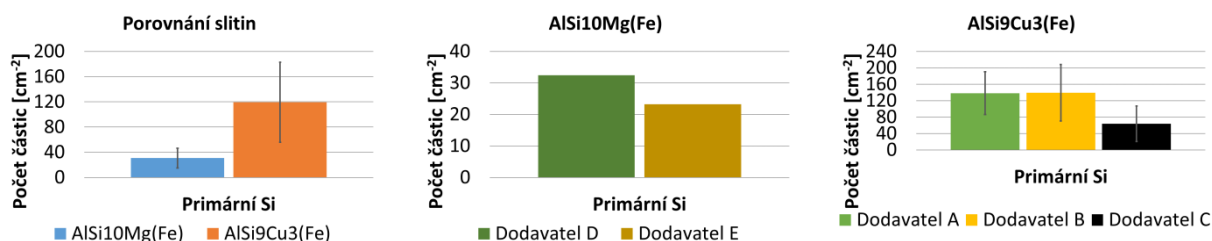
Mikrostruktura vzorků byla sledována pomocí optického stereomikroskopu Olympus SZX10. Pro vyhodnocení plochy porezity, velikosti fází Al-Fe-Mn-Si a částic primárního křemíku byl použit počítačový program QuickPHOTO INDUSTRIAL 3.1.

Primární částice křemíku

I přesto, že slitina AlSi10Mg(Fe) je podeutektická, vyskytovaly se v mikrostruktuře zkoumaných vzorků primární částice křemíku. Při porovnání se slitinou AlSi9Cu3 bylo množství primárních částic křemíku ve slitině AlSi10Mg(Fe) výrazně nižší (viz Obr. 25 vlevo). V ingotech od různých dodavatelů slitiny AlSi10Mg(Fe) se počet primárních částic křemíku lišil. Ingoty od dodavatelů A a B slitiny AlSi9Cu3(Fe) obsahovaly podobné množství primárních částic křemíku, zatímco v ingotech od dodavatele C jich bylo o poznání méně.



Obr. 24: Částice primárního křemíku, zvětšení 63x



Obr. 25: Počet částic primárního křemíku – vlevo porovnání mezi slitinami, uprostřed porovnání dodavatelů slitiny AlSi10Mg(Fe), vpravo porovnání dodavatelů slitiny AlSi9Cu3(Fe)

Částice primárního křemíku jsou ve slitině nežádoucí, dle analýz mikrostruktur prováděných přímo na odlitcích se vyskytují i zde.

Intermetalické fáze

Jak již bylo zmíněno výše, v mikrostruktuře slitiny AlSi10Mg(Fe) se vyskytovaly intermetalické fáze typu Al-Fe-Mn-Si, Al-Fe-Si a Mg-Si.

Intermetalické fáze Al-Fe-Mn-Si

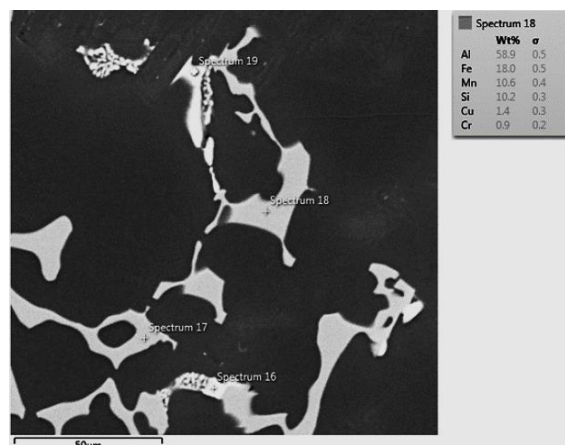
V mikrostruktuře byla zaznamenána fáze Al-Fe-Mn-Si ve dvou morfologiích, které se od sebe chemickým složením téměř nelišily.

Intermetalická fáze v morfologii „čínské písmo“ (Obr. 26) byla v mikrostruktuře slitiny AlSi10Mg(Fe) ve středově souměrné podobě. Její chemické složení bylo potvrzeno pomocí EDS analýzy (Obr. 27).

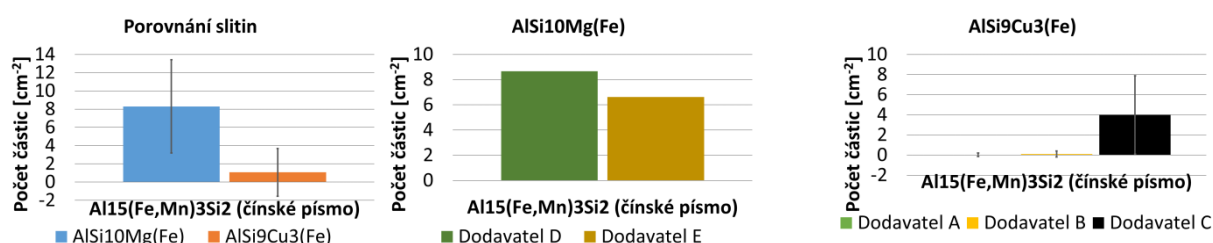
Tyto intermetalické fáze se poměrně v hojném počtu vyskytovaly ve slitině AlSi10Mg(Fe), avšak ve slitině AlSi9Cu3(Fe) bylo jejich větší množství pozorováno pouze v ingotech od dodavatele C (viz Obr. 28).



Obr. 26: Intermetalická fáze $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$ (čínské písmo; rybí kost), zvětšení 63x

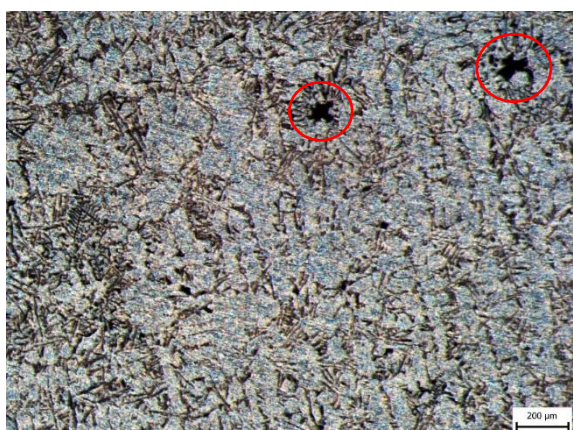


Obr. 27: EDS analýza intermetalické fáze $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$ [1]

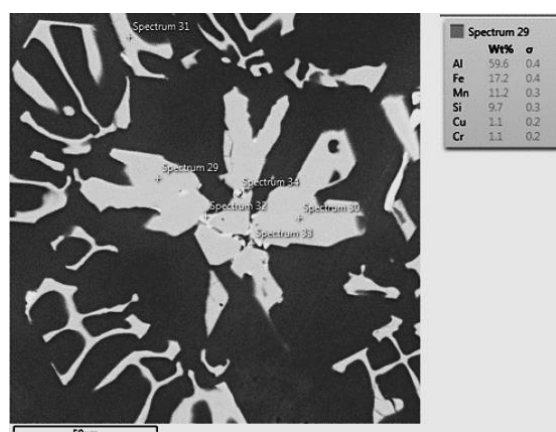


Obr. 28: Počet fází $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$ – vlevo porovnání mezi slitinami, uprostřed porovnání dodavatelů slitiny AlSi10Mg(Fe), vpravo porovnání dodavatelů slitiny AlSi9Cu3(Fe)

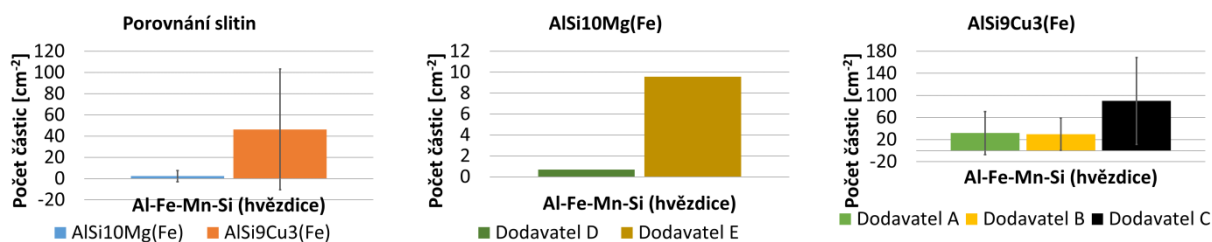
Intermetalické fáze v morfologii „hvězdic“ (Obr. 29) byly u slitiny AlSi10Mg(Fe) pouze v některých vzorcích. U slitiny AlSi9Cu3 byly přítomny ve značné části její mikrostruktury. EDS analýzou (Obr. 30) bylo zjištěno téměř totožné chemické složení jako u fází v morfologii „čínské písmo“. Příčinou vzniku dané morfologie by mohla být teplota, při které fáze vzniká (Obr.1).



Obr. 29: Intermetalická fáze Al-Fe-Mn-Si (hvězdice), zvětšení 63x



Obr. 30: EDS analýza intermetalické fáze Al-Fe-Mn-Si (hvězdice) [1]

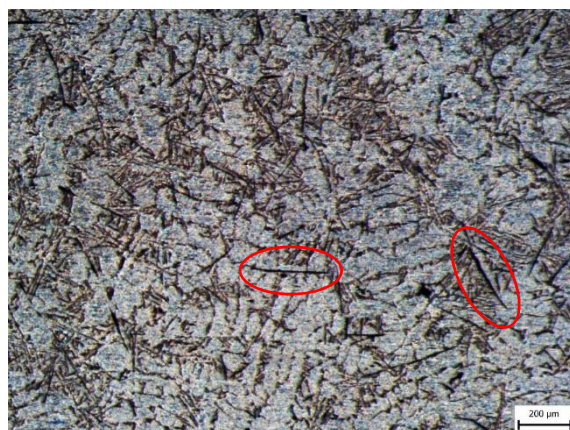


Obr. 31: Počet fází Al-Fe-Mn-Si (hvězdice) – vlevo porovnání mezi slitinami, uprostřed porovnání dodavatelů slitiny AlSi10Mg(Fe), vpravo porovnání dodavatelů slitiny AlSi9Cu3(Fe)

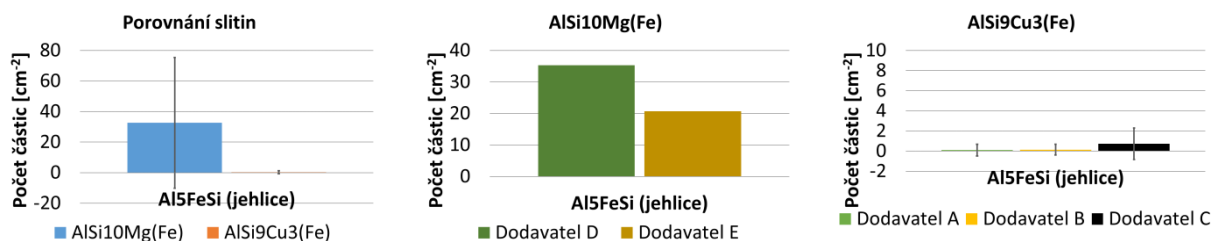
Největší množství fází ve tvaru hvězdic bylo pozorováno u slitiny AlSi9Cu3(Fe) v ingotech od dodavatele C (viz Obr. 31).

Intermetalická fáze Al-Fe-Si

Množství fází Al₅FeSi (Obr. 32) ve slitině AlSi10Mg(Fe) se vzorek od vzorku výrazně lišilo. Obecně jich bylo v mikrostruktuře ingotů více než fází Al-Fe-Mn-Si. V tomto se slitina AlSi10Mg(Fe) odlišovala od slitiny AlSi9Cu3(Fe), kde byly fáze Al₅FeSi pouze v několika vzorcích a v malém množství. Na Obr. 33 vpravo je vidět, že množství fází Al₅FeSi bylo jen kolem 1 částice/cm².



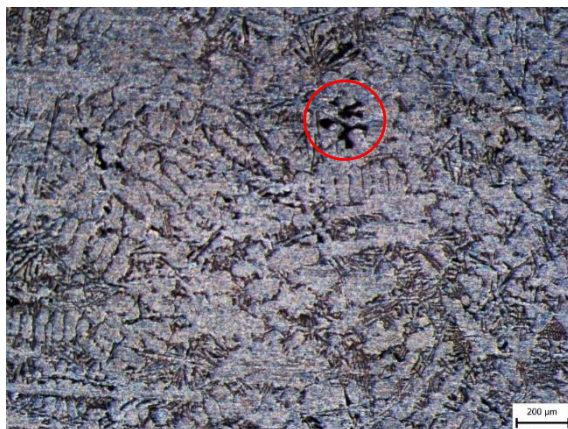
Obr. 32: Intermetalická fáze Al₅FeSi (jehlice), zvětšení 63x



Obr. 33: Počet fází Al₅FeSi – vlevo porovnání mezi slitinami, uprostřed porovnání dodavatelů slitiny AlSi10Mg(Fe), vpravo porovnání dodavatelů slitiny AlSi9Cu3(Fe)

Intermetalická fáze Mg-Si

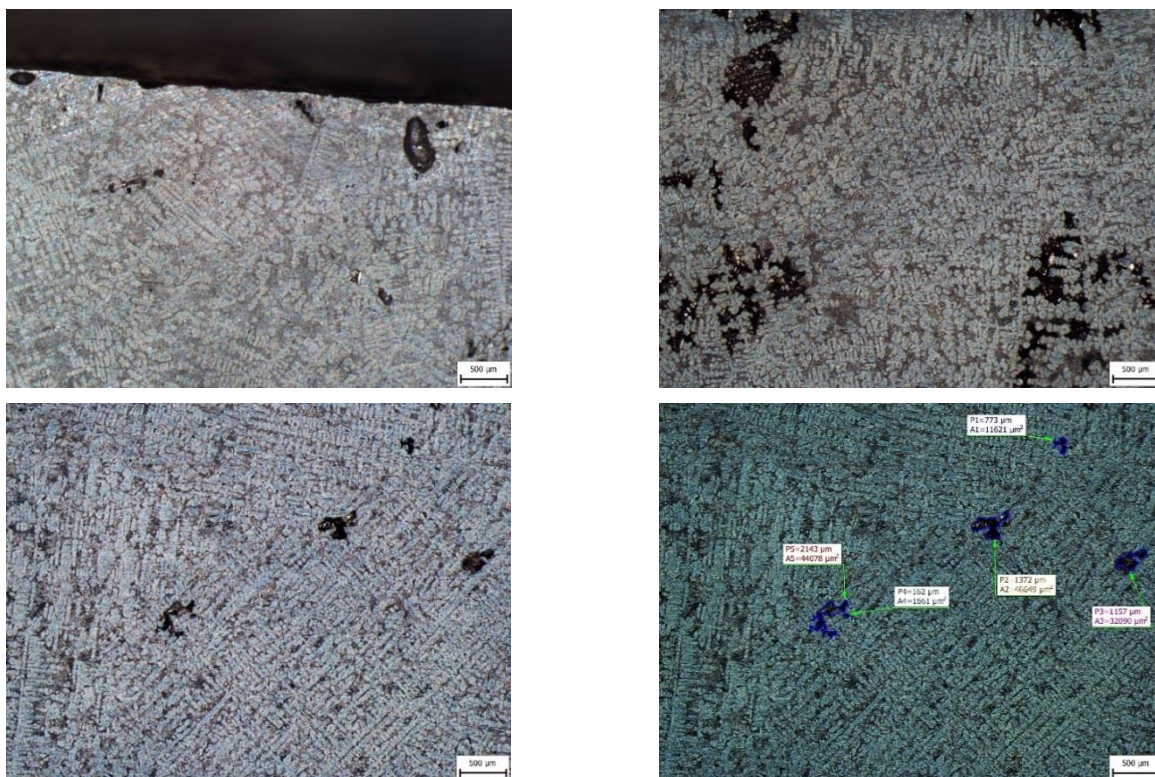
Hořčík ve slitině AlSi10Mg(Fe) tvořil intermetalickou fázi s křemíkem – Mg_2Si (Obr. 34).



Obr. 34: Intermetalická fáze Mg_2Si , zvětšení 63x

Bubliny a staženiny

Na kvalitu taveniny nemá množství bublin a staženin přímo vliv, po přetavení se provádí rafinace a odplynění. Orientačně byl měřen obsah bublin a staženin v ploše výbrusu vzorků z ingotů. Bubliny byly nejvíce přítomny v blízkosti povrchu ingotu. Staženiny obvykle byly také v blízkosti povrchu ingotu, ale objevovaly se také blízko středu. Byla zaznamenána značná variabilita výskytu porezity i mezi jednotlivými dodávkami od jednoho dodavatele.



Obr. 35: Bubliny (levý horní snímek), mikrostaženiny a příklad měření plochy (pravý dolní snímek)

ZÁVĚR

Z vyhodnocení provedených analýz lze pozorovat značné rozdíly mezi jednotlivými dodávkami slitiny AlSi9Cu3(Fe) především obsahu fází Al-Fe-Mn-Si, u slitiny AlSi10Mg(Fe) především v obsahu fází Al-Fe-Mn-Si v morfologii hvězdic. Mezi jednotlivými dodavateli slitin byl rozdíl především v obsahu fází Al-Fe-Mn-Si. Mezi slitinami byl rozdíl především v obsahu fází Al₅FeSi.

Pro stanovení kritéria obsahu primárního křemíku a intermetalických fází bude třeba provést více analýz dalších dodaných taveb a tyto postavit proti analýzám struktury odlitků a výsledkům kvality těchto odlitků.

LITERATURA

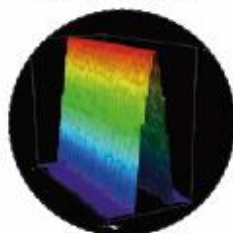
- [1] Zvárová, M. Analýza kvality vstupního materiálu. diplomová práce, České vysoké učení technické v Praze, 2018.
- [2] Iron needles. Foundry Lexicon. [online]. [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <https://www.giessereilexikon.com/en/foundry-lexicon/Encyclopedia/show/iron-needles-4566>

Konfokální mikroskop Olympus LEXT OLS5000

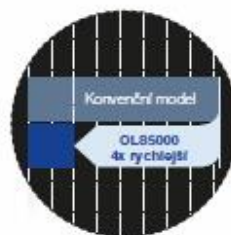
Nová dimenze metrologie povrchu

Technologie skenování 4K

Zobrazení strmých ploch
se sklonem až 87,5°



OLS5000



**Algoritmus PEAK
pro vyhledávání vrcholů**
Rychlé a přesné měření
od malých po velká zvětšení

Funkce Smart Scan

Získávání přesných dat
po jednom kliknutí



Prodloužený rám

Umožňuje uchycení vzorků
o výšce až 210 mm

Zachycení tvaru jakéhokoli povrchu

Jednotná měření
v celém zorném poli díky
speciálním objektivům
LEXT

Automatické získávání
spolehlivých dat
pomocí funkce chytrého
vyhodnocení Smart Judge

Rychlé získání spolehlivých dat

Úspora času během
krokového měření tvarů
díky funkci Skip Scan

Intuitivní ovládání

Vytváření komplexních
přehledů pro snadné
provádění analýz

Omezení rozptylu výsledků
opakovaných měření díky
šablonám pro analýzy

Měření obtížných vzorků

Měření prvků s rozdíly
v hloubce povrchu až
25 mm díky objektivům
s ultra dlouhou pracovní
vzdáleností

Scientific Solutions Division

OLYMPUS CZECH GROUP, S.R.O., ČLEN KONCERNU

Evropská 176/16, 160 41 Praha 6 | Tel.: +420 221 985 211 | mlkroskopy@olympus.cz | www.olympus.cz

Porovnání kvality odlitků pístů od různých výrobců

Bryksí Stunová, B.¹⁾, Henzl, D.²⁾

¹⁾ ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie – Skupina slévání, Technická 4, 166 07 Praha 6, barbora.stunova@fs.cvut.cz

²⁾ ALMET, a.s., Ležáky 668, 501 25 Hradec Králové, david.henzl@almet.cz

Klíčová slova

Odlitky; Písty; Struktura; Nosiče pístních kroužků; Elox

Abstrakt

The pressure to reduce production costs penetrates the entire industry, including foundry processes. Even with castings for top applications such as air pistons, manufacturers are pushed by customers to minimize costs, even though demanding castings deserve care at all stages of production, and any negligence means loss to manufacturers in the form of inconsistent pieces, or even fatal consequences in operation of the casting. The article deals with quality analysis of three pistons, one of which was manufactured in the Czech Republic at ALMET, a.s. by classical piston-foundry techniques, a second piston with the same design, and a third with a slightly different construction were made in China. The structure of the pistons, the structure of the inserted piston rings and the quality of transition layer were compared. Also the hardness of the pistons and piston rings as well as the quality of the elox layer were compared. The aim of the experiment was to warrant the costs incurred in producing the pistons and to demonstrate that withdrawal from the proven and proven techniques can result in a deterioration in the resulting piston quality.

ÚVOD

Tlak na snižování výrobních nákladů prostupuje celým průmyslovým odvětvím, slévárenské procesy nevyjímaje. I u odlitků pro špičkové aplikace, jako jsou písty, jsou výrobci zákazníky tlačeni k minimalizaci nákladů i přesto, že takto náročné odlitky zasluhují péči ve všech etapách výroby a jakékoliv zanedbání znamená ztrátu pro výrobce v podobě neshodných kusů, případně až fatální důsledky v provozu odlitku. Článek se zabývá analýzou kvality tří pístů o průměru 110 mm, kde jeden (s označením 1A) byl vyroben v ČR ve společnosti ALMET, a.s. klasickými pístařskými technikami, druhý píst se shodnou konstrukcí (s označením 2Č) a třetí s mírně odlišnou konstrukcí (s označením 3Č) byly vyrobeny v Číně. Byly sledovány a porovnány struktury pístů, struktury zalitých nerezistových nosičů a kvalita jejich zalití, dále byla porovnávána tvrdost pístů i nosičů a také kvalita eloxové vrstvy. Cílem experimentu bylo obhájit náklady vynaložené na výrobu pístu a prokázat, že ustoupení od zaběhnutých a lety prověřených technik může mít za následek zhoršení výsledné kvality pístu.

POSTUP VÝROBY DANÉHO TYPU PÍSTU VE SPOLEČNOSTI ALMET, A.S.

Tavení vstupního materiálu (slitiny AlSi12CuNiMg dle ČSN 42 4336) a eventuální dolegování probíhá v plynových pecích. Pro zjemnění primárního křemíku je tavenina očkována

fosforem. Následuje odplynění a rafinace rotačním plynovým zařízením za použití kombinace dusíku s chlórem a s rafinační solí. Po distribuci do udržovacích pecí je tavenina znovu odplyněna mobilním odplyňovacím zařízením za použití dusíku a rafinačního prostředku k odstranění vměstků. Písty jsou odlévány technologií sklopného gravitačního lití do kovových forem na plně robotizovaném licím stroji a mechanizovaných licích strojích. Zcela zásadní vliv na výslednou kvalitu odlitku má vhodné řízení teplotního pole formy, tzn. její přehřev a chlazení a nástřik jednotlivých částí dutin kovových forem separačními postřiky. Do odlitku je zaléván nerezistový nosič prvního pístního kroužku opatřený alfinací vrstvou. Do vtokové soustavy jsou vkládána sítky z důvodu hrubé filtrace a usměrnění proudění. Po vyjmutí z kokily je odlitek zamáčen do vodní lázně. Odlitky jsou následně podrobeny tepelnému zpracování T5. [1]

POROVNÁNÍ CHEMICKÉHO SLOŽENÍ PÍSTŮ

Píst vyrobený ve společnosti ALMET, a.s. je ze slitiny AlSi12CuNiMg dle ČSN 42 4336. Její směrné chemické složení je pro porovnání uvedeno v tab. 1. U všech pístů bylo měřeno chemické složení na stolním jiskrovém spektrometru Q4 Tasman. Chemické složení bylo analyzováno vždy dvěma způsoby, a to v nastavení Al global (3 jiskry) a v nastavení Al-Si (tři jiskry). Výsledné hodnoty v tab. 1 jsou aritmetickým průměrem průměrných hodnot z obou způsobů měření.

Tab. 1: Chemické složení analyzovaných pístů

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti
1A	11,18	0,469	1,012	0,148	0,922	0,022	0,981	0,103	0,0091	0,0051	0,061
2Č	14,01	0,586	1,256	0,092	0,914	0,0047	0,865	0,034	<0,003	<0,002	0,084
3Č	13,96	0,883	1,264	0,094	1,230	0,0089	0,904	0,043	0,0041	0,019	0,081
ČSN 424336	11-13	0,6	0,8-1,5	0,3	0,8-1,3		0,8-1,3	0,15			0,2

Chemické složení vzorku 1A odpovídá normě ČSN 42 4336. Oproti tomu oba vzorky s označením „Č“ mají vyšší obsah křemíku, a to i nad množství udané normou ČSN 42 4336. Oba vzorky s označením „Č“ mají také vyšší obsah železa, vzorek 3Č nad limitní hodnotu z normy (0,6 %). Naproti tomu mají vzorky s označením „Č“ nižší obsah manganu a zinku, než vzorek „A“. Složení vzorků s označením „Č“ neodpovídá žádné běžně používané slitině.

METALOGRAFICKÁ ANALÝZA

Z pístů byly odebrány vzorky pro metalografickou analýzu (viz obr. 1). Ta měla tři cíle: porovnat struktury pístů v masivní části u dna, porovnat struktury zalitých nerezistových nosičů a porovnat kvalitu zalití nerezistového nosiče. Struktury byly sledovány na světelném mikroskopu Zeiss Axio Observer D1m. Byly pořízeny fotografie charakteristické struktury ve zvětšení 25x, 100x, 200x a specifické jevy ve zvětšení 500x.



Obr. 1: Vzorky pro metalografii - místa odběru



Obr. 7: Vzorky po měření tvrdosti –místa měření

Na obr. 2 a 3 můžeme sledovat, že struktura pístu 1A odpovídá dané slitině lité za daných podmínek daným způsobem. Oproti tomu struktury pístů 2Č a 3Č vykazují větší podíl primárních zrn křemíku, která mají také větší velikost. Dalším rozdílem je menší podíl intermetalických fází hořčíku (černé kostrovité útvary) oproti struktuře pístu 1A.



1A

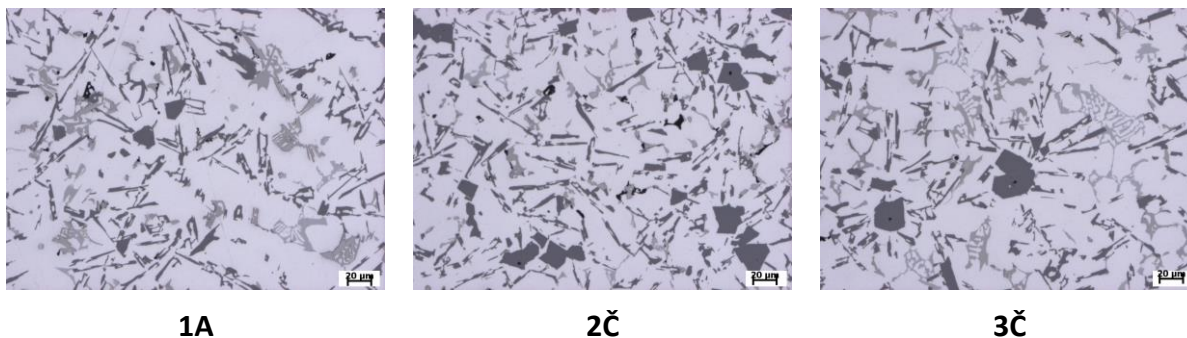


2Č



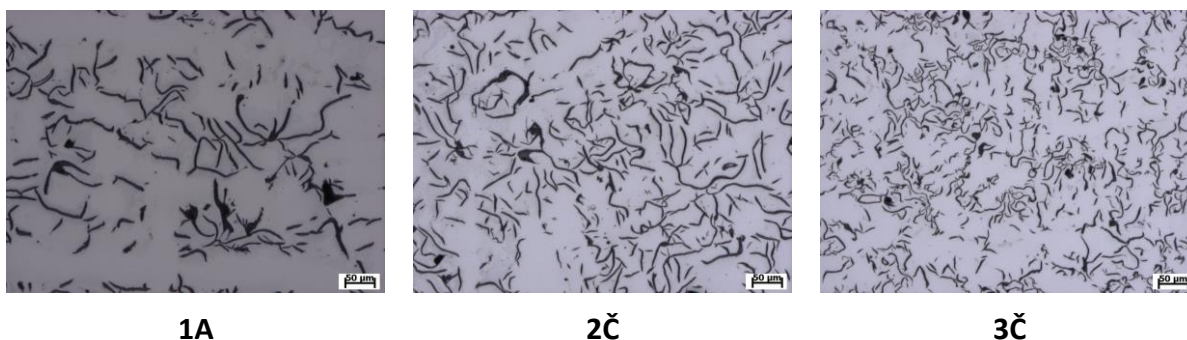
3Č

Obr. 2: Porovnání struktur pístů v původním zvětšení 25x



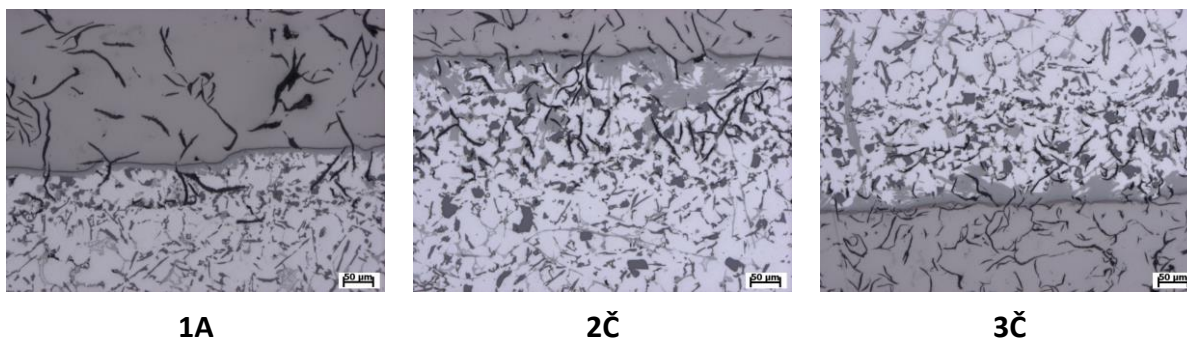
Obr. 3: Porovnání struktur píšťů v původním zvětšení 200x

Struktury nosičů jsou ve všech případech velice podobné a odpovídají přejímacím podmínkám společnosti ALMET, a.s. (viz obr. 4). Ve strukturách se nevyskytují nežádoucí fáze a velikost grafitových útvarů je odpovídající, u vzorků s označením „Č“ jsou grafitové útvary menší než u vzorku 1A, nejmenější je struktura vzorku 3Č.

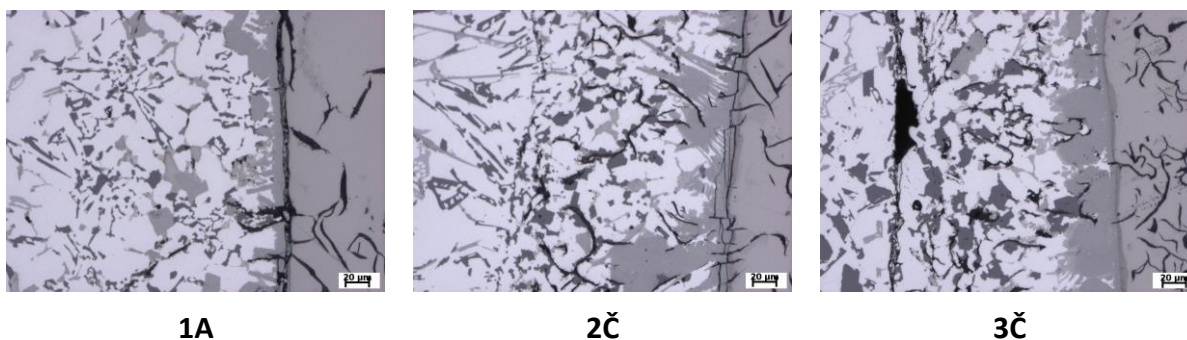


Obr. 4: Porovnání struktur nerezistových nosičů v původním zvětšení 100x

Rozdíly jsou v přechodové oblasti mezi nosičem a píštěm – viz obr. 5 a 6. U vzorku 1A je patrná spojitá difúzní vrstva, ze které přechází hrubozrnné fáze bohaté na železo a částice grafitu do píště a tvoří přechodovou vrstvu. Celkově je u českého píště zalití nosiče dobré. Oproti tomu u píšťů s označením „Č“ není difúzní vrstva spojitá, je tvořena ostrými jehlicemi fází bohatých na železo a prostup částic grafitu je také výraznější, přechodová oblast je výrazně širší a místy je zakončena studeným spojem, neznádka provázeným dutinou.



Obr. 5: Porovnání přechodové oblasti mezi odlitkem píště a zalitým nerezistovým nosičem, původní zvětšení 100x



Obr. 6: Porovnání přechodové oblasti mezi odlitkem pístu a zalitým nerezistovým nosičem, původní zvětšení 200x

POROVNÁNÍ TVRDOSTI

Dále byla jak na pístech, tak na nosičích měřena tvrdost dle Brinella na stroji EMKOTEST M4C 075/750 s tvrdokovovou kuličkou o průměru 2,5 mm při zatížení 62,5 kN. Tvrdost byla měřena rovnoměrně v celé ploše řezu pístem, u nosičů z obou stran řezu – viz obr. 7. Naměřené hodnoty viz tab. 2 a 3.

Tab. 2: Naměřené hodnoty tvrdosti HBW 2,5/62500/30 pístů

	HBW							Ø
1A	98,3	98,8	97,6	97,0	97,9	97,8	97,5	98
2Č	118	111	115	117	117	115	125	117
3Č	115	117	112	106	114	110	113	112

Tab. 3: Naměřené hodnoty tvrdosti HBW 2,5/62500/30 nerezistových nosičů

	HBW							Ø
1A	125	124	124	125	125	125	128	125
2Č	127	133	127	124	125	127	125	127
3Č	111	112	116	111	118	115	111	113

Tvrdost pístů s označením „Č“ je vyšší (117 a 112 HBW), než tvrdost pístu 1A (98 HBW). I tvrdost pístu 1A ale vyhovuje požadavkům, které jsou 90 – 125 HB.

Tvrdost nosičů je u vzorků 1A a 2Č srovnatelná (125 a 127 HBW), vzorek 3Č má tvrdost nižší (113 HBW) a již nevyhovuje požadavkům (120 – 160 HB).

POROVNÁNÍ KVALITY ELOXOVÉ VRSTVY

Z částí pístů, na kterých byla nanесena tmavá povrchová vrstva eloxováním, byly připraveny metalografické výbrusy v řezu kolmém na vrstvu. Vrstvy byly měřeny a sledovány na světelném mikroskopu Zeiss Axio Observer D1m. Byly pořízeny fotografie vrstev s naměřenými tloušťkami. Dále byla ve směru kolmém na vrstvu měřena tvrdost dle Vickerse HV 0,05. Naměřené hodnoty viz tab. 4 a 5.

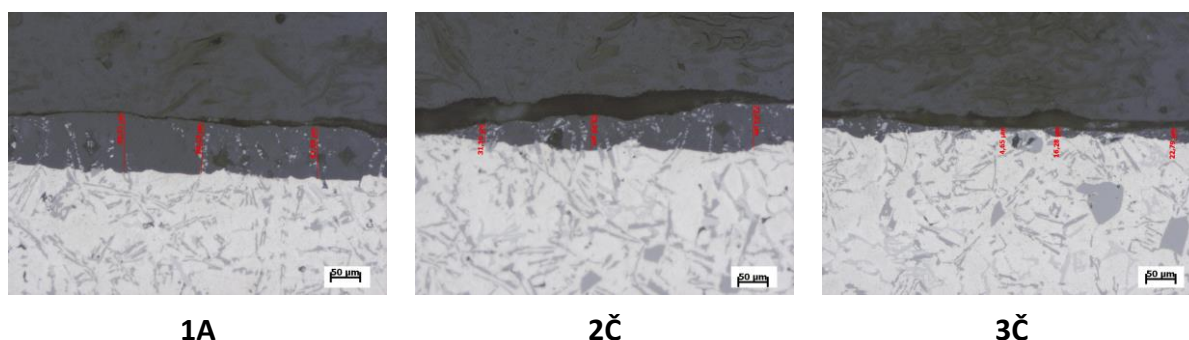
Tab. 4: Tloušťky eloxových vrstev v μm

	1A	2Č	3Č
1	82	31	84
2	87	60	29
3	68	73	15
4	100	31	5
5	86	53	16
6	88	40	23
7	83	28	25
8	72	91	55
9	54	36	67
Ø	80	49	35

Tab. 5: Měření tvrdosti HV 0,05 eloxových vrstev

	1A	2Č	3Č
1	276,9	338,5	67,8
2	250,2	184,8	98,4
3	256,8	80,7	110,6
4	218,5	64,5	38,1
5	441,0	68,8	83,1
6	385,9	100,0	93,1
7	328,5	104,4	144,3
8	234,1	76,3	111,0
Ø	299	127	93
σ	74,1	87,5	29,6

U obou vzorků s označením „Č“ (viz obr. 8) je vrstva velmi nekompaktní s velmi proměnlivou tloušťkou, někde vrstva zcela chybí a při mechanickém namáhání (vpich indentoru nebo řezání) se rozpadá. Zároveň je ve všech případech vrstva nehomogenní, jsou v ní přítomné intermetalické fáze a při měření tvrdosti záleží na tom, zda indentor zasáhl částici, nebo ne.



Obr. 8: Porovnání kvality eloxové vrstvy

Výše uvedené se také odráží na výsledcích měření tvrdosti. U všech vzorků je velký rozptyl (velká směrodatná odchylka) hodnot tvrdosti.

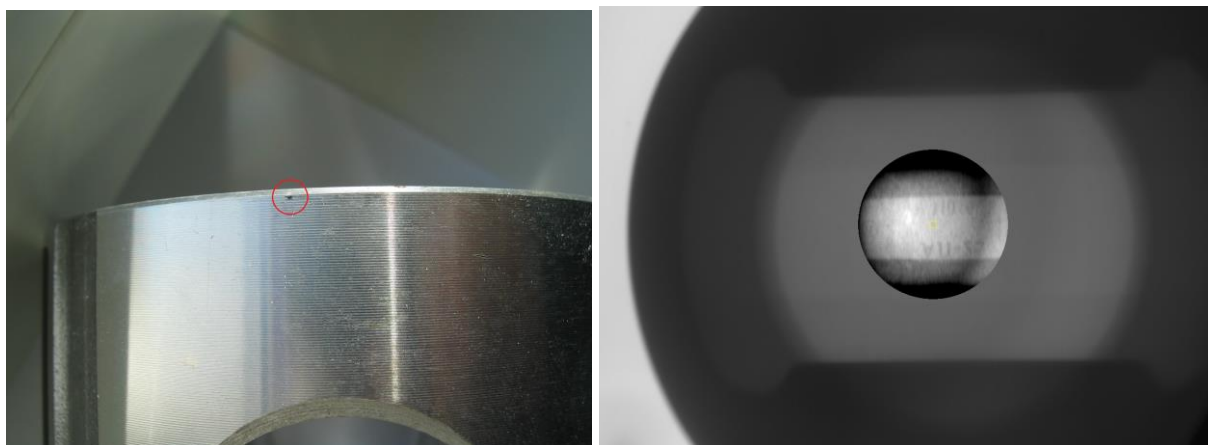
Obecně lze říci, že výrazně větší tloušťka a větší tvrdost eloxové vrstvy byla naměřena u vzorku 1A (80 μm /299 HV), dále u vzorku 2Č (49 μm /127 HV) a nejnižších hodnot dosahoval vzorek 3Č (35 μm /93 HV).

VIZUÁLNÍ KONTROLA A RTG KONTROLA

Všechny vzorky byly podrobeny vizuální kontrole vnějších i vnitřních ploch pístu a RTG kontrole. Jako hodnotící kritérium byly použity technické přejímací podmínky od zákazníka pro daný typ pístů.

Píst 1A nevykazoval žádné vnější ani vnitřní vady. Na pístu 2Č se vyskytovala 1x vizuální vada typu řediny o průměru 1,2 mm na spodní hraně pístu (viz obr. 9). Navíc bylo detekováno množství vad typu ředin pomocí RTG uvnitř pístu pod spalovacím prostorem (obráz. 10). Na pístu 3Č se vyskytovala 1x vizuální vada typu řediny o průměru 1,8 mm pod stírací drážkou v oblasti nad čepním otvorem (obráz. 11).

Všechny výše zmíněné vady na pístech s označením „Č“ nesplňují technické přejímací podmínky.



Obr. 9, 10: Vada na odlitku 2Č odhalená vizuální kontrolou (vlevo), RTG snímek pístu 2Č s ředinou (vpravo)



Obr. 11: Vada na pístu 3Č

ZÁVĚR

Závěrem lze říci, že kvalita pístů vyrobených ve společnosti ALMET, a.s. a v Číně je rozdílná ve všech sledovaných aspektech. Zajímavé jsou rozdíly v chemickém složení, kdy čínské vzorky nejsou vyrobeny ze slitiny AlSi12CuNiMg. Mají obecně vyšší obsah křemíku a vyšší obsah železa, ale celkově složení neodpovídá žádné běžně používané pístové slitině. Ve strukturách nejsou významné rozdíly, pouze vyšší obsah křemíku u čínských pístů dává vzniknout většímu počtu větších částic primárního křemíku (což ale může mít i jiné důvody, např. v použitých surovinách a způsobu jejich tavení v hutích, případně v očkování). U pístů vyrobených v Číně, které byly analyzovány dříve, byla struktura prokazatelně více tepelně ovlivněná s předpokladem režimu T6, což se u těchto pístů nepotvrdilo. Asi nejvýznamnější rozdíly jsou v kvalitě zalití nerezistových nosičů: na první pohled je tato kvalita horší u čínských pístů, kde se vyskytují studené spoje až dutiny a rozdílné jsou i difúzní a přechodové vrstvy. Můžeme se jen domnívat, zda a v jakém provedení je u čínských pístů nanášena alufinační vrstva. Také u eloxové vrstvy jsou významné rozdíly, hovořící ve prospěch kvality pístu 1A. Z výše uvedeného vyplývá, že v tomto případě jsou náklady ve společnosti ALMET, a.s. vynaložené na výrobu tohoto pístu obhajitelné. Pro ucelenější přehled by bylo vhodné sledovat stabilitu kvality průběžně nebo alespoň na větším počtu kusů.

LITERATURA

- [1] BRYKSÍ STUNOVÁ, Barbora a David HENZL. Slitiny hliníku pro písty spalovacích motorů a kompresorů. *Slévárnictví*. Brno: Svaz sléváren České republiky, 2016, LXIV (3 - 4), 82 - 85. ISSN 0037-6825.

Odezňívání modifikačního účinku a jeho dopad na mechanické vlastnosti slitiny AlSi10Mg

Kaňa, V.¹⁾, Halaška, J.¹⁾

¹⁾ FSI VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie, Odbor slévárenství, Technická 2, 616 69 Brno, kana@fme.vutbr.cz

Klíčová slova

Modifikace; Odezňívání; Mechanické vlastnosti; Silumin

Abstrakt

Článek se zabývá vlivem odezňívání modifikačního účinku sodíku a stroncia na mechanické vlastnosti slitiny AlSi10Mg. V různých časových intervalech po modifikaci byly odebírány vzorky pro tahovou zkoušku a analýzu chemického složení. Bylo zjištěno, že pokles obsahu obou prvků je lineární a také rychlost odezňívání je u obou prvků velmi podobná. Na mez pevnosti a mez kluzu má odezňívání pouze zanedbatelný vliv. Jistý pokles byl zaznamenán u tažnosti a to zejména u vzorků v litém stavu.

ÚVOD

Modifikaci slitin Al-Si objevil Američan Aladar Pacz v roce 1921. Zjistil, že přidáním fluoridu sodného do taveniny hliníku s 5-15 % křemíku dochází k výraznému zvýšení tažnosti a obrobitelnosti. Na metalografických výbrusech bylo následně pozorováno, že došlo ke změně morfologie eutektického křemíku z hrubých ostrohranných desek na velmi jemné globulární útvary. Později, po vynálezu elektronového mikroskopu, bylo zjištěno, že pozorované globulární útvary jsou ve skutečnosti konce velmi jemných křemíkových vláken uspořádaných do husté sítě. Dalšími experimenty bylo ověřeno, že podobné modifikační účinky vykazují prvky umístěné v I. A a II. A sloupci periodické tabulky prvků a také kovy vzácných zemin. Avšak nejúčinnější a v praxi také téměř výhradně používané jsou sodík a stroncium. Pro dokonalou modifikaci postačují i velmi nízké koncentrace, 50-100 ppm Na resp. 200-400 ppm Sr. [1]

Ovšem modifikační účinek prvků netrvá neomezeně dlouho. Ihned po přidání modifikačního prvku začne docházet k postupnému snižování jeho koncentrace v tavenině, takzvanému odezňívání. Odezňívání je nejrychlejší u sodíku a dochází k němu především mechanismem vypařování. Literárně se údaje o rychlosti odezňívání mírně liší. Někde bývá uváděno, že odlití je nutno provést do 15-20-ti, max. 30-ti minut [2], jinde je tato doba delší - 30-40 minut [1]. Rychlost odezňívání je samozřejmě také závislá na manipulaci s taveninou. Čím je větší víření a přelévání taveniny a také čím je vyšší její teplota, tím rychlejší bude odezňívání.

U stroncia se odezňívání projevuje také, ovšem je mnohem pomalejší. Hlavním mechanismem odezňívání stroncia je jeho pozvolná oxidace. Literatura uvádí, že za 9 hodin klesne obsah Sr z počátečních 250 ppm na polovinu a za dalších 7 hodin na hodnotu 30 ppm [2]. Po namodifikování taveniny by mělo dojít k odlití nejpozději do 3-6-ti hodin [2]. Pomalé odezňívání modifikačního účinku Sr umožňuje používání předmodifikovaných housek, což u Na není možné.

EXPERIMENT

Cílem provedeného experimentu bylo ověření rychlosti odeznívání při použití sodíku nebo stroncia a vliv odeznívání na mechanické vlastnosti.

Použité metody a podmínky experimentu

K odlévání byla použita slitina AlSi10Mg tavená v elektrické odporové kelímkové peci o max. kapacitě 200 kg taveniny. Taveno a zpracovávalo bylo 175 kg kovu. Složení vsázky bylo 50 % vratu a 50 % nových housek. Po natavení následovalo očkování pomocí tablet Mikrosal Al T 100, dále odplynění rotorem s argonem a následně modifikace tabletou Eutektal T 201. Pak následovalo ruční odlévání do skořepinových forem zhotovených metodou vytavitelného voskového modelu. Skořepiny byly žíhány na teplotu 570°C. Teplota lití byla 680°C. První skořepina byla odlita ihned po modifikaci a následně každých přibližně 25 minut další, vždy spolu se vzorkem na chemickou analýzu. Celkem bylo odlito 5 skořepin. Na *Obr. 1* jsou zachyceny zkušební odlitky.

Takto byla následně provedena i druhá tavba modifikovaná stronciem. Hmotnost taveniny byla 154 kg. Zpracování taveniny bylo shodné s první tavbou, pouze pro modifikaci bylo použito 342 g předslitiny AlSr10 ve formě tyčí. Předpoklad byl dosažení 200 ppm Sr při využití 90 %. Modifikátor byl do taveniny přidán před odplyněním, aby při odplyňování současně docházelo k jeho dobrému rozpouštění a homogenizaci taveniny. Jelikož se předpokládalo pomalejší odeznívání než u sodíku, byly odlity pouze 3 zkušební odlitky v delších časových intervalech.



Obr. 1: Zkušební odlitky

Po odstranění vtokové soustavy z odlitků bylo na polovině zkušebních trámeček provedeno vytvrzení sestávající z rozpouštěcího žíhání 530°C/3hod./voda s následným umělým

stárnutím 180°C/10 hod./otevřená pec. Poté byly ze všech trámečků vyrobeny zkušební tyče průměru 10 mm pro tahovou zkoušku. Ta byla provedena na univerzálním trhacím stroji Zwick Z250. V případě modifikace sodíkem bylo pro každý čas odlití přetrženo 6 tyčí, 3 tepelně zpracované a 3 v litém stavu. Pro modifikaci stronciem pak z finančních důvodů ne 6, ale pouze 4 tyče. Dále uvedené hodnoty mechanických vlastností jsou tedy průměrem ze tří, resp. dvou provedených zkoušek. Chemické složení bylo měřeno na optickém emisním spektrometru Q4 Tasman.

Vyhodnocení poklesu koncentrace modifikačního prvku

U vzorků modifikovaných sodíkem byl plánován odběr vzorků po asi 25-ti minutách. Skutečné intervaly odběrů však byly trochu odlišné a jsou uvedeny v *Tab. 1* spolu s výsledky chemického rozboru jednotlivých odebraných vzorků. *Tab. 2* pak ukazuje změny koncentrace stroncia v čase.

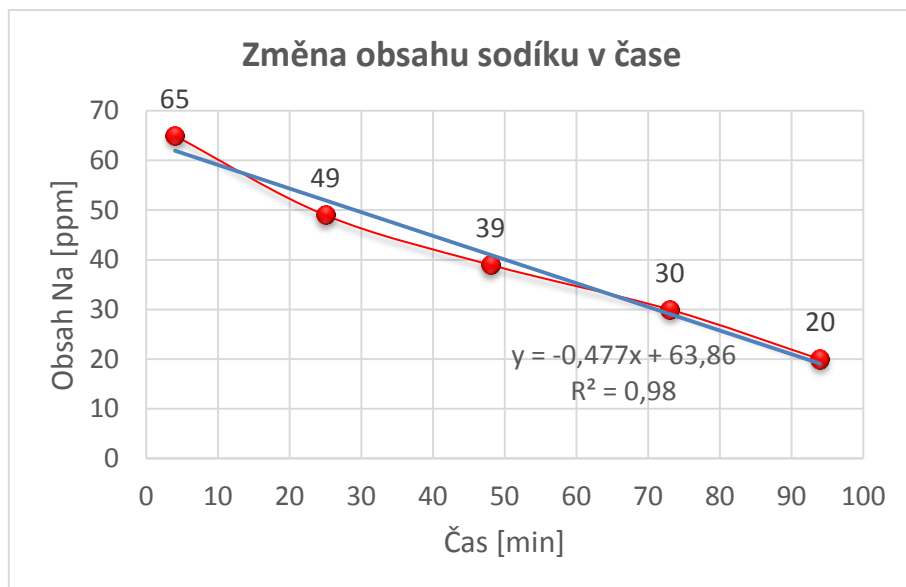
Tab. 1: Pokles obsahu sodíku v čase

Čas odběru [min.]	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]	Na [%]
4	9,00	0,15	< 0,01	0,26	0,34	0,0065
25	8,87	0,14	< 0,01	0,26	0,34	0,0049
48	8,93	0,15	< 0,01	0,26	0,35	0,0039
73	8,87	0,15	< 0,01	0,26	0,35	0,0030
94	9,05	0,15	< 0,01	0,26	0,34	0,0020

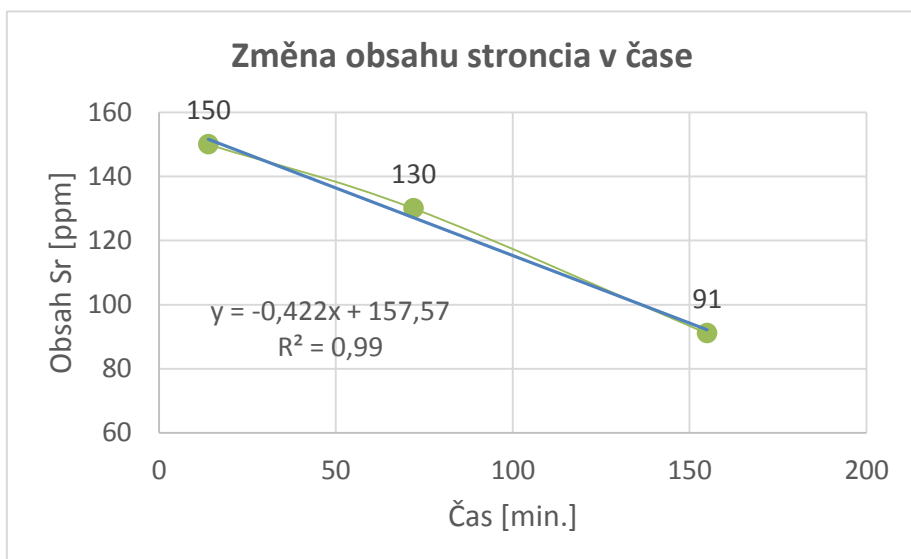
Tab. 2: Pokles obsahu stroncia v čase

Čas odběru [min.]	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]	Sr [%]
před modifikací	9,08	0,14	< 0,01	0,26	0,34	< 0,0010
14	9,04	0,14	< 0,01	0,26	0,34	0,0150
72	9,20	0,14	< 0,01	0,26	0,34	0,0130
155	9,08	0,14	< 0,01	0,25	0,32	0,0091

Již u prvního vzorku po modifikaci stronciem je vidět, že počáteční obsah Sr je nižší než očekávaných 200 ppm a tedy že využití je menší než předpokládaných 90 %, a to asi 70 %. Pro lepší názornost jsou naměřené hodnoty poklesu obsahu modifikačních prvků vyneseny do grafů na *Obr. 2* a *Obr. 3*. Zde je dobře vidět, jak dochází k odeznívání a postupnému snižování koncentrací modifikačních prvků. U obou sledovaných prvků je pokles přibližně lineární a u sodíku činí asi 5 ppm Na za 10 min. Překvapující je, že rychlost úbytku stroncia v čase je podobná jako u sodíku a činí přibližně 4 ppm za 10 min.



Obr. 2: Pokles obsahu sodíku v závislosti na čase



Obr. 3: Pokles obsahu stroncia v závislosti na čase

Vliv odeznívání na mechanické vlastnosti

Protože v technické praxi je nejdůležitější dopad poklesu koncentrace modifikačních prvků na výsledné mechanické vlastnosti materiálu, byly provedeny tahové zkoušky na vzorcích v litém stavu i po tepelném zpracování. Výsledky zkoušek jsou uvedeny v *Tab. 3* pro sodík a v *Tab. 4* pro stroncium.

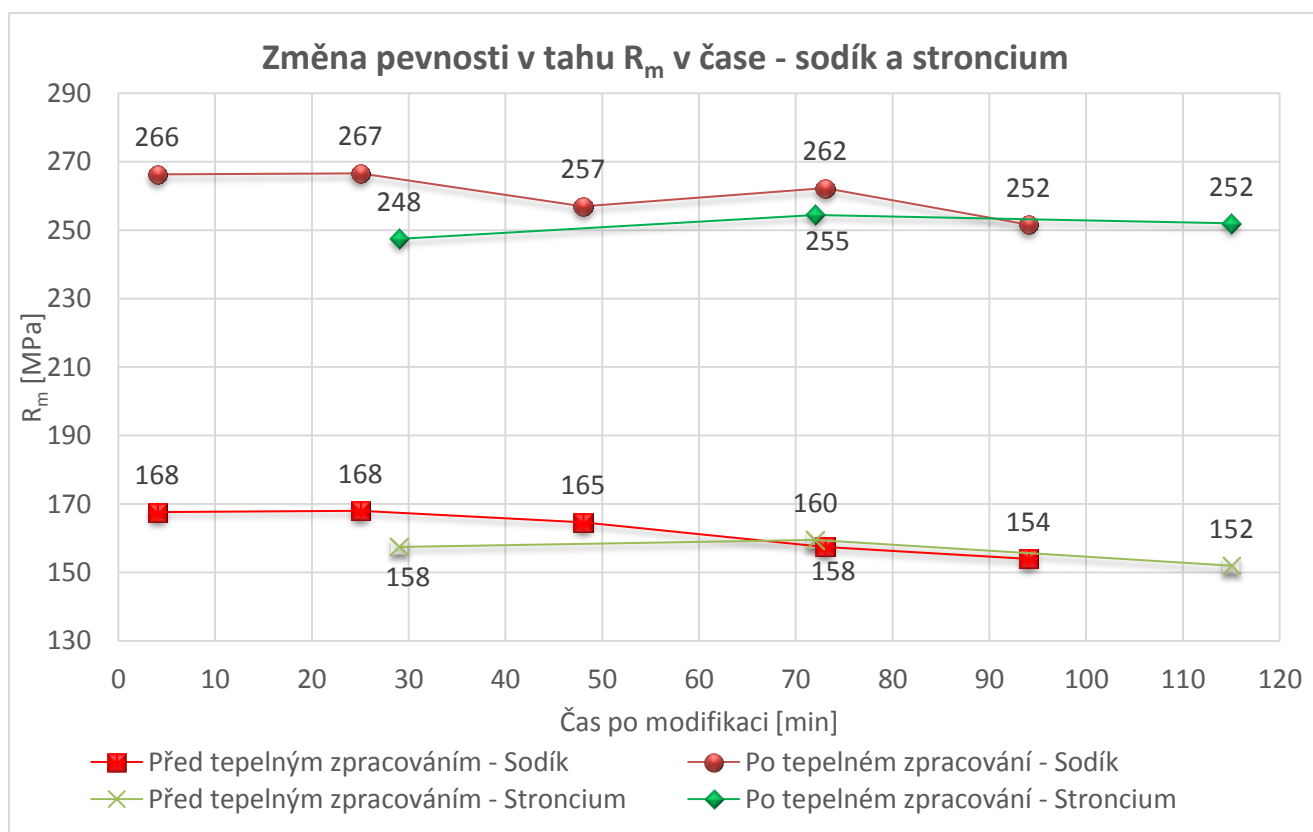
Tab. 3: Mechanické vlastnosti u vzorků modifikovaných sodíkem

SODÍK	Čas po modifikaci [min]	Obsah Na [ppm]	R _m [MPa]	A [%]	R _{p0,2} [MPa]
Litý stav	4	65	168	3,5	98
	25	49	168	3,6	98
	48	39	165	3,3	97
	73	30	158	2,7	96
	94	20	154	2,0	96
Po tepelném zpracování	4	65	266	0,7	245
	25	49	267	0,9	241
	48	39	257	0,5	240
	73	30	262	0,6	243
	94	20	252	0,6	228

Tab. 4: Mechanické vlastnosti u vzorků modifikovaných stronciem

STRONCIUM	Čas po modifikaci [min]	Obsah Sr [ppm]	R _m [MPa]	A [%]	R _{p0,2} [MPa]
Litý stav	29	150	158	2,5	98
	72	130	160	2,6	102
	115	91	152	2,0	99
Po tepelném zpracování	29	150	248	0,6	229
	72	130	255	0,5	236
	115	91	252	0,5	229

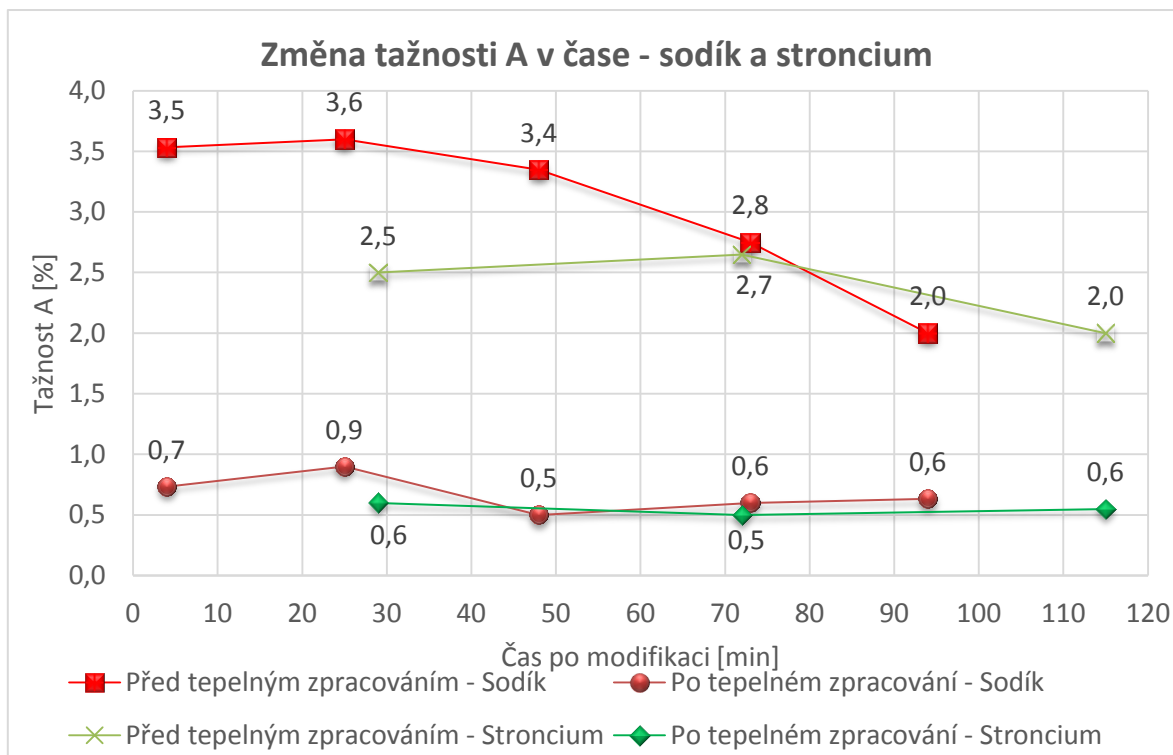
Hodnoty mechanických vlastností byly pro větší přehlednost opět vyneseny do grafů. Na Obr. 4 je znázorněna závislost meze pevnosti na době od modifikace pro oba modifikační prvky.



Obr. 4: Mez pevnosti v závislosti na době od modifikace

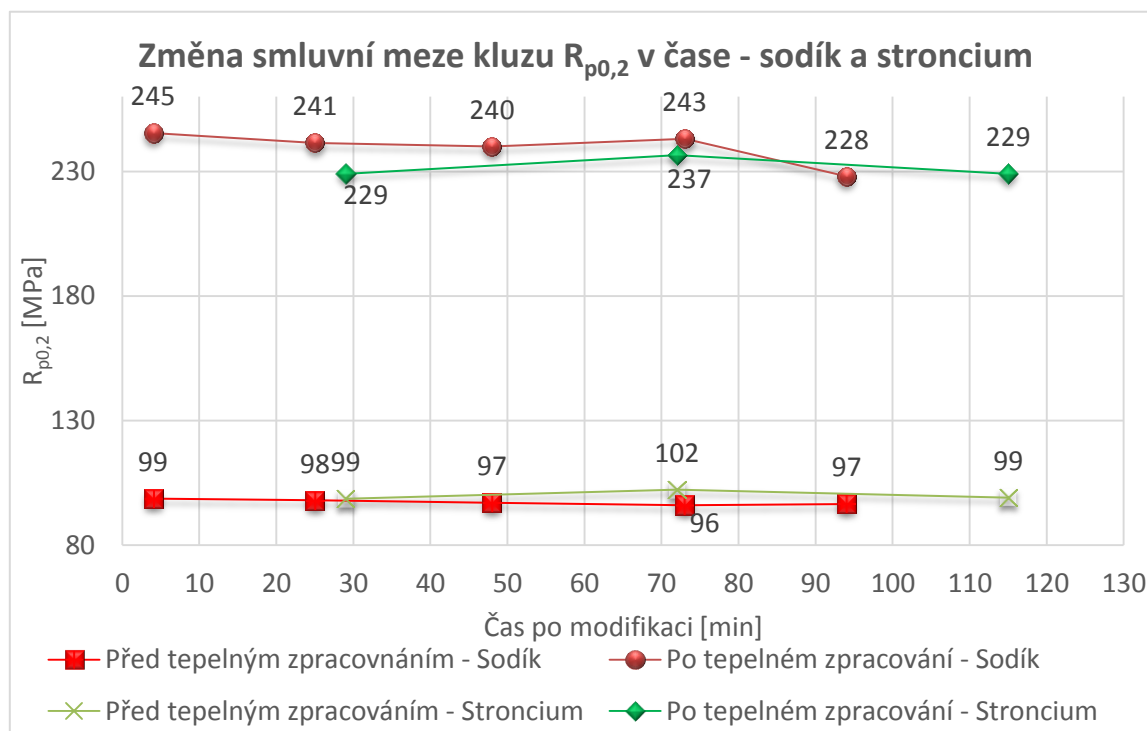
Z dosažených výsledků je vidět, že byť se na výsledcích chemických analýz jednoznačně prokázal viditelný pokles obou modifikačních prvků, tak na hodnotách meze pevnosti se to nijak významně neprojevovalo. Určitý menší pokles byl zaznamenán pouze u vzorků modifikovaných sodíkem a v litém stavu. Zde došlo po 94 minutách po modifikaci ke snížení meze pevnosti ze 168 MPa na 154 MPa, tedy o 14 MPa. U ostatních vzorků byly změny pevnosti řádově v jednotkách MPa, tedy prakticky zanedbatelné. Zdá se, že u vzorků v litém stavu dochází postupem času k mírnému poklesu pevnosti. U vzorků po tepelném zpracování došlo vytvrzením ke zvýšení pevnosti o asi 100 MPa a s časem se tyto hodnoty nijak významně neměnily.

Graf na Obr. 5 ukazuje závislost tažnosti na době od modifikace. Je zde dobře vidět, že tepelným zpracováním došlo k celkovému poklesu tažnosti přibližně o 2-2,5 %. Vzorky po tepelném zpracování vykazují tažnosti zhruba kolem 0,6 % a tyto se v průběhu času nemění, bez ohledu na použitý modifikační prvek. U vzorků v litém stavu je to jinak. V případě modifikace stronciem se v časech po modifikaci 29 a 72 min. tažnost nijak významně nemění a vykazuje hodnoty 2,5 resp. 2,7 %. V čase 115 min. však již tažnost klesá na 2,0 %. Ještě výraznější pokles je vidět u vzorků modifikovaných sodíkem. Zde se do času 25 min. tažnost bez významnějších změn pohybuje kolem 3,5 %. Dále s časem pak klesá přibližně lineárně rychlostí 0,23 % za 10 min. na hodnotu 2,0 % v čase 94 min. Stejně tažnosti, tedy 2,0 %, bylo u modifikace stronciem dosaženo až po 115-ti minutách. Potvrdil se tedy fakt, že sodík je silnější modifikátor, ale dopad jeho odeznívání na vlastnosti slitiny je výrazně vyšší než u stroncia.



Obr. 5: Tažnost v závislosti na době od modifikace

V grafu na Obr. 6 jsou zachyceny změny meze kluzu v průběhu času. Jejich průběh je velmi podobný jako u mezí pevnosti. Dále je zde vidět, že tepelným zpracováním došlo ke zvýšení meze kluzu u vzorků modifikovaných sodíkem přibližně o 140-145 MPa, u stroncia asi o 130 MPa.



Obr. 6: Mez kluzu v závislosti na době od modifikace

ZÁVĚR

Cílem provedených experimentů bylo ověření vlivu odeznívání modifikačního účinku sodíku a stroncia na mechanické vlastnosti slitiny AlSi10Mg.

- U sodíku byl zjištěn lineární průběh rychlosti odeznívání, a to přibližně 5 ppm za 10 min.
- U stroncia byl průběh také lineární s velmi podobnou rychlostí odeznívání si 4 ppm za 10 min.
- Vliv odeznívání obou prvků na hodnoty meze kluzu byl téměř zanedbatelný bez ohledu na to, zda se jednalo o vzorky v litém stavu nebo po tepelném zpracování. Určitou výjimkou byly vzorky v litém stavu, modifikované sodíkem, kde došlo po 94 minutách po modifikaci ke snížení meze pevnosti ze 168 MPa na 154 MPa, tedy o 14 MPa. U všech ostatních se jednalo o zanedbatelné změny v řádu jednotek MPa.
- Velmi podobný průběh jako mez pevnosti měly i hodnoty meze kluzu. Ani zde nebyl zaznamenán významný vliv odeznívání na $R_{p0,2}$ ani u jednoho z modifikačních prvků.
- Největší dopad mělo odeznívání modifikace na tažnost. U vzorků po tepelném zpracování došlo celkově k poklesu tažností přibližně na hodnoty kolem 0,6 % a v čase se příliš neměnili. Avšak na vzorcích v litém stavu jsou již změny pozorovatelné. U vzorků modifikovaných stronciem se v časech 29 min. (150 ppm Sr) a 72 min. (130 ppm Sr) tažnost drží na 2,5 resp. 2,7 %, ale poté postupně klesá na 2,0 % v čase 115 min při 91 ppm Sr. U modifikace sodíkem je vliv odeznívání ještě markantnější. Do času 25 min. (obsah 49 ppm Na) se tažnost bez významnějších změn pohybuje kolem 3,5 %, ale pak lineárně klesá přibližnou rychlostí 0,23 % za 10 min. na hodnotu 2,0 % v čase 94 min. při obsahu 20 ppm Na.

LITERATURA

- [1] GRUZLESKI, John a Bernard CLOSSET. *The Treatment of Liquid Aluminium-Silicon Alloys*. 1. vydání. Des Plaines, Illinois: American Foundrymen's Society, Inc., 1990. ISBN 0-87433-121-8.
- [2] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. První. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2004. ISBN 80-214-2790-6.

Inteligentní technologie spalování s kyslíkem a strategie sekundárního tavení neželezných kovů v komorové peci

Gangoli, S. 1), Kenworthy, B. 1), Buragino, G. 1), Hewertson, R. 1), Sane, A. 1), Mocsari, J. 1)

¹⁾ Air Products

ÚVOD

Spalování s kyslíkem je definováno jako *částečné* nebo *úplné* nahrazení vzduchu kyslíkem jako oxidačním činidlem při procesu spalování. Tato metoda je již dlouho známá pro svou vysokou účinnost a vysoký tavicí výkon. Eliminací dusíku ze spalovacího procesu snižuje kyslíkové spalování ztráty tepla spaliny, které opouštějí pec a tím zvyšuje podíl tepla pro vlastní tavení v peci. (viz. *Nové techniky zvýšení účinnosti procesu* a obrázek 2).

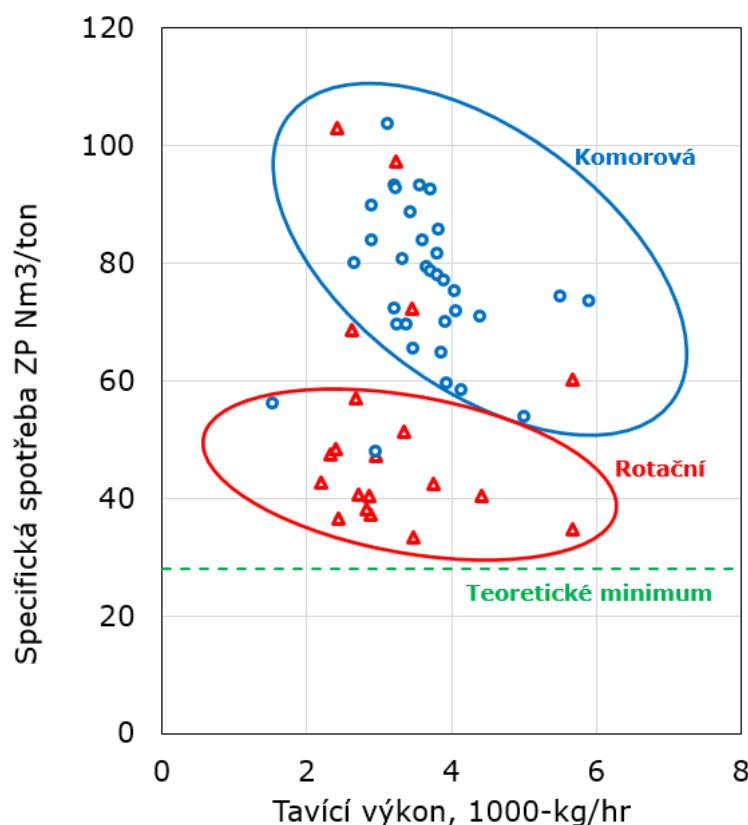
Peci pro sekundární tavení neželezných kovů jsou dodávány v různých typech, tvarech a velikostech. Obvykle spalování s kyslíkem je prospěšnější u rotačních pecí, kdy se vyzdívka pece při tavně (když prochází pod kovem) aktivně podílí na přenosu tepla na vsázku. Komorová stacionární pec je omezena faktory konstrukce pece. Spoléhá zejména na sálavou výměnu energie mezi vyzdívkou a vsázkou. Vyšší dostupná energie, vyplývající ze spalování s kyslíkem v komorové peci, je rozložena mezi kov a vyzdívku. Na rozdíl od rotační pece je ale přenos tepla v komorové peci méně účinný. Tabulka 1 ukazuje relativní srovnání kompletního provozu spalování s kyslíkem v rotační a komorové peci. Aby bylo tavenině dodáno stejné množství energie (2 MWH), je v komorové peci nutný energetický příkon asi o 38 % vyšší (4 MWH) než u rotační pece (2,9 MWH).

Tab. 1: Relativní srovnání kompletního provozu spalování s kyslíkem v rotační a komorové peci

Popis	Jednotky	Rotační	Komorová	Komentář
Vstupní energie	MW	2,9	4,0	Vyšší vstupní energie (38%)
Obohacení	%	100	100	Plně kyslíkový provoz
Dostupná energie (sekce 2)	%	75,2	75,2	Uvažovaná teplota spalin 1100°C
Faktor pece (FF)	%	90,0	65,7	
Energie do spalin	MW	0,73	1,00	
Energie do vsázky	MW	2,0	2,0	Stejná energie do vsázky
Energie do vyzdívky/ostatní	MW	0,2	1,1	Vyšší energie do vyzdívky
Specifická spotřeba paliva	Nm ³ /Mton	43	59	
Specifická spotřeba kyslíku	Nm ³ /Mton	87	116	
Objem spalin	Nm ³ /hr	789	1 088	

Tabulka 1 odpovídá skutečným provozním údajům z různých rotačních a komorových pecí shromažďovaných po dobu několika let, jak je znázorněno na obrázku 1. Klíčovou proměnnou tabulky 1 je *koeficient pece*, který je definován jako podíl celkové dostupné energie (vypočítaný při dané teplotě spalin, např. 1100 °C v tabulce 1, viz také obrázek 2), která je při tavicím cyklu skutečně spotřebována vsázkou. Koeficient pece obvykle závisí na

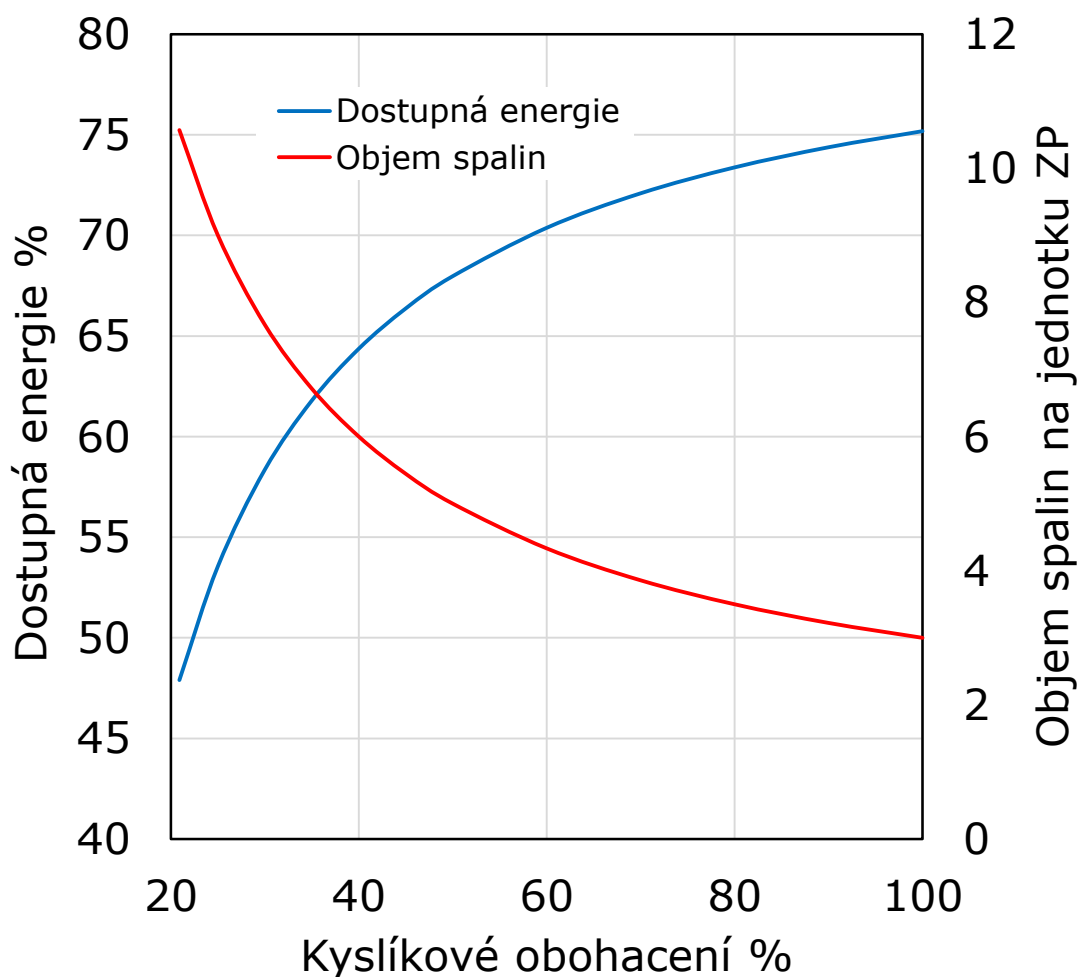
typu pece, umístění a regulaci odtahu, typu a tloušťce vyzdívky, počtu a umístění hořáků, objemu spalin, času setrvání energie v peci pro optimální přenos tepla atd. Jednoduše lze říci, že jde o měřítko účinnosti pece při přenosu energie na vsázku. Tento koeficient se z výše uvedených důvodů obvykle pohybuje mezi 85–90 % u rotačních pecí a asi 50–65 % u komorových pecí.



Obr. 1: Realizační strategie pro hořák s proměnným ohřevem

NOVÉ TECHNIKY ZVÝŠENÍ ÚČINNOSTI PROCESU

Celková účinnost přenosu energie při procesu tavení je kombinací dostupného tepla a koeficientu pece. Dostupná energie je definována jako podíl celkového příkonu energie, který „není odnesen ve spalinách“, a je tedy teoreticky „dostupný“ pro přenos na vsázku. Energie ztracená spalinami závisí na objemu spalin a teplotě, při níž spaliny pec opouštějí. Obrázek 2 ukazuje, jak se dostupná energie, jako podíl příkonu energie a objem spalin vytvořených na jednotkový objem zemního plynu, liší podle podílu kyslíku ve spalovacím vzduchu použitém při procesu tavení (kde 20,9 % = pouze vzduch, 100 % = pouze kyslík). Obrázek znázorňuje, jak zvýšením podílu kyslíku ve spalovacím vzduchu objem spalin prudce klesá a dostupná energie prudce roste.



Obr. 2: Dostupná energie (při teplotě spalin = 1100 °C) a objem spalin (FG) generovaných na jednotku zemního plynu (NG) v závislosti na podílu kyslíku v oxidačním činidle (nebo obohacení kyslíkem)

Kyslík jako oxidační činidlo pro zvýšení dostupné energie: Tabulka 1 výše napověděla, že použití čistě kyslíkového spalování v komorové peci provozované při 4 MWH výkon přenese na produkt 2 MWH energie. Příklad A v tabulce 2 níže ukazuje spalování jen se vzduchem v komorové peci, které vyžaduje pro přenos stejného množství energie na produkt (2 MWH) téměř dvojnásobek vstupní energie (7,7 MWH). Případy B, C a D zobrazují další možnosti vedoucí ke zvýšení produktivity případu A o 25 %. Příklad B využívá pouze kyslíkové spalování (5 MWH), přičemž objem spalin je o 84 % nižší a spotřeba kyslíku je 116 Nm³/t. Případy C a D využívají kombinaci spalování se vzduchem a s kyslíkem a dosahují 25% produktivity. Tyto případy současně udržují měrnou spotřebu kyslíku na úrovni pod 100 % kyslíkovým spalováním (30 – 80 Nm³/t). Případy B, C a D umožňují získat při stávajícím výkonu pece více s minimálními kapitálovými investicemi (krátká návratnost) a zároveň nízkými náklady. Možnosti pro zvýšení produktivity komorových pecí jsou uvedeny níže.

Tab. 2: Srovnání spalování se vzduchem, s kyslíkem a kombinovaného spalování v komorových pecích

Popis	Jednotky	AF	OF	AOF	Boost AOF
			25 % Zvýšení produktivity		
		Případ A	Případ B	Případ C	Případ D
Vstupní energie	MW	7,7	5,0	6,5	8,9
Obohacení	%	20,9	100,0	35,0	22,9
Dostupná energie	%	42,70	75,20	60,30	46,80
Faktor Pece (FF)	%	60,00	65,70	63,40	59,70
Energie do spalin	MW	4,4	1,2	2,6	4,7
Energie do vsázky	MW	2,0	2,5	2,5	2,5
Energie do vyzdívky/ostatní	MW	1,3	1,3	1,4	1,7
Specifická spotřeba paliva	Nm3/Mton	113	59	76	104
Specifická spotřeba kyslíku	Nm3/Mton	-	116	75	29
Objem spalin	Nm3/hr	8 074	1 311	4 038	8 409

Zvýšení produktivity díky dodatečnému hořáku s kyslíkovým spalováním tzv. „OXY BOOST“:

Produktivitu provozu, který je omezen stávajícím výkonem pece, je možné podpořit vhodně dimenzovanými a strategicky umístěnými kyslíkovými hořáky. Umí totiž pracovat v tandemu se současnými hořáky pro spalování se vzduchem. Energie dodaná kyslíkovými hořáky zde představuje jen část celkové energie vstupující do pece. Případ D v tabulce 2 demonstruje přidání kyslíkových hořáků (pracující při výkonu 1,1 MWH - 13 % celkového příkonu energie), do pece využívající hořáky spalující se studeným vzduchem při 7,7 MWH (výchozí stav, případ A), jenž může zvýšit produktivitu o 25 %. Jedná se o nákladově efektivní metodu zvýšení produktivity pece se středně vysokými investicemi do zařízení a relativně rychlou návratností. Může zde dojít k mírnému navýšení objemu spalin (o 4 % vyšší, případ D v tabulce 2) ale přesto dochází k vyššímu přenosu tepla do vyzdívky pece (o 27 % vyšší, případ D v tabulce 2). Pro stanovení optimálního umístění hořáků a analýzu interakcí mezi plemeny se používá výpočtové modelování dynamiky tekutin. Efektivita této metody závisí na řízení příkonu vstupní energie a její rozložení v komorové peci.

Zvýšení produktivity díky kyslíkovému hořáku bylo v komorové peci na hliník již úspěšně prokázáno. Například při instalaci kyslíkového hořáku s nastavitelným uvolňování tepla společností Air Products, který v současnosti používá společnost Sapa Extrusions, Inc. Po přidání našich hořáků ke stávajícímu otopovému systému regenerativních hořáků, které využívají spalování se vzduchem, došlo ke zvýšení produktivity o 15 %.

Využití metody kombinovaných hořáků kyslík-vzduch-palivo s pevným nastavením stupně

obohacení: Jedna z prvních komorových pecí využívající pro tavení „asistenci“ kyslíku se nacházela ve společnosti Roth Brothers (později Wabash Alloys) v East Syracuse, NY. Pec na tavení hliníku s boční sázecí komorou byla vybavena na místo původních konvenčních vzduchových hořáků, kyslíkovými hořáky Air Products-EZFire pro kombinované spalování paliva se vzduchem a kyslíkem, čímž došlo ke zvýšení výroby a snížení spotřeby paliva. V obou režimech (vzduchový, kyslíko-vzduchový) využívá pec mechanické čerpadlo pohybu taveniny, které podporuje efektivitu tavení tím, že homogenizuje teplotu taveniny a vhání ji

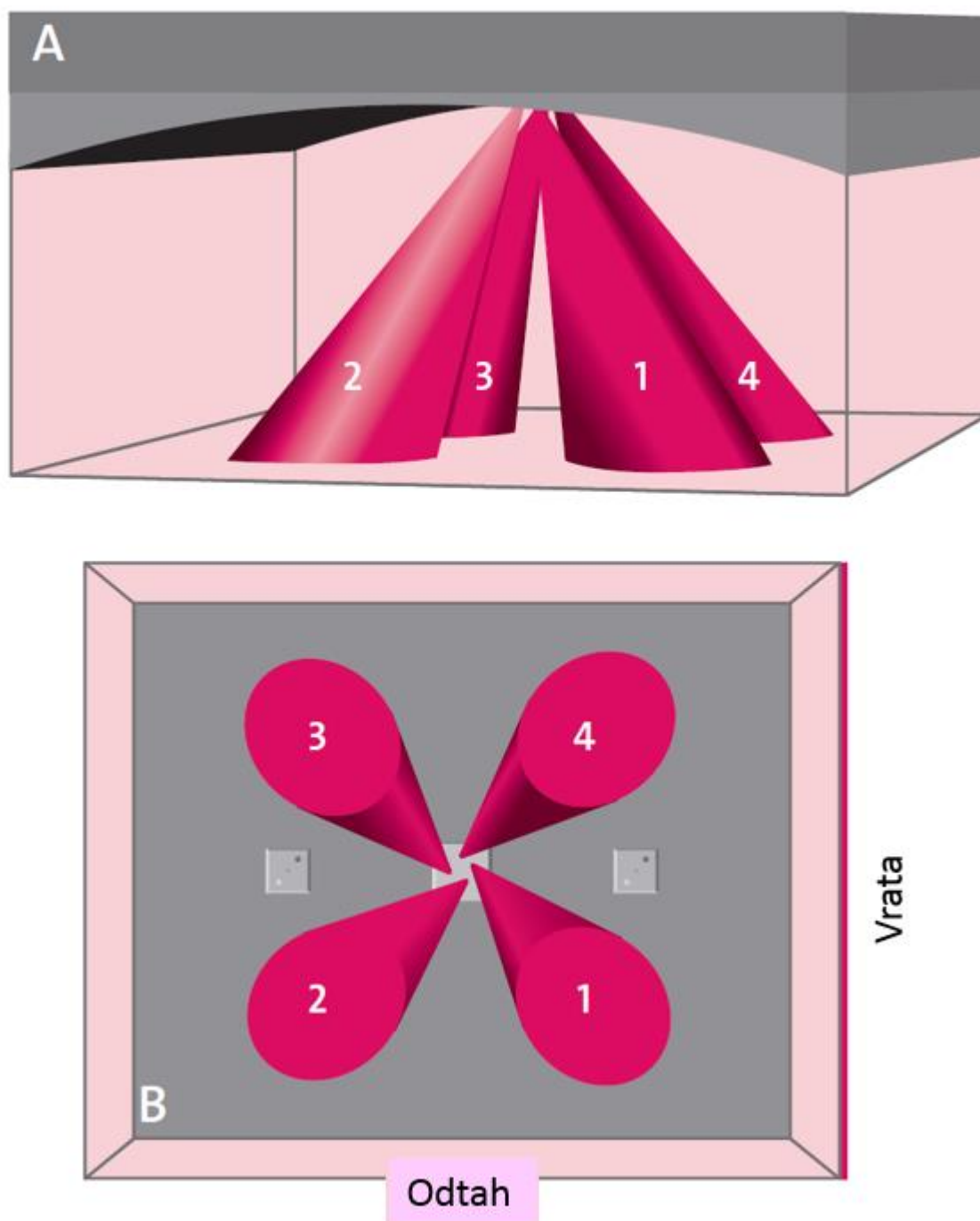
do boční komory, čímž vlastní tavení urychluje. Spalovací systém měl nastaven pevný poměr obohacení kyslíkem během celého tavicího cyklu. Denní produkce se zvýšila o 35 % (ze 70 tun na 95 tun denně) a spotřeba paliva se snížila z hodnoty přes 1250KW na 750KW na tunu materiálu. Poměr obohacení (% kyslíku v oxidačním činidle) použitý pro dosažení těchto výsledků byl 35 % a měrná spotřeba kyslíku dosáhla 70 Nm³ na tunu materiálu. Teplota spalin byla v režimu vzduch-kyslík-palivo o něco nižší, což prokazuje lepší koeficient pece jinak také vyšší účinnost přenosu tepla do taveniny.

Využití metody kombinovaných hořáků kyslík-vzduch-palivo s pružným nastavením stupně obohacení v celém provozním rozsahu (THB): Po procesu tavení neželezných kovů obvykle následují další činnosti jako jsou rafinace, redukce, legování a odplyňování. V mnoha případech probíhají tyto činnosti přímo v tavicí peci. To pak vyžaduje výrazné snížení výkonu hořáků v peci, čímž se významně snižuje objem spalin, a tedy i tlak v peci. Pokud nejsou tyto změny kompenzovány vhodně dimenzovanou regulací tlaku pomocí hradítka v odtahu spalin, mohou mít za následek neplánované ztráty energie z důvodů nasávání studeného vzduchu do pece a následné oxidaci taveniny způsobující ztráty výtěžnosti.

Lze tomu předejít použitím technologie, která je schopná v tomto případě pružně upravit obohacení vzduchu kyslíkem, tzn. využít pro tavicí režim kyslíkového spalování (případ B), kde se nejlépe využije kyslíkového potenciálu a naopak snížit % kyslíku tedy obohacení (případ C nebo A) v „netavicím“ režimu pece. Tato strategie regulace pomáhá optimalizovat objem spalin a tím stabilizuje tlak v peci a současně optimalizuje celkové využití kyslíku. Tento přístup rovněž poskytuje provozní flexibilitu, lze se s ním přizpůsobit různým nárokům výroby. Při vysokých nárocích je možné využívat spalování s kyslíkem, při nízkých nárocích zase ponechat v režimu vzduchovém nebo kyslíko-vzduchovém.

Technologie kombinovaných hořáků s nastavitelným obohacováním společnosti Air Products byla úspěšně realizována v komorové peci na měď ve společnosti SDI La Farga, LLC v New Havenu, IN. Ve srovnání s alternativní technologií bylo při produkci dosaženo 10% nárůstu produktivity a 15% snížení spotřeby paliva. Původní technologie způsobovala nerovnoměrné zahřívání v peci, zatímco se přední část pece přehřívala, zadní část byla studená. Relativně rovnoměrný profil rozložení energie u hořáku s nastavitelným obohacováním umožnil po delší dobu vyšší výkon, což vedlo k výrazně vyšší rychlosti tavení.

Inteligentní technologie spalování s kyslíkem nové generace pro vyšší účinnost tavení: Tradiční přístupy k tavení zahrnují tvorbu plamene v otevřeném prostoru uvnitř pece a výrazně spoléhají na přenos sálavého tepla. Nižší koeficient komorových pecí však omezuje rychlost tavení, jenž lze tímto přístupem dosáhnout. Nová inteligentní technologie tavení společnosti Air Products, kyslíkový hořák s proměnným ohřevem a distribucí energie, byl vyvinut s cílem usměrňovat a rovnoměrně rozložit energii v celé komoře pece právě dle aktuálních potřeb komory a tím, ve srovnání s tradičními hořákovými technologiemi, významně zvýšit koeficient pece.

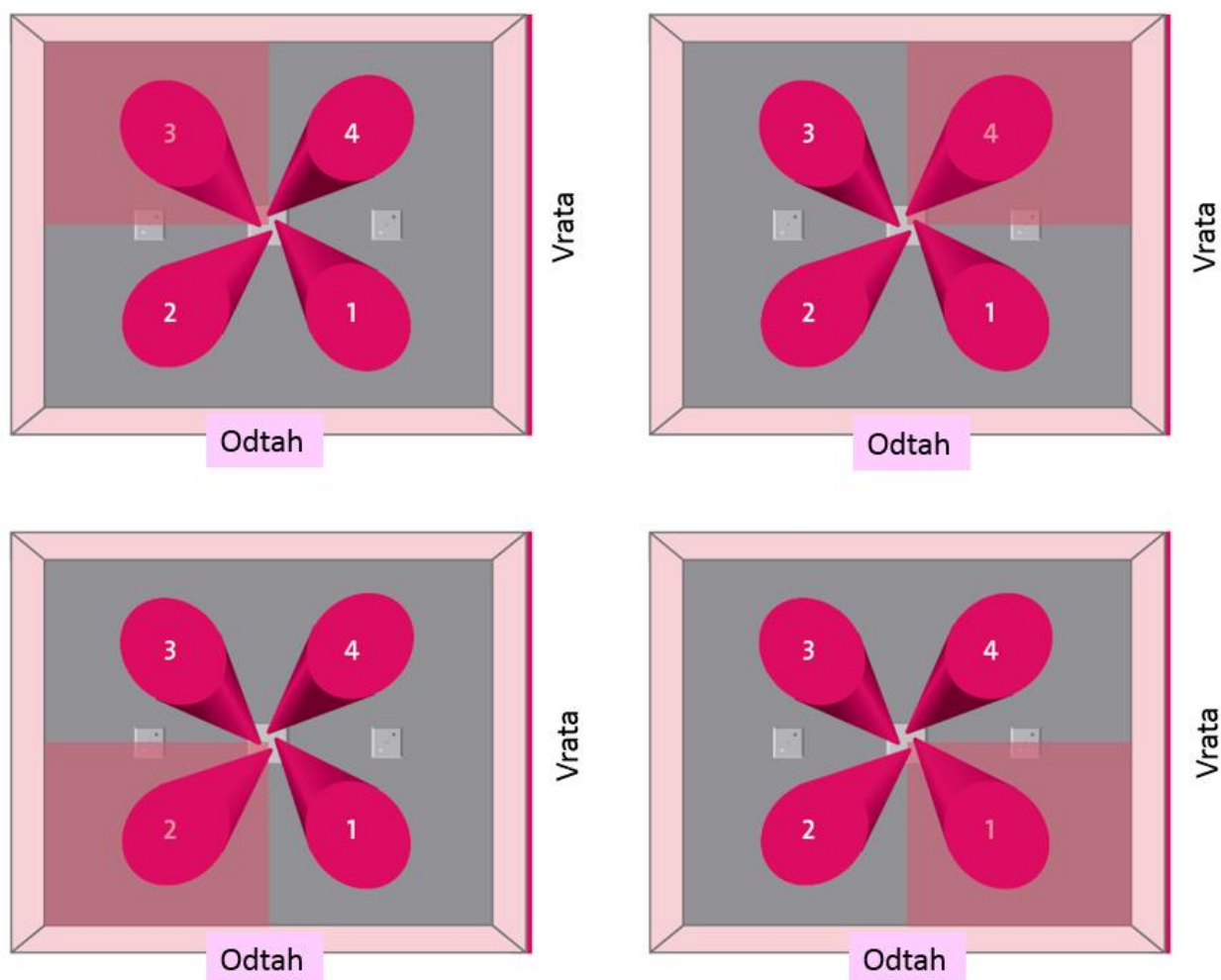


Obr. 3: Realizační strategie pro hořák s proměnným ohřevem

Nejrychlejší formou přenosu tepla je přímý dopad plamene na vsázku kovu. Je ovšem nutné předcházet lokálnímu přehřívání a oxidaci. Hořák s proměnným ohřevem a distribucí energie představuje inteligentní hořákovou technologii, která využívá rovnoměrné tavení v celé peci na základě informace z instalovaných sensorů a tím maximalizuje rychlost tavení.

Příklad realizace hořáku s proměnným ohřevem a distribucí energie je znázorněn na obrázku 3. Hořák je v tomto případě namontován ve stropě komory (pohled z boku a shora je znázorněn na obrázku 3A a 3B) a nakonfigurován tak, aby usměrňoval energii postupně do

čtyř různých kvadrantů pece. Množství energie a čas jejího směřování do daného kvadrantu pece lze upravit na konkrétní frekvenci nebo automatizovat na základy instalovaných senzorů (tzv. autopilot). Do chladnějších kvadrantů tak směřuje více tepla a do teplejších kvadrantů zase tepla méně. Obrázek 4 ukazuje kvadranty pece (označené červeně) postupně/cyklicky ohříváné plamenem (1-2-3-4).



Obr. 4: Kvadranty pece postupně/cyklicky ohříváné plamenem

Na obrázku 5 je fotografie hořáku s proměnným ohřevem a distribucí energie. Používá se v komorové peci na hliník v brazilském závodě společnosti ALTREF. V tomto případě hořák souběžně ohřívá dva protilehlé kvadranty. Při provozu bylo takto oproti původnímu vzduchovému režimu dosaženo 35% nárůstu produktivity, 48 % snížení spotřeby paliva a o 20 % nižších ztrát taveniny.



Obr. 5: Fotografie hořáku s proměnným ohřevem použitého v plamenné peci na hliník

Technologie hořáku s proměnným ohřevem a distribucí energie byla rovněž úspěšně realizována v komorové peci na měď v závodě SDI La Farga, kde byla těmito hořáky nahrazena část energie pece (15 %) dodávaná hořáky pro spalování s kyslíkem. Nasměrováním tepla do nejvytěžovanějšího prostoru pece bylo dosaženo nárůstu produktivity o 6 % a zlepšení měrné spotřeby paliva o 17 % v celém provozním rozsahu. Dělo se tak oproti původnímu vylepšení popsanému v části *Kombinovaný hořák Kyslík-vzduch-palivo s pružným nastavením stupně obohacení*.

Míchání používané pro zlepšení koeficientu pece: Pro zlepšení rychlosti tavení v komorových pecích se běžně používají buď mechanická nebo elektromechanická čerpadla na roztavený kov nebo míchání inertním plynem. Tyto technologie lze využívat v kombinaci se spalováním s kyslíkem velmi účinně, protože míchání kovu zlepšuje celkový koeficient komorové pece (schopnost kovu absorbovat příkon tepla) tak, že se zvyšuje konvekce v tavenině, přenáší se teplo z teplých prostorů pece do chladnějších prostorů a urychluje se přenos tepla z povrchu kovu do spodních vrstev taveniny. Kromě lepšího přenosu tepla je prospěšné míchání inertním plynem jak z důvodu odplynování (případná eliminace následného provozního kroku) tak i inertizace taveniny, aby nedocházelo k oxidaci kovu.

Tab. 3: Výpočty prokazující účinnost pohybu kovové lázně při tavení neželezných kovů

Popis	Jednotky	Bez míchání	S mícháním	Komentář
		Případ E	Případ F	
Vstupní energie	MW	6,5	5,2	
Obohacení	%	35,0	35,0	Kombinovaný hořák
Dostupná energie	%	60,30	60,30	
Faktor pece (FF)	%	63,40	80,00	Příklad
Energie do spalin	MW	2,6	2,1	
Energie do vsázky	MW	2,5	2,5	Stejný tavící výkon
Specifická spotřeba paliva	Nm ³ /Mton	76,3	60,0	19% zlepšení ve spotřebě energie
Specifická spotřeba kyslíku	Nm ³ /Mton	75,3	57,9	Další snížení spotřeby kyslíku
Objem spalin	Nm ³ /hr	4 038,0	3 649,1	

POUŽÍVÁNÍ TECHNOLOGIE SPALOVÁNÍ S KYSLÍKEM V ROTAČNÍCH A KOMOROVÝCH PECÍCH

Celková účinnost přenosu energie při procesu tavení je kombinací dostupné energie a koeficientu pece (viz část *Úvod*). Zatímco dostupná energie závisí na typu spalování, koeficient pece vychází z několika faktorů – například typu pece, její konfigurace (jeden/dva odtahy), typu a tloušťky vyzdívky, počtu a umístění hořáků vzhledem k umístění odtahu, jeho velikost apod.

Koeficient pece v případě rotačních pecí je ~85–90 %. Rotační pece tedy ke spalování téměř naplno využívají výhod efektivního tavení kyslíkovými hořáky. Spalování s kyslíkem je proto z tohoto důvodu pro rotační pece přirozenou a hojně využívanou volbou. Naopak komorové pece jsou při přenosu celkové dostupné energie na produkt účinné méně (koeficient pece ~50–65 %). Je to z důvodů minimálního přenosu tepla vedením a omezujících faktorů pro sálavý přenos tepla jako je povrch taveniny, vyzdívky a rovnoměrnost teploty lázně.

Tabulka 4 srovnává účinnost technologií spalování s kyslíkem u běžných rotačních a komorových pecí. Jak je vidět v případě 1b, celková účinnost rotační pece se 100% spalováním s kyslíkem je vysoká (67,7 %) – s 90 % (koeficient pece) a 75,2 % (dostupná energie). Oproti tomu má komorová pec se spalováním se vzduchem (případ 2) špatnou celkovou účinnost (25,6 %), což je způsobeno kombinací nižší dostupné energie (42,7 %) a nízkým koeficientem pece (60 %). Dále v případě komorových pecí případy 3 a 4 ukazují, jak lze pomocí spalování s kyslíkem nebo obohaceným vzduchem významně zvýšit dostupnou energii a mírně vylepšit koeficient pece tím, že se zvýší teplota spalin a jejich setrvání v peci.

Tab. 4 Souhrn různých dostupných možností pro zlepšení produktivity a účinnosti

Popis	Jednotky	Rotační		Komorová				
		Případ 1A	Případ 1B	Případ 2	Případ 3	Případ 4	Případ 5	Případ 6
		Vzduchové spalování	Kyslíkové spalování	Vzduchové spalování	Kombinované spalování	Kyslíkové spalování	THB hořáky	THB hořáky + míchání
Dostupná energie	%	42,7	75,2	42,7	60,3	75,2	75,2	75,2
Faktor pece (FF)	%	83,3	90,0	60,0	63,4	65,7	75,0	85,0
Celková účinnost	%	35,6	67,7	25,6	38,2	49,4	56,4	63,9
Odhad spotřeby energie	Nm ³ /Mton	81	43	113	76	59	51	45

Případy 5 a 6 ukazují výhody nejpokročilejších inteligentních technologií spalování s kyslíkem, jako je například hořák s proměnným ohřevem a distribucí energie naší společnosti (viz část *Inteligentní technologie spalování s kyslíkem nové generace pro vyšší účinnost tavení*), které zlepšují výkonnost díky výhodě kyslíkového spalování a využití energie v místě její největší potřeby, následně se faktor pece zvyšuje až na 75 %. Rychlost přenosu tepla je mnohem vyšší a minimalizuje se lokální přehřívání nebo oxidace taveniny pomocí řídicí strategie regulace na základě senzorů, které zajišťují rovnoměrné rozložení energie v peci. Koeficient pece lze dále synergicky vylepšovat až na 85 % při použití míchání lázně, jež zlepšuje přenos tepla v tavenině a zvyšuje její schopnost absorbovat teplo (viz část *Míchání používané pro zlepšení koeficientu pece*). Komorová pec využívající technologie hořáků s proměnným ohřevem a distribucí energie a zároveň pohybu taveniny může dosáhnout celkové účinnosti (63,9 %) blížící se rotační peci s kyslíkovým otopem (67,7 %).

V prostředí s nižšími cenami paliva se investice do pokročilých technik optimalizace využití energie, jako je částečná nebo úplná přeměna na kyslíkové spalování a mechanické nebo plynové míchání lázně, nemusí jevit jako příliš lákavá. Nicméně, vyšší produktivita (nižší fixní

náklady na tunu produkce) při stejné spotřebě energie, dopad na životní prostředí, nižší objem spalin i prašnosti a vyšší výtěžnost kovu, vede ke krátké návratnosti této investice. Využití technologie hořáků s nastavitelným stupněm obohacování také poskytuje potřebnou flexibilitu pro splnění různých výrobních nároků i dosažení lepšího řízení provozních nákladů, zkrátka usnadňuje realizační strategii schopnou reagovat na měnící se hospodářské podmínky.

ZÁVĚR

Technologie spalování s kyslíkem se díky výhodám v oblasti produktivity a dopadů na životní prostředí u rotačních pecí používá v podstatě již několik desetiletí. Vysoká výkonnost spalování s kyslíkem v těchto pecích je především výsledkem jejich vyššího koeficientu. U komorových pecí je zavádění této technologie pomalejší kvůli jejich nižšímu koeficientu. Inteligentní technologie hořáků s proměnným ohřevem a distribucí energie společnosti Air Products však zvyšuje společně s technologiemi míchání taveniny jejich koeficient, což jim umožňuje dosahovat obdobných výsledků jako u pecí rotačních (tabulka 4). Operátoři komorových pecí nyní mohou využívat vyšší produktivity, nižší spotřeby energie na jednu tunu vsázky, snížených emisí i vyšší výtěžnosti kovu, jak je tomu u operátorů rotačních pecí již více než 25 let.

REFERENCE

- [1] Baukal, CE, „Oxygen-Enhanced Combustion“ (Spalování vylepšené kyslíkem), 2. vydání, CRC Press, ISBN 9781439862285, 2013
- [2] Palazzolo, J., Sane, A., Hewertson, R., Chaleby, N., Hilbert, D. a Yutko, J., „Customized Combustion Solution Yields Productivity Improvement for Aluminum Extruder“ (Vlastní řešení spalování vede ke zlepšení produktivity extrudéru hliníku), Light Metal Age, s. 20, srpen 2015
- [3] Gangoli, SP, Slavejko, AG, Buzinski, MD, „Staged Oxy-Fuel Burners and Methods for Using the Same“ (Dělené hořáky pro spalování s kyslíkem a způsob jejich použití), americký patent 9,664,381, 2017.
- [4] Hewertson, R. J. (2000) Improvements in Scrap Recycling and Dross Processing Using Oxygen, in Recycling of Metals and Engineered Materials (Zlepšení recyklace šrotu a strusky s využitím kyslíku při recyklaci kovů a technických materiálů) (ed. D. L. Stewart, J. C. Daley and R. L. Stephens), John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA. doi: 10.1002/9781118788073.ch99
- [5] D'Agostini, M.D. High-Efficiency, High-Capacity, Low-NOx Aluminum Melting Using Oxygen-Enhanced Combustion. (Tavení hliníku spalováním podporovaným kyslíkem s vysokou účinností, vysokou kapacitou a nízkým obsahem oxidů dusíku). USA: N. p., 2000. Web. doi:10.2172/765375.
- [6] Sane, AV, Gangoli, SP, Slavejko, AG, Buzinski, MD, Cole, JD, Hendershot, RJ, He, X, „Transient Heating Burner and Method“ (Metody a hořák pro ohřev s proměnným plamenem), americký patent 9,360,257, 2014.

- [7] Gangoli, SP, Hewertson, RJ, Sane, AV, Palazzolo, JC, He, X, "Selective Oxy-Fuel Boost Burner System and Method for a Regenerative Furnace" (Výběr kyslíkových hořáku pro pece s regenerativním ohřevem), americký patent 9,657,945, 2017.
- [8] Sane, AV, Gangoli, SP, Slavejkov, AG, Buzinski, MD, Cole, JD, Hendershot, RJ, He, X, "Transient Heating Burner and Method" (Metody a hořák pro ohřev s proměnným plamenem), přihláška amerického patentu 15/148,526, 2016.



AIR PRODUCTS

Rovnoměrný ohřev Vyšší tavicí výkon

**Zvyšte výkon vaší komorové pece
využitím technologie
hořáku s proměnným ohřevem**

Díky patentovanému hořáku s proměnným ohřevem společnosti Air Products můžete dosáhnout rovnoměrnějšího ohřevu komorové pece, odstranit studené zóny a zvýšit rychlost tavení.

Jak? Pomocí nové unikátní inteligentní hořákové technologie, která na základě informací z instalovaných senzorů zajistí rovnoměrné tavení v celé peci.

Tato inovativní technologie vám přinese:

- Až o 40 % vyšší produktivitu
- Až o 40 % vyšší účinnost paliva
- Až o 20 % vyšší výtěžnost kovu

+420 800 100 700

tell me more
airproducts.cz

© Air Products and Chemicals, Inc., 2018 (41924)

Měrná elektrická vodivost a odpor podeutektického siluminu v závislosti na ošetření taveniny

Lána, I.¹⁾, Ptáček, J.²⁾

¹⁾ Slévárna a modelárna Nové Ransko, s.r.o., Ždírec nad Doubravou, iana.i@slevarna.cz

²⁾ Foundservis s.r.o. Babičkova 31, Brno, ingjiriptacek@seznam.cz

Klíčová slova

Měrná elektrická vodivost; Slitiny hliníku; Tepelné zpracování

Abstrakt

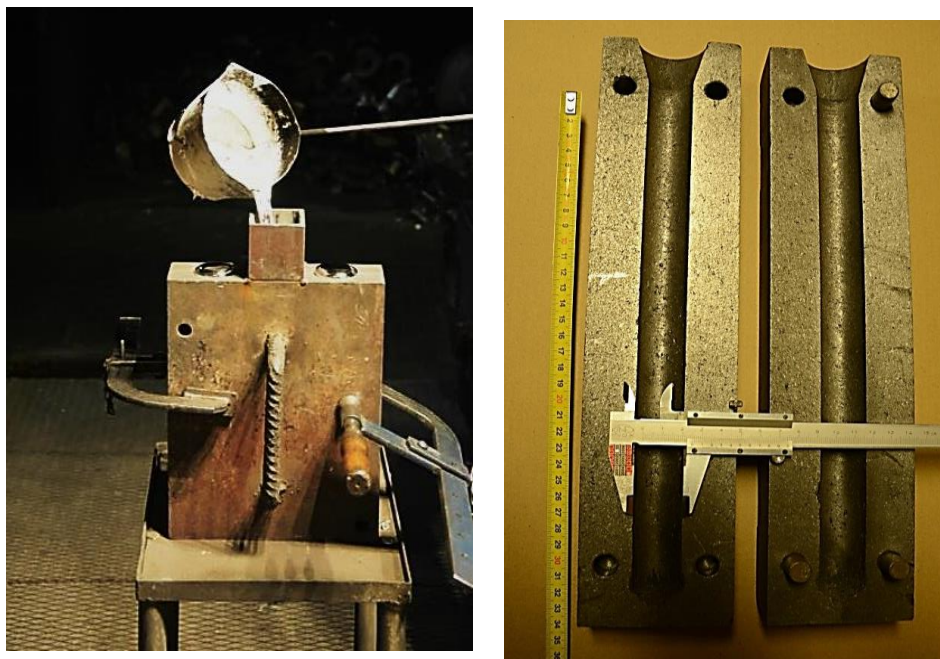
Měrná elektrická vodivost γ (MS/m) není ve slévárnách neželezných kovů doposud využívána. Prokazatelně zjištěná závislost mezi γ a vlastnostmi odlitků ze slitin hliníku s křemíkem, podle stavu ošetření, by mohla být zavedena do provozní praxe sléváren neželezných kovů jako rychlá a jednoduchá analytická metoda. Experimenty s měřením odporu ($\mu\Omega$) prokazují možnosti další obdobné analytické metody. Zkušební tělesa byla odlévána do kovové formy pro odlitky odděleně litých tyčí pro zkoušku pevnosti v tahu. Další skupina vzorků byla odlita do grafitové formy. Měrná elektrická vodivost byla zjišťována na spodních a horních plochách obou druhů zkušebních tyčí, odpor na tyčích z grafitové formy.

ÚVOD

Analytické metody využívající měrnou elektrickou vodivost (MS/m) odpor ($\mu\Omega$) nejsou ve slévárnách neželezných kovů doposud využívány. Pro třídění neželezných kovů jsou využívány měřidla uvádějící hodnoty měrné elektrické vodivosti většinou v organizacích, které se zabývají sběrem kovových odpadů. Tato okolnost a zkušenosti se zjišťováním vlastností odlitků ze slitin hliníku s křemíkem hořčíkem, mědí apod. vede autory tohoto příspěvku k uvedení poznatků, které by mohly být velmi úspěšně aplikovány v provozní praxi sléváren neželezných kovů. Obdobně lze zavést jako úspěšnou analytickou metodu i měření odporu. Provedené experimenty byly zaměřeny na odlití čtyř skupin vzorků z podeutektického siluminu AlSi10Mg. Byla použita kovová forma pro odlitky odděleně litých tyčí pro zkoušku pevnosti v tahu a grafitová forma pro odlévání vzorků pro měření odporu, z těchto vzorků byly zhotoveny i tyče pro zkoušku pevnosti v tahu.

POUŽITÉ VZORKY

Postupně byly do kovové formy (po dvou kusech, spodem) se svislou dělicí rovinou a stejně tak do grafitové formy (po jednom kusu, vrchem) čtyři skupiny vzorků.



Obr. 1: Odlévání přehřáté kovové formy, grafitová forma

Měrná elektrická vodivost

Velikost měřené plochy musí být větší, než je plocha měřicí sondy, jinak by byla zjištěná hodnota elektrické vodivosti snížena o plochu, kdy sonda měří vodivost „atmosféry“. Pro změření měrné elektrické vodivosti byl použit dotykový testr (obr. 2). Měřené plochy byly přebroušeny v obou případech na koncích zkušebních tyčí a hodnoty γ byly zjištěny na spodku (označeno S) a vršku (označeno V) tyčí. Vzorky byly měřeny v následujících čtyřech skupinách.

První skupina vzorků (14 ks) byla odlita z taveniny bez ošetření, hodnota indexu hustoty 16 byla zjištěna před litím.

Druhá skupina vzorků (12 ks) byla odlita z tekutého kovu odplyněného dusíkem.

Třetí skupina vzorků (24 ks) byla odlita ze zcela ošetřeného tekutého kovu. Odplynění dusíkem se současnou modifikací a očkováním granuláty, dávkovanými ze zásobníků odplynovacího zařízení, index hustoty 2,1. Dvojnásobný počet odlitých vzorků byl rozdělen na polovinu.

Čtvrtá skupina vzorků byla tvořena polovinou třetí skupiny, určené pro tepelné zpracování v režimu T6.



Obr. 2: Sigma testr

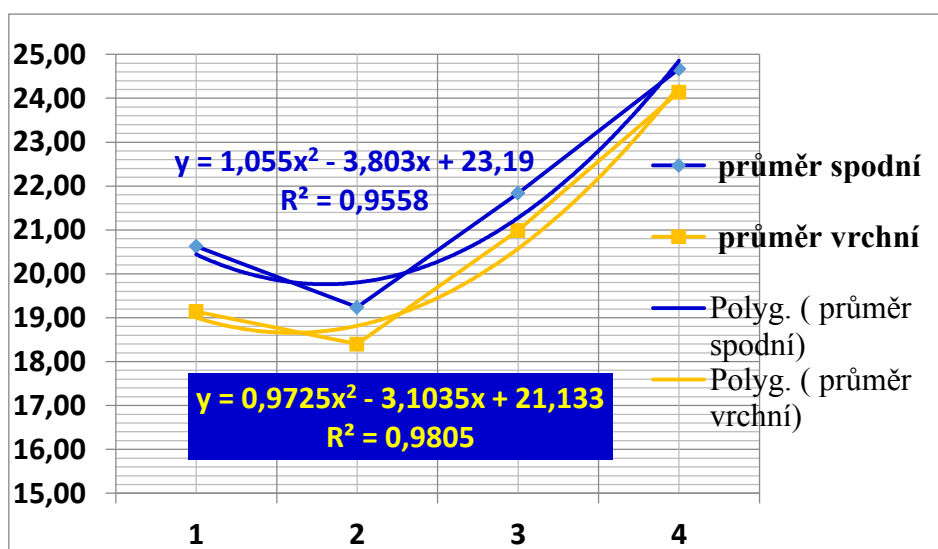
Poznámka č. 1: Režim tepelného zpracování T6 představuje homogenizační žhání při teplotě 520°C, následné rychlé ochlazení obvykle ve vodě o teplotě cca 50°C a nakonec vytvrzení při teplotě 170°C, celý proces zpravidla trvá několika 24 hodin (v závislosti na tloušťce stěn odlitků ve vsázce). Odlitky vzorků byly tepelně zpracovány s provozními vsázkami.

Z naměřených hodnot na zkušebních tyčích byly vypočteny průměry a zjištěné rozdíly byly přepočteny na procenta (Tab. I). Rozdíl průměrných hodnot v procentech je v obou případech nejvyšší u neošetřené taveniny. Z této okolnosti vyplývá, že největší výskyt nečistot a bublin je bez ohledu na způsob plnění ve vršku zkušební tyče.

Tab. 1: Měrná elektrická vodivost

kovová forma měrná elektrická vodivost [MS/m]					grafitová forma měrná elektrická vodivost [MS/m]			
stav tekutého kovu	bez ošetření	odplyně no N ₂	ošetřen o	vytvrzeno T6	bez ošetření	odplyně no N ₂	ošetřen o	vytvrzeno T6
číselně								
průměr spodní	20,63	19,24	21,84	24,67	17,88	18,05	20,74	22,25
průměr vrchní	19,14	18,40	20,99	24,14	17,51	16,23	19,27	21,36
rozdíl %	7,22	4,37	3,89	2,15	8,33	4,65	4,10	2,38

Z průměrných hodnot byly sestaveny diagramy (obr. 3 a 4).



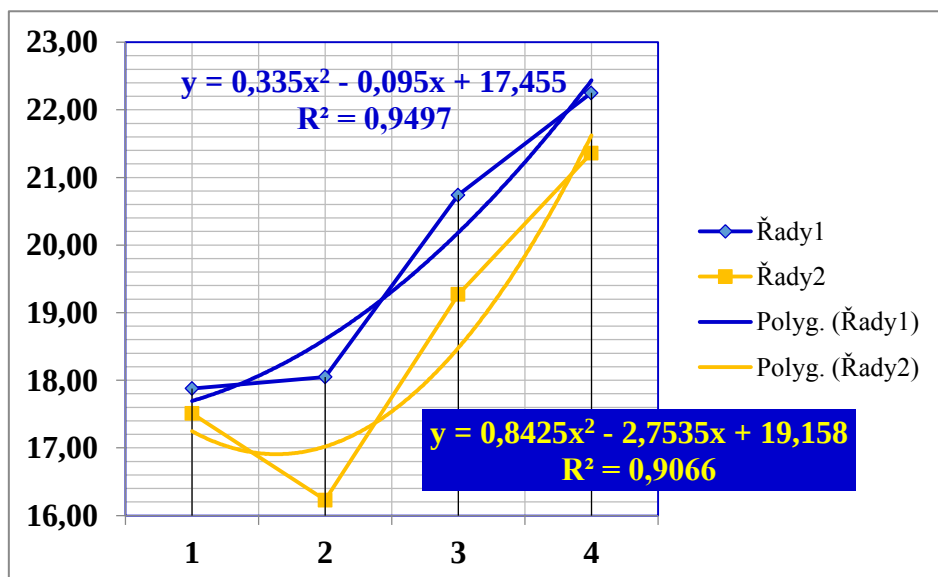
Obr. 3: Závislost měrné elektrické vodivosti na stavu vzorků (kovová forma)

V tomto případě byla zvolena vhodná jednoduchá funkce (polynom druhého stupně = Polyg.) a zjištěný koeficient determinace prokázal vysoký stupeň korelace. Odtud lze z libovolné hodnoty měrné elektrické vodivosti vypočítat údaj pro ostatní tři stavy tekutého kovu.

Příklad výpočtu hodnoty třetí spodní skupiny:

$$\gamma = 1,055 \cdot 3^2 - 3,803 \cdot 3 + 23,19 = 21,28 \text{ MS/m.}$$

Je v souladu s naměřenými hodnotami (21,22; 20,97; 21,25; 20,57; 21,31; 20,61) s malou odchylkou 0,56 (viz závislost obr. 3).



Obr. 4: Závislost měrné elektrické vodivosti na stavu vzorků (grafitová forma)

Obdobně bychom mohli spočítat z libovolné hodnoty měrné elektrické vodivosti údaj pro ostatní tři stavy tekutého kovu.

Vztah mezi měrnou elektrickou vodivostí a pevností v tahu a tažností

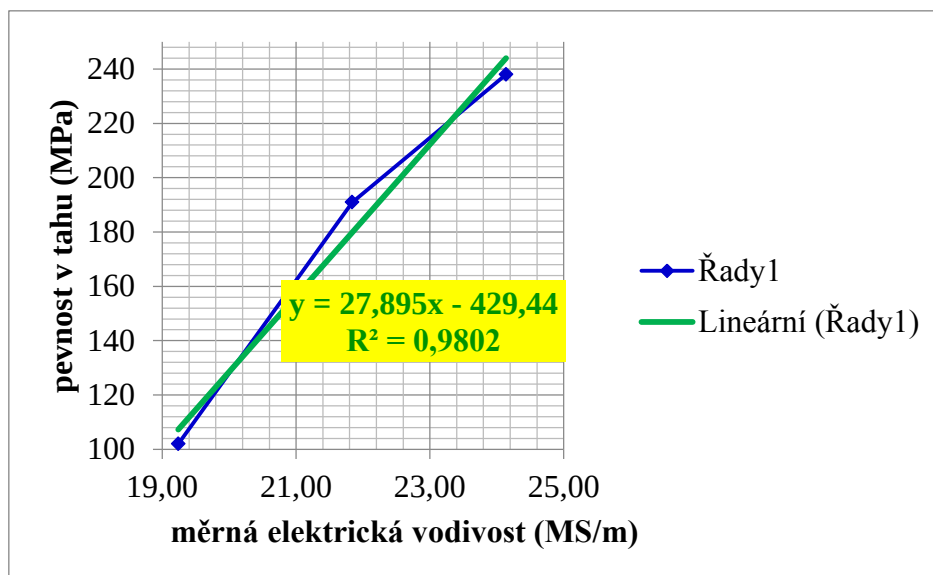
U všech odlitých vzorků obou skupin byla změřena pevnost v tahu a tažnost hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce II. Hodnoty pevnosti v tahu a tažnost byly konfrontovány s měrnou elektrickou vodivostí, údaje zjištěné z tyčí odlitých z neošetřeného kovu nebyly dále pro hodnocení závislostí využity, protože neošetřený kov se praxi k odlévání převážně nepoužívá.

Zjištěné průměry hodnot měrné elektrické vodivosti a pevnosti v tahu jsou shrnuty v následující tabulce II.

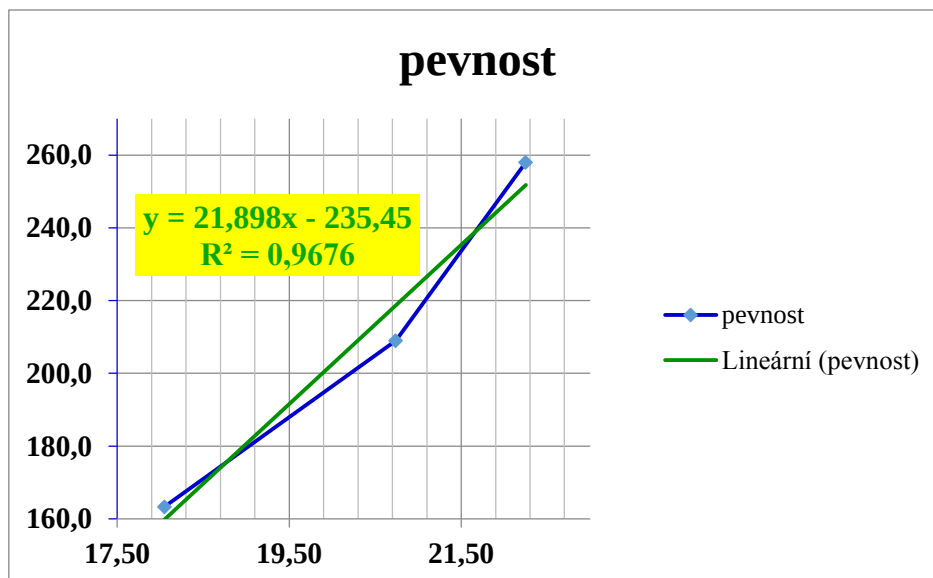
Tab. 2: Zkoušky pevnosti v tahu

stav kovu	měrná elektrická vodivost (MS/m), kovová forma	pevnost (MPa)	měrná elektrická vodivost (MS/m), grafitová forma	pevnost (MPa)
2 odplyněno	19,24	102	18,05	163
3 zcela ošetřeno	21,84	191	20,74	209
4 tepelně zpracováno	24,14	238	22,25	258

Grafické znázornění údajů z tabulky II je uvedeno na následujících obr. 5 a 6, nejlepší koeficient determinace vychází u lineární funkce, pro výpočet pevnosti v tahu tedy postačí zjištění měrné elektrické vodivosti a k určení stavu kovu lze s přijatelnou přesností usuzovat, zda byla zkušební tělesa odlita z odplyněného, zcela ošetřeného nebo tepelně zpracovaného kovu.



Obr. 5: Vztah mezi měrnou elektrickou vodivostí a mezi pevností v tahu vzorků z kovové formy



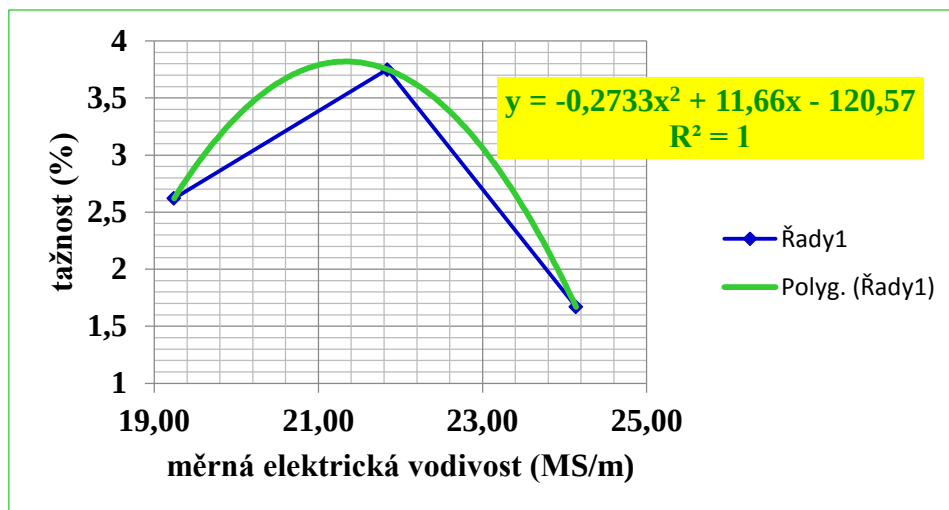
Obr. 6 Vztah mezi měrnou elektrickou vodivostí a mezí pevnosti v tahu vzorků z grafitové formy

Zjištěné průměry hodnot měrné elektrické vodivosti a tažnosti jsou shrnuty v následující tabulce III.

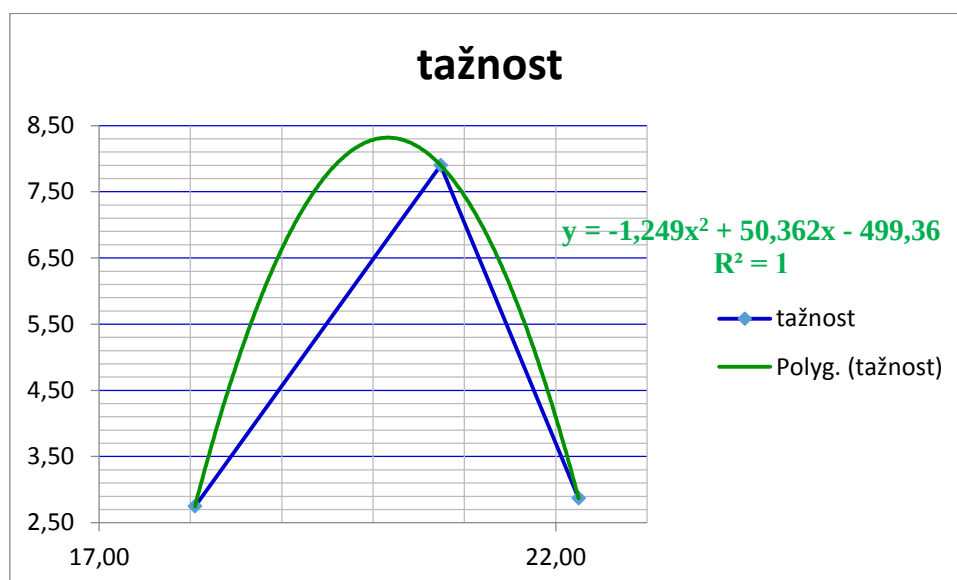
Tab. 3: Tažnost

stav kovu	měrná elektrická vodivost (MS/m), kovová forma	tažnost (%)	měrná elektrická vodivost (MS/m), grafitová forma	tažnost (%)
2 odplyněno	19,24	2,62	18,05	2,75
3 zcela ošetřeno	21,84	3,75	20,74	7,90
4 tepelně zpracováno	24,14	1,67	22,25	2,87

Grafické znázornění údajů z tabulky IV jsou na následujícím obr. 7 a 8, koeficient determinace vychází u polynomu druhého řádu u kovové formy $R^2=1$, u grafitové rovněž $R^2=1$.



Obr. 7: Vztah mezi měrnou elektrickou vodivostí a tažností vzorků z kovové formy



Obr. 8: Vztah mezi měrnou elektrickou vodivostí a tažností vzorků z grafitové formy

Pro výpočet tažnosti je zjištění měrné elektrické vodivosti k určení stavu kovu spíše orientační, protože lokální maximum obou polynomů druhého stupně převyšuje hodnot tažnosti. Pro praktické použití by tedy bylo výhodnější rozdělit závislost na dvě lineární funkce tj. v intervalech (odplyněno; ošetřeno) a (ošetřeno; tepelně zpracováno).

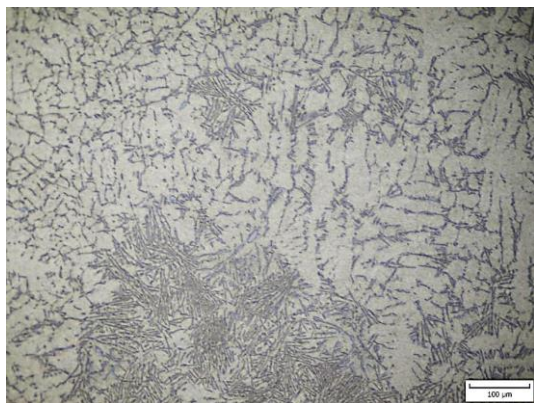
DALŠÍ EXPERIMENTY S GRAFITOVOU FORMOU

Pro měření odporu v $\mu\Omega$ byly využity přístroje ze dvou nezávislých pracovišť (JAP přístroj Resistomat 2316, MEATEST Brno). Po obrobení byla provedena měření pevnosti v tahu.

Výsledky byly analogicky zpracovány. Protože zkušební tyče pro zkoušku pevnosti v tahu byly obrobeny, lze očekávat rozdíly v získaných hodnotách. Grafitová forma odvádí teplo rychleji než kovová, proto byly dosaženy vyšší hodnoty pevnosti v tahu, viz tabulka II a III.

Metalografická šetrení

Rozdíl průměrných hodnot v procentech je opět nejvyšší u neošetřené taveniny (viz kapitola 2.1, tabulka I) a největší výskyt nečistot a bublin je při plnění zkušebních tyčí spodem ve vršku zkušební tyče. Toto konstatování potvrzují následující snímky na obr. 9, 10, 11, 12, 13, 14, provedené ze vzorků odlitých do grafitové formy. Struktura je jemnější, neboť odvod tepla grafitové formy je vyšší, než je tomu u kovové formy.



Obr. 9: Vzorek bez ošetření spodní, zvětšeno 500x



Obr. 10: Vzorek odplyněno N₂ spodní, zvětšeno 500x

Na obou snímcích ze spodní části vzorků je křemíkové eutektikum jehlicovité, struktura není homogenní, zejména u vzorku bez ošetření. Snímky potvrzují, že ve spodní části vzorků je kov bez jakékoliv porezity.



Obr. 11: Vzorek ošetřený vrchní, zvětšeno 100x



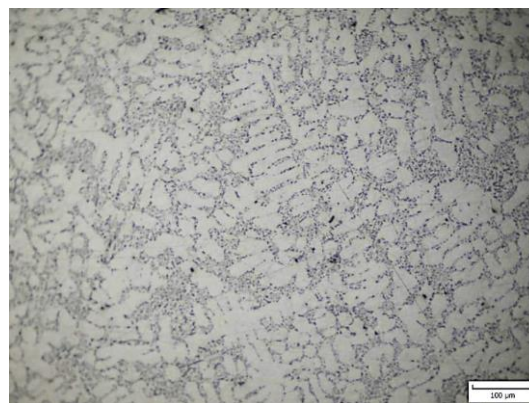
Obr. 12: Vzorek ošetřený spodní, zvětšeno 500x

Na levém snímku z vrchní části vzorku jsou zjevné mezidendritické dutiny zejména u stěny, křemíkové eutektikum je zrnité.

Na pravém snímku ze spodní části vzorku je pravidelné rozložení dendritů α fáze, křemíkové eutektikum je zrnité.



Obr. 13: Vzorek ošetřený TZ vrchní, zvětšeno 100x



Obr. 14: Vzorek ošetřený TZ spodní, zvětšeno 500x

Na levém snímku z vrchní části vzorku jsou zjevné rozsáhlé mezidendritické dutiny, křemíkové eutektikum je zrnité.

Na pravém snímku ze spodní části vzorku je pravidelné rozložení dendritů α fáze, křemíkové eutektikum je zrnité, drobné vměstky nejsou typické. Pevnost v tahu o 20MPa vyšší (jemnější zrna) než u vzorku ošetřeného a rovněž tepelně zpracovaného z kovové formy.

Oba vzorky byly zcela ošetřeny a tepelně zpracovány (T6 = rozpouštěcí žíhání a vytvrzení).

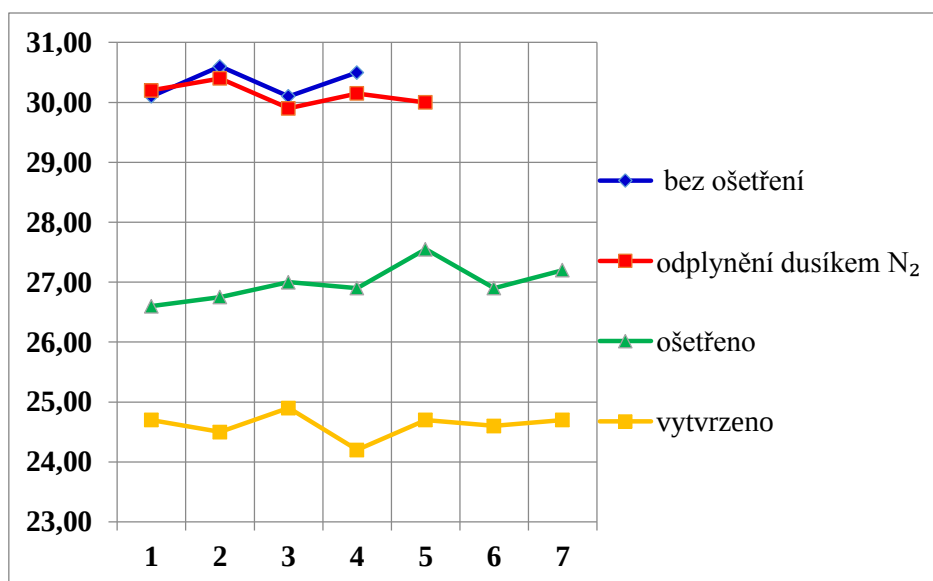
Vztah mezi odporem a stavem kovu

Hodnoty odporu byly zjištěny ve dvou nezávislých laboratořích. Zjištěné údaje z první laboratoře jsou uvedeny v následující tabulce IV (vzdálenost mezi snímacími hroty 260 mm).

Tab. 4: Odpor ($\mu\Omega$)

odpor [$\mu\Omega$], první laboratoř				
stav tekutého kovu	bez ošetření	odplynění dusíkem N ₂	ošetřeno	vytvrzeno
č. vzorku	1	2	3	4
1	30,10	30,20	26,60	24,70
2	30,60	30,40	26,75	24,50
3	30,50	29,90	27,00	24,90
4	30,10	30,15	26,90	25,20
5		30,00	27,55	24,70
6			26,90	24,60
7			27,20	24,70
průměr	30,33	30,13	26,99	24,76

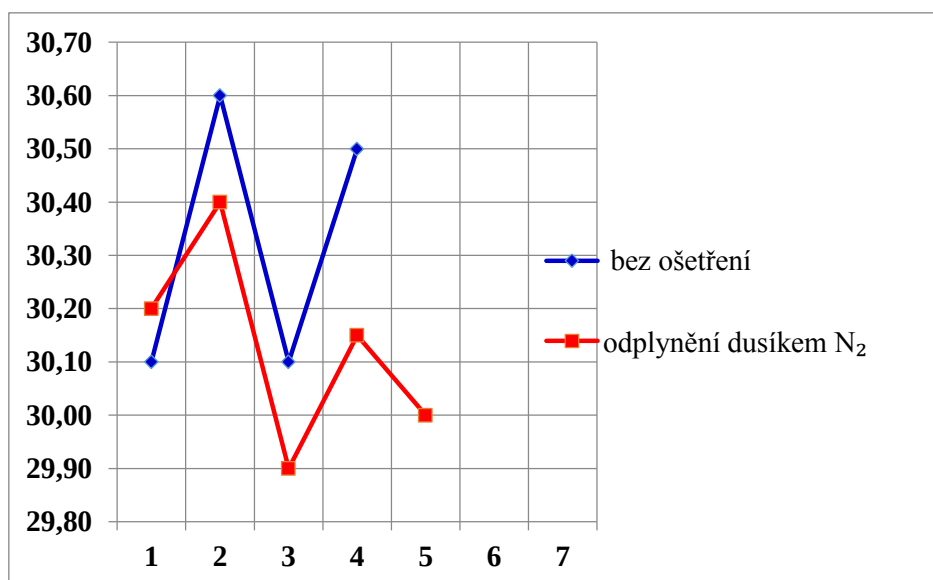
Z naměřených údajů byly sestrojeny grafy na následujících obrázcích.



Obr. 15: Hodnoty hladin odporu v závislosti na stavu kovu

Z průběhu jednotlivých hladin odporů je zjevné, že mezi stavem kovu bez ošetření a po odplynění dusíkem není významný rozdíl, hladiny stavů po odplynění, ošetření a po tepelném zpracování jsou již v cca desetiprocentních odstupech.

Detailnější pohled na hodnoty odporů ve stavu bez ošetření a po odplynění prokazuje překrývání odchylek od průměrů obou stavů v několika procentech (obr. 16).



Obr. 16: Detail hladin odporu kovu bez ošetření a po odplynění dusíkem

Vliv způsobu ošetření kovu na odpor je patrný z obr. 17, zcela přesvědčivě klesá odpor ze stavu neošetřeného do stavu ošetřeného a tepelně zpracovaného až o cca 20 %.



Obr. 17: Vliv způsobu ošetření kovu na odpor

K ošetření kovu bylo využito inertního bezvodého dusíku, modifikace sodíkem a očkování titanborem.

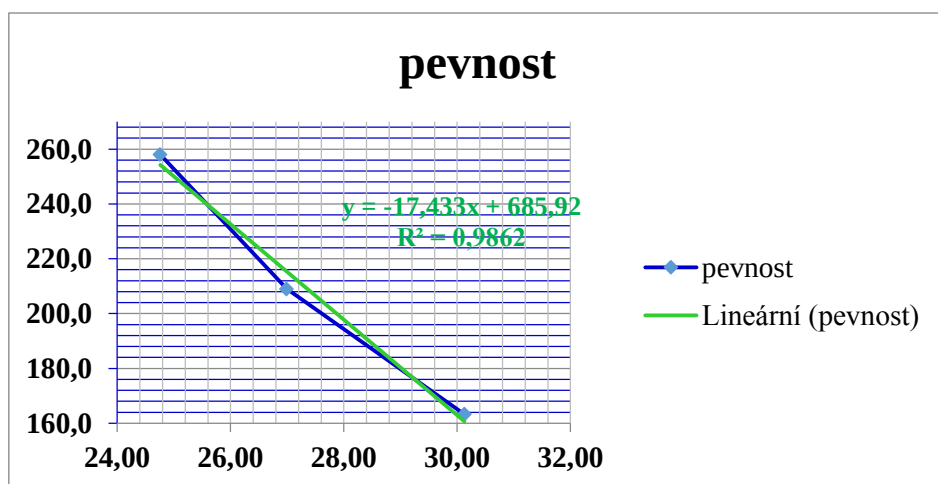
Vztah mezi odporem a pevností v tahu a tažností

Hodnoty pevnosti v tahu a tažnosti jsou uvedeny v následujících tabulkách V a VI. Rozdílné vzdálenosti mezi snímacími hroty 100 mm (druhá laboratoř) jsou přepočteny na srovnatelné údaje pro vzdálenost 260 mm (první laboratoř). Za předpokladu, že Ø 24 mm zkušební tyče umožňuje považovat závislost vzdáleností snímacích hrotů při měření odporu za lineární.

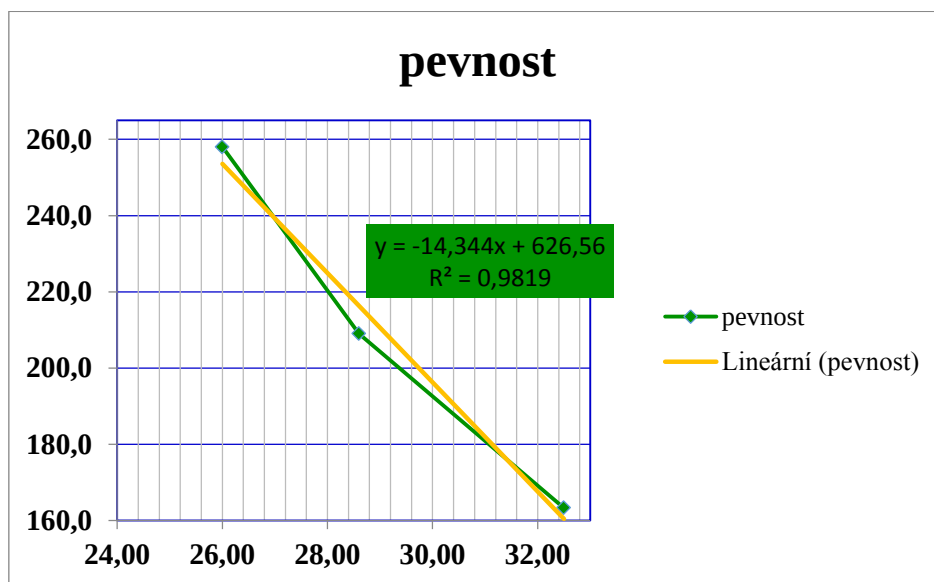
Tab. 5: Zkoušky pevnosti v tahu

stav kovu	první laboratoř odpor (μΩ)	druhá laboratoř odpor (μΩ)	pevnost (MPa)
1 bez ošetření	30,33	31,20	190,0
2 odplyněno	30,13	32,50	163,3
3 zcela ošetřeno	26,99	28,60	209,0
4 tepelně zpracováno	24,76	26,00	258,0

Grafická znázornění závislosti údajů odporu na pevnosti z tabulky V jsou uvedeny na následujících obr. 18 a 19, nejlepší koeficient determinace vychází v obou případech u lineární funkce, pro výpočet pevnosti v tahu tedy postačí zjištění odporu. K určení stavu kovu lze s přijatelnou přesností usuzovat, zda byla zkušební tělesa odlita ze stavu odplyněného, zcela ošetřeného nebo tepelně zpracovaného kovu (v praxi téměř nepoužívá kov bez ošetření, postačí vycházet z odplyněného, zcela ošetřeného a tepelně zpracovaného kovu).



Obr. 18: Vztah mezi odporem a pevností vzorků v tahu (první laboratoř)



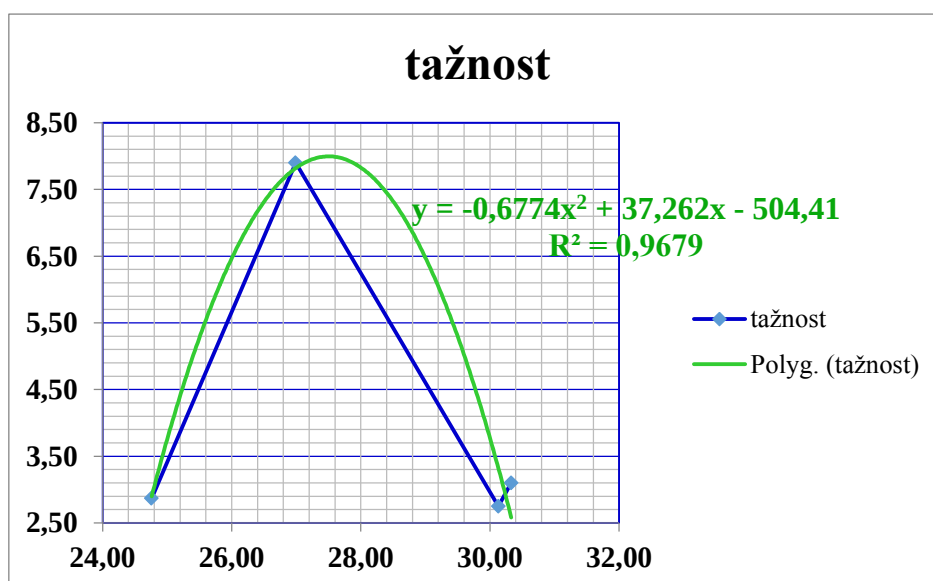
Obr. 19: Vztah mezi odporem a pevností vzorků v tahu (druhá laboratoř)

Obdobně lze postupovat s průměry hodnot odporu ve vztahu k tažnosti (tabulka VI).

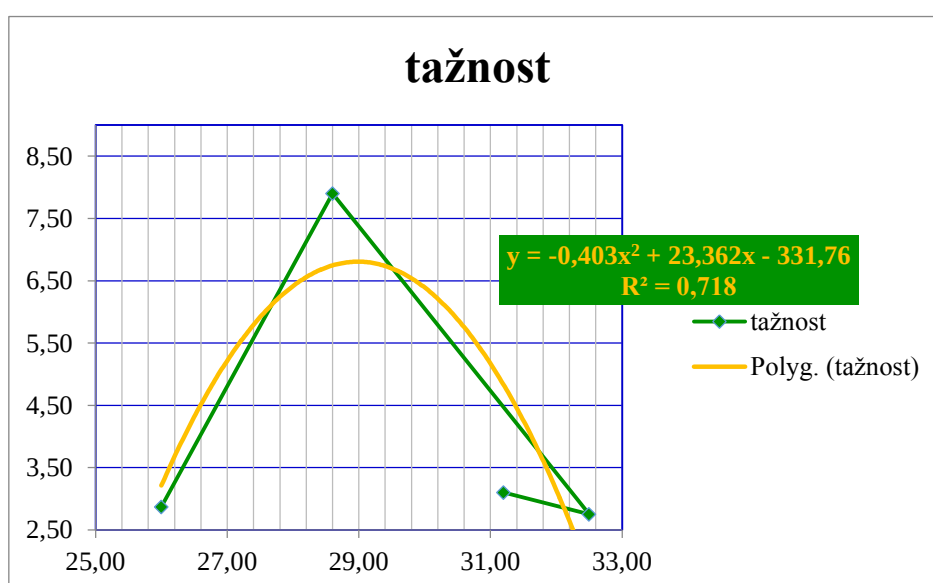
Tab. 6: Tažnost

stav kovu	první laboratoř odpor (μΩ)	druhá laboratoř odpor (μΩ)	tažnost (%)
1 bez ošetření	30,33	31,20	3,10
2 odplyněno	30,13	32,50	2,75
3 zcela ošetřeno	26,99	28,60	7,90
4 tepelně zpracováno	24,76	26,00	2,87

Grafické znázornění údajů z tabulky VI jsou na následujícím obr. 20 a 21.



Obr. 20: Vztah mezi odporem a tažností vzorků (první laboratoř)



Obr. 21: Vztah mezi odporem a tažností vzorků (druhá laboratoř)

Tažnost je vyjádřena polynomy druhého řádu $y = -0,6774x^2 + 37,262x - 504,41$ (první laboratoř), $y = -0,403x^2 + 23,362x - 331,76$ (druhá laboratoř). Výsledky z obou nezávislých laboratoří nejsou ve shodě, proto i zde autoři doporučují posuzovat tažnost v intervalech (odplyněno; zcela ošetřeno) a (zcela ošetřeno; tepelně zpracováno).

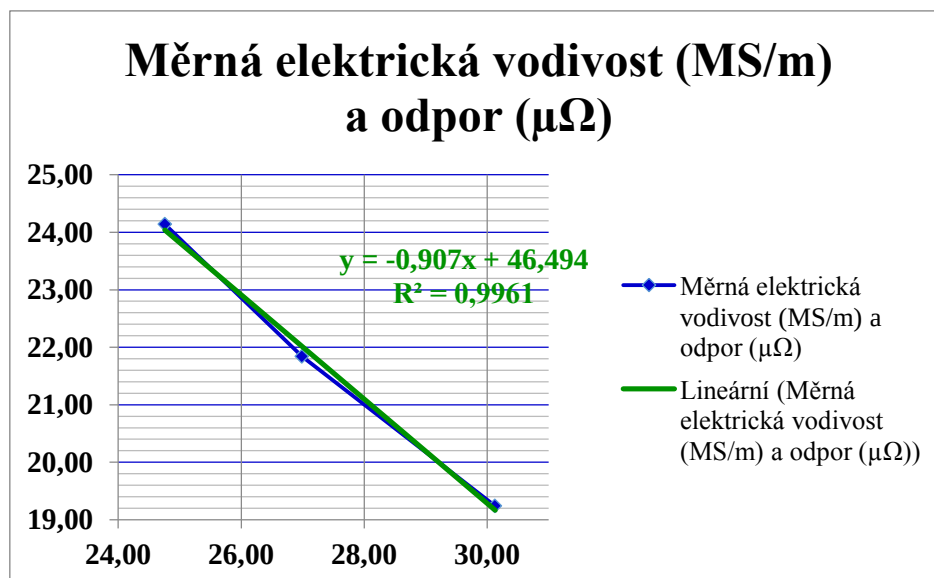
Závislost mezi odporem a měrnou elektrickou vodivostí

Pro praktické účely v provozních podmínkách jsou obě analytické metody měření využitelné, samozřejmě je nutné pořídit buď SIGMATESTR nebo měřidlo (ohmmetr), schopné s přijatelnou přesností v $\mu\Omega$, tedy s rozlišením v řádu $10^{-6} \Omega$. V následující tabulce XIV jsou uvedeny průměry odporu z provedených měření v $\mu\Omega$ a průměry měrné elektrické vodivosti v MS/m.

Tab. 7: Průměrné hodnoty odporu a měrné elektrické vodivosti

stav kovu	odpor ($\mu\Omega$)	MEV (MS/m)
1 bez ošetření	30,33	20,6
2 odplyněno	30,13	19,24
3 zcela ošetřeno	26,99	21,84
4 tepelně zpracováno	24,76	24,14

Grafické znázornění závislosti je uvedeno na obr. 22.



Obr. 22: Vztah mezi měrnou elektrickou vodivostí a odporem vzorků

Lineární závislost (nepřímá úměrnost) má dostatečně vysoký koeficient determinace, takže k přepočtu lze použít vztah $y = -0,907x + 46,494$ (zaokrouhláno: $y = -x + 47$) pro výpočet měrné elektrické vodivosti z hodnot odporu a podobně vztah $x = -1,103 - 51,231$ (zaokrouhláno: $x = -y - 51$) pro výpočet odporu z hodnot měrné elektrické vodivosti.

ZÁVĚRY

Experimenty přinesly poznatky, které mohou být aplikovány v provozní praxi.

Byla prokázána analogie při měření odporu a souvislost měrné elektrické vodivosti s odporem u slitiny AlSi10Mg, dále analogické vztahy mezi odporem a pevností i tažností.

Souvislost měrné elektrické vodivosti a odporu s morfologií a velikostí strukturálních složek slitiny AlSi10Mg.

Mimo to lze identifikovat vnitřní kvalitu odlitků, kvalitu rafinace a tepelného zpracování oběma analytickými metodami.

Možnost třídit suroviny touto metodou je delší dobu známa.

Měřením odporu ve dvou nezávislých laboratořích bylo zjištěno, že lze rozšířit poznatky i pro litinu (zušlechťená litina s lupínkovým grafitem má odpor v rozmezí 360 až 382 $\mu\Omega$).

PODĚKOVÁNÍ

Autoři děkují pracovníkům společnosti Slévárna a modelárna Nové Ransko, s.r.o. za pomoc při realizaci experimentů a vedení firmy RECYCLING Chrudim za zapůjčení SIGMA testru, za změření odporu firmě MEATEST Brno a JAP Industries.

SEZNAM LITERATURY:

- [1] PTÁČEK, J., LÁNA, I., Závislost elektrovodivosti odlitků ze slitin neželezných kovů na velikosti zrna základních strukturních fází 7. Holečkova konference, Hotel OREA 9 skal, sborník přednášek s. 5 - 14.
- [2] PTÁČEK, J. (2017). Elektrická vodivost vzorků siluminů, vlastní vydání, Brno, text a list 1., tabulky, diagramy
- [3] LÁNA, I., Měrná elektrická vodivosti k hodnocení vlastností slitin neželezných kovů, Slévárenství · LXVI · březen–duben 2018 3–4 s. 102 - 108

Mikrostruktura odlitků kovových hub z hliníkové slitiny AlSi10MgMn

Merta, V.¹⁾, Kroupová, I.¹⁾, Lichý, P.¹⁾, Radkovský, F.¹⁾

¹⁾ VŠB – TU Ostrava, 17. listopadu 15/2172, Ostrava – Poruba, vaclav.merta@vsb.cz

Klíčová slova

Kovová houba; Slévárenství; Přesné lití; Mikrostruktura; Silumin

Abstrakt

Cílem této práce je analýza mikrostruktury odlitků kovových hub vyrobených z hliníkové slitiny AlSi10MgMn pomocí optimalizované technologie přesného lití využívající odpařitelného polyuretanového pěnového modelu. V rámci hodnocení byl sledován vliv rozdílných ochlazovacích podmínek v jednotlivých částech odlitků na výsledný charakter příslušné mikrostruktury. Celkově pak byla ve směru plnění pozorována závislost charakteru mikrostruktury na vzdálenosti od zářezu.

ÚVOD

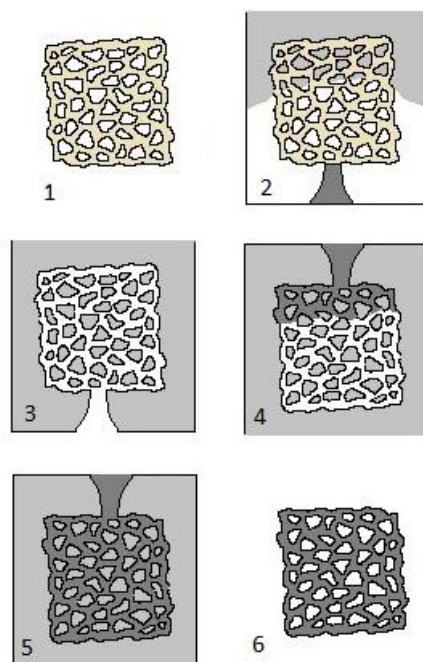
Kovové pěny resp. kovové porézní materiály s celulární strukturou, jsou moderní progresivní materiály s obrovským aplikačním potenciálem. Do dnešních dnů byla objevena a popsána celá řada výrobních metod, jimiž se získávají kovové pěny o různých strukturách, pórovitosti a mechanických i užitných vlastnostech. Přestože výrobě, vlastnostem a využití těchto materiálů byla věnována značná pozornost, výzkum mikrostruktury doposud poněkud zaostává. Jistou omluvou v tomto směru může být skutečnost, že provedení mikrostrukturní analýzy u tak tenkostěnných materiálů, jakými jsou kovové pěny, je poměrně náročný úkol. Avšak s ohledem na fakt, že právě charakter mikrostruktury mnohdy rozhoduje nejen o mechanických, ale i o funkčních vlastnostech daného materiálu, by mikrostrukturní výzkum neměl být opomíjen.

DVOUSTUPŇOVÝ PROCES PŘESNÉHO LITÍ S VYUŽITÍM ODPAŘITELNÉHO POLYURETANOVÉHO (PUR) MODELU

Tento proces je mezi ostatními metodami výroby kovových pěn jedinečný. Umožňuje získat kovovou houbu [1], se stochasticky uspořádanými, plně otevřenými a propojenými póry, při pórovitosti až 97% [2] Dalšími přednostmi jsou velký specifický povrch a kompaktní charakter kovové matrice. V kombinaci s výběrem slitiny o vhodných vlastnostech se tak jedná o materiál s širokou škálou uplatnění, zejména v oblasti funkčních součástí (pasivní chladiče, výměníky tepla, nosiče katalyzátorů, filtry apod.) [3].

Princip technologie

Principem této metody (Obr. 1) je zalití modelu z polymerní pěny (1) vhodným žáruvzdorným materiálem (2), následuje sušení a žíhání formy. Během žíhání dochází k odpaření polymerního pěnového modelu. Toto vytváří dutinu (3), do které je následně odléván roztavený kov (4). Po odstranění žáruvzdorného materiálu (5) je získán odlitek kovové houby (6), který je přesnou kopií pěnového modelu. [4]



Obr. 1: Princip technologie dvoustupňového procesu přesného lití s využitím odpařitelného polyuretanového modelu

Specifika výrobního procesu

Jistým úskalím této technologie je skutečnost, že se jedná o velmi tenkostěnné a konstrukčně složité odlitky. V řadě případů se tak u zkušebních odlitků v předchozím výzkumu vyskytovaly vady nezaběhnutí či značné strukturní heterogenity, která byla příčinou nevyhovujících mechanických vlastností. Dostatečné zabíhavosti je totiž dosahováno pomocí vysokých teplot lití i teplot formy, a plnění dutiny formy taveninou za sníženého či zvýšeného tlaku. Takové podmínky sice podporují potřebnou zabíhavost, avšak jsou poměrně nepříznivé pro následnou krystalizaci a tuhnutí odlitku. Pro spolehlivou výrobu jakostních odlitků je tedy nutné najít jistý kompromis. Za účelem optimalizace výrobního procesu proto byla v předchozím výzkumu provedena experimentální studie závislosti zabíhavosti na teplotě lití a teplotě formy na příkladu hliníkové slitiny AlSi10MgMn. Nalezené optimalizované podmínky výrobního procesu pak byly využívány při výrobě odlitků pro pozorování mikrostruktury.

EXPERIMENT

Zkušební vzorky litých hub ze slitiny hliníku o rozměrech 50x50x20 mm byly vyráběny pomocí výše popsané metody "dvoustupňového procesu přesného lití s využitím odpařitelného modelu". Průběh přípravy vzorků je podrobněji popsán v následujícím textu.

Materiály

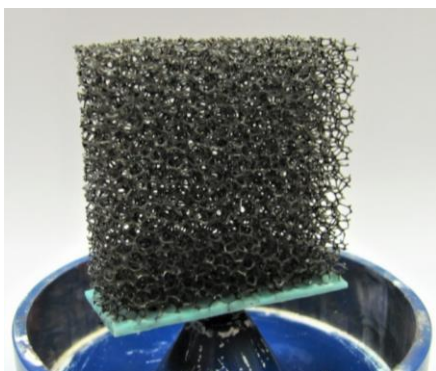
Výchozím materiálem pro výrobu zkušebních odlitků byla hliníková slitina AlSi10MgMn v běžné technické čistotě. Jedná se o mírně podeutektický silumin, který je díky obsahu doprovodných prvků možno vytvrzovat pomocí tepelného zpracování. Slitina je předmodifikována stronciem. Pro účely výroby modelu bylo využíváno PUR pěny zn. Bulpren S 32450 (Eurofoam TP s.r.o., CZ) o pórovitosti 10 PPI a relativní hustotě cca 3%. Pěna byla

používána ve výchozím stavu bez dalších povrchových úprav. Formy byly vyráběny ze speciální klenotnické sádrové směsi Eurovest (SRS Ltd, UK).

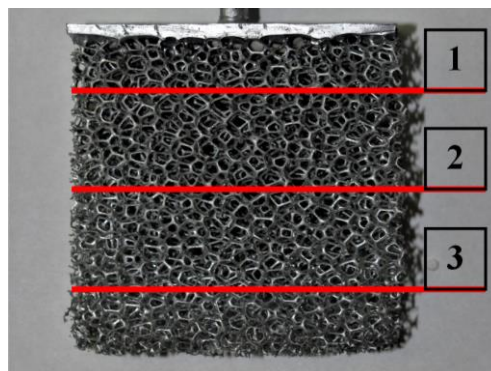
Příprava vzorků

V rámci experimentu byla ověřována metoda plnění odlitku přes plnou stěnu (např. [5]), která byla na pěnovém modelu zhotovena z technického vosku. Připravený model (Obr. 2) byl za sníženého tlaku zalit do namíchané sádrové směsi. Následně byly formy žíhány v odporové peci dle žíhacího cyklu doporučeného výrobcem. Tavení a odlévání pak probíhalo v uzavřené komoře zařízení Indutherm MC15, za kombinace působení sníženého tlaku a následného přetlaku po dolití. Při výrobě byly dodržovány experimentálně stanovené optimalizované podmínky výrobního procesu: teplota lití 740°C, teplota formy 540°C.

Vliv různých ochlazovacích podmínek na charakter mikrostruktury byl sledován ve třech horizontálních řezech (podle schematu na Obr. 3; 1=10 mm od zářezu, 2=25 mm od zářezu, 3=40 mm od zářezu). Z jednotlivých řezů pak byly pro účely metalografického rozboru použity jejich středové části, které byly pro provedení výbrusu zalité polymerní pryskyřicí.



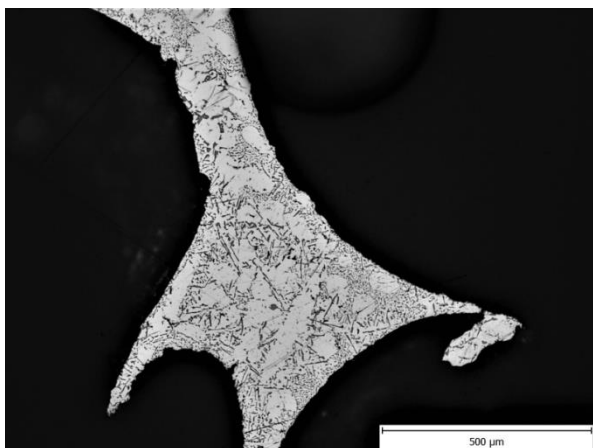
Obr. 2: Model zkušební odlitku



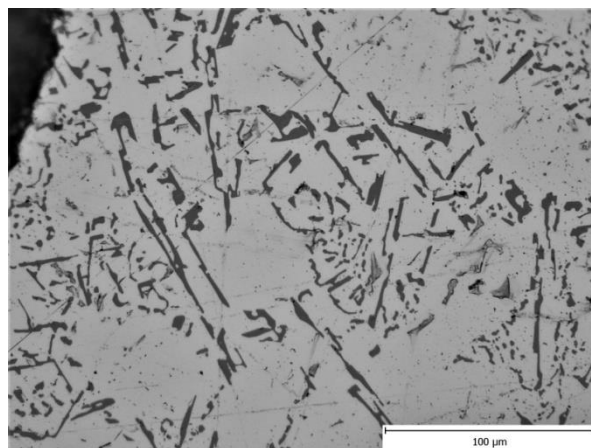
Obr. 3: Schéma řezů, ve kterých byla hodnocena mikrostruktura

VÝSLEDKY

Obr. 4 a Obr. 5 zachycují mikrostrukturu v řezu 1 (10 mm od zářezu). Ten reprezentuje část odlitku s největší průtočností. Forma je zde nejvíce prohřátá taveninou proudící touto oblastí v průběhu plnění do dalších částí odlitku. Rovněž i teplota taveniny po úplném naplnění dutiny formy je zde logicky nejvyšší, neboť se jedná o část odlitku, která je nejbližší zářezu. V neposlední řadě je tato část odlitku vystavena největší tepelné expozici způsobené tepelným vlivem masivní plné stěny, přes kterou je odlitek plněn. Všechny tyto faktory razantně ovlivňují ochlazovací podmínky. Nejteplejší tavenina zde chladne nejpomaleji. To negativně ovlivňuje proces krystalizace zejména růstem velikosti primárních zrn α -fáze i eutektického křemíku. V této části odlitku je proto možno pozorovat převládající obsah hrubozrnné struktury s nemodifikovaným eutektikem.

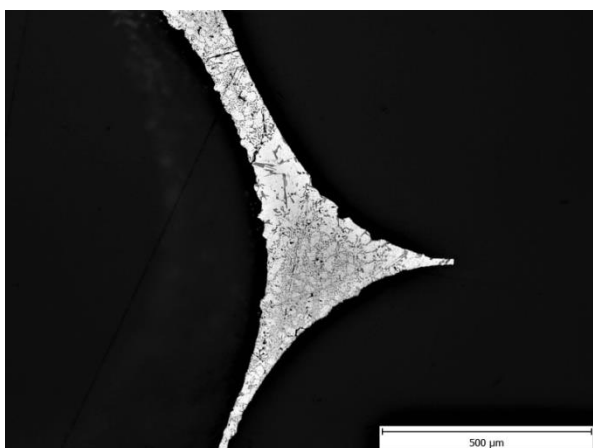


Obr. 4: Struktura v řezu 1 - zvětšení 100x

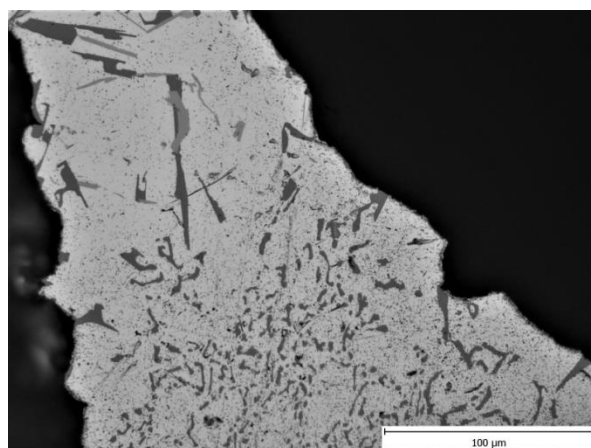


Obr. 5: Struktura v řezu 1 - zvětšení 500x

Obr. 6 a Obr. 7 zachycují mikrostrukturu v řezu 2, tedy v polovině výšky odlitku (25 mm od zářezu). Z těchto snímků je jasné, že ochlazovací podmínky v této oblasti jsou poměrně odlišné od těch, při kterých odlitek tuhl v oblasti řezu 1. To je dáno jak nižší teplotou formy, tak i nižší teplotou taveniny po naplnění a rovněž také větší vzdáleností od plné stěny a tedy snížením jejího tepelného vlivu. Oproti předchozí situaci je tak možno pozorovat nárůst výskytu modifikovaného eutektika ve struktuře.

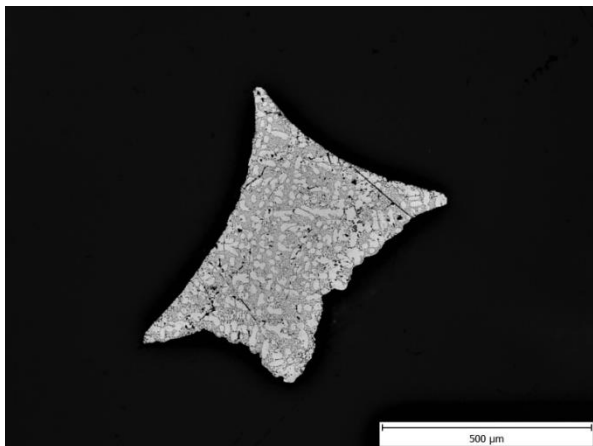


Obr. 6: Struktura v řezu 2 - zvětšení 100x

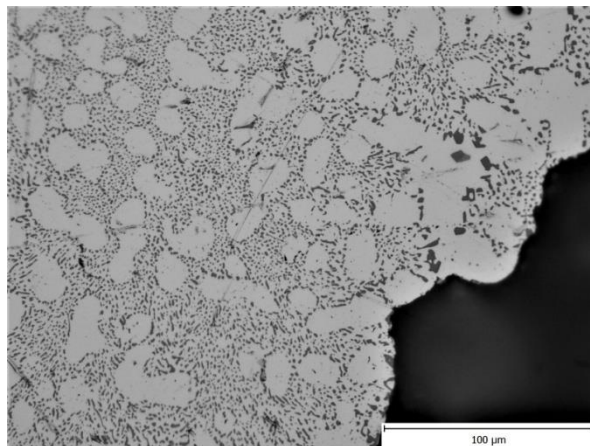


Obr. 7: Struktura v řezu 2 - zvětšení 500x

Na posledních dvou obrázcích Obr. 8 a Obr. 9 je pak zachycena mikrostruktura v řezu 3, tedy v koncové části odlitku (40 mm od zářezu). Na první pohled je patrná struktura vznikající v naprosto odlišných podmínkách ochlazování než v předchozích dvou případech. V této části odlitku je forma nejméně zahřátá proudící taveninou, tudíž má nejvyšší ochlazovací účinek. Zároveň se zde nachází nejvíce ochlazená tavenina, která jako první vstoupila do dutiny formy a při cestě do této oblasti tak předala formě největší množství tepla. Krystalizace proto probíhala rychle a na snímcích je tak jasně vidět jemnozrnnou strukturu s plně modifikovaným charakterem eutektika.



Obr. 8: Struktura v řezu 3 - zvětšení 100x



Obr. 9: Struktura v řezu 3 - zvětšení 500x

DISKUZE

Výsledky analýzy mikrostruktury odlitků hub z hliníkové slitiny poukazují na určité rozdíly v mikrostruktuře v závislosti na směru plnění. Ty jsou pravděpodobně způsobeny rozdílnými podmínkami ochlazování v jednotlivých pozorovaných částech odlitku. Vzhledem k tepelným podmínkám tuhnutí, je logické, že nejjemnější struktura (převážně modifikovaného charakteru) se nachází v části odlitku nejvzdálenější od zářezu. To je způsobeno nejrychlejším průběhem krystalizace - tuhnutí taveniny, která je nejvíce ochlazená předchozím prouděním skrz dutinu formy, probíhá v části formy, která je naopak nejméně prohřátá proudící taveninou. Podmínkám ochlazování pak odpovídá i výskyt hrubozrnnější struktury (z velké části nemodifikovaného charakteru) v oblasti blízko zářezu, kde naopak nejteplejší tavenina tuhne v nejprohřátější části formy po nejdelší dobu. Smíšený charakter struktury ve střední části odlitku pak již pouze dokresluje fakt závislosti mikrostruktury na vzdálenosti od zářezu.

Ačkoliv se logicky jedná o přirozené chování tuhnoucí taveniny v daných rozdílných ochlazovacích podmínkách, takovéto rozdíly ve struktuře mohou způsobovat značnou anizotropii některých vlastností takto vyrobených odlitků. Je však nutné brát v potaz, že tento jev byl hodnocen na odlitcích vyráběných za optimalizovaných podmínek, tedy z nejnižších možných teplot lití a teplot formy potřebných pro jejich plné zaběhnutí. To vlastně znamená, že tavenina plnicí koncovou část odlitku se v tomto případě již blíží k dosažení teploty nulové zabíhavosti. Dá se tedy předpokládat, že se jedná o nejmarkantnější rozdíly ve struktuře, jakých lze dosáhnout. S rostoucí teplotou lití nebo formy by tak měl teplotní gradient taveniny mezi počáteční a koncovou částí odlitku klesat a rozdíly struktur v jednotlivých částech by se také měly zmenšovat.

Dále je potřeba zohlednit tepelný vliv plné stěny, jakožto nejmasivnější části odlitku, na ochlazovací podmínky v jejím nejbližším okolí. Vzhledem k tomu, že se jedná o prozatím první prokazatelně funkční metodu plnění těchto odlitků, bylo by poměrně kontraproduktivní navrhnout eliminaci tepelného vlivu této plné stěny jejím odstraněním z konstrukce odlitku. Je však možné, že snížením její tloušťky by mohlo dojít k omezení tohoto tepelného vlivu bez výrazného ovlivnění její plnicí schopnosti.

ZÁVĚR

Na zkušebních odlitcích kovových hub o rozměrech 50x50x20 mm, vyrobených v laboratorních podmínkách z hliníkové slitiny AlSi10MgMn metodou dvoustupňového procesu přesného lití s využitím odpařitelného PUR modelu, byla pozorována mikrostruktura

ve třech různých vzdálenostech od zářezu (10, 25 a 40 mm). Z výsledků této analýzy bylo možno vypočítat, že vlivem podmínek ochlazení měnících se ve směru plnění formy je charakter mikrostruktury poměrně proměnlivý. K tuhnutí taveniny probíhá nejrychleji v koncové části odlitku, proto zde může být pozorován nejjemnější charakter mikrostruktury. Naopak nejhrubší charakter má mikrostruktura v oblasti těsně za zářezem, kde proces tuhnutí probíhá nejpomaleji.

Dosažené rozdíly v mikrostruktuře mohou mít značný vliv na homogenitu vlastností odlitku. Je tedy zapotřebí vznik strukturních odlišností v odlitku eliminovat. To může být provedeno takovým zásahem, který pozitivně ovlivní průběh tuhnutí. Na průběh tuhnutí odlitku mají v tomto případě největší vliv teplota lití a teplota formy. Podmínky výrobního procesu optimalizované v předchozím experimentu pro dosažení plné zabíhavosti proto na základě poznatků z provedené analýzy mikrostruktury nelze pokládat za podmínky optimální a bude tedy zapotřebí, je dále upravovat.

LITERATURA

- [1] GARCÍA-MORENO, F.: Commercial Applications of Metal Foams: Their Properties and Production, *Materials*, 2016, vol. 9, No. 2, 85. doi:10.3390/ma9020085
- [2] BANHART, J.: Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams, *Progress in Materials Science*, 2001, vol. 46, No. 6, pp. 559-632. doi: 10.1016/S0079-6425(00)00002-5
- [3] ASHBY, M. F., et al.: Metal Foams: A Design Guide. Massachusetts: *Butterworth-Heinemann*, 2000, 251 p., ISBN: 9781493302918.
- [4] KROUPOVÁ, I., BEDNÁŘOVÁ, V., ELBEL, T., RADKOVSKÝ, F.: Proposal of method of removal of mould material from the fine structure of metallic foams used as filters, *Archives of Metallurgy and Materials*, 2014, vol. 59, No. 2, pp. 727-730. ISSN 1733-3490.
- [5] WANG, L.; LI, H.; WANG, F.; REN, J.: Preparation of the open pore aluminum foams using investment casting process. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 2001, vol. 14, no. 1, pp. 27-32.

PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek byl zpracován za podpory Technologické agentury ČR - TH02020668 a projektů "Studentské Grantové Soutěže" čísla SP2019/148 a SP2018/43. Autor Václav Merta je držitelem "Stipendia města Ostravy".

Vítězství gravitačního odlévání nad nízkotlakým – případová studie lití Al odlitku

Vrábel, P. 1¹⁾, Luňák, M. 2¹⁾

¹⁾ BENEŠ a LÁT a.s., Tovární 463, 289 14 Poříčany, ČR, petr.vrabel@benesalat.cz,
milan.lunak@benesalat.cz

Klíčová slova

Nízkotlaké lití; Gravitační lití; Simulace lití; Mikroporozita

Abstrakt

Článek popisuje návrhy úprav technologie u odlitku vyráběného nízkotlakým litím a analýzu výskytu vad při různých úpravách této technologie. Následuje změna technologie výroby na gravitační lití, opět analýza výskytu vad a porovnání s předchozí technologií. Výsledkem je určení nové – lepší technologie a její úspěšné ověření v reálné výrobě.

ÚVOD

Ve slévárenské praxi jsou technologové velmi často stavěni před otázku – jakou výrobní technologii zvolit pro bezproblémovost sériové produkce daného odlitku. Na jedné straně berou v potaz technologičnost konstrukce samotného odlitku, výhody i nevýhody jednotlivých výrobních technologií, optimalizaci výrobního procesu včetně následných operací, tak aby nedocházelo k plýtvání a zbytečným potížím. Samozřejmě, jak tomu běžně bývá je zde i ale ... a to v podobě vyvíjeného tlaku na co možná nejnížší cenu nástroje, rychlost dodávek a vysokou kvalitu vyráběných dílů. Je dobré rovněž nezapomínat na skutečnost, že s ohledem na nedostatek vyškoleného personálu, lze některé metody výhodněji, jiné méně výhodně, automatizovat.

Mezi výhody nízkotlakého způsobu lití Al odlitků patří možnost řízení rychlosti plnění dutiny formy, klidné plnění, vysoké využití tekutého kovu a dobrá vnitřní jakost odlitků. Nevýhodou je pak složitější konstrukce formy a nutnost jejího kvalitního odvzdušnění.

Naproti tomu gravitační lití Al odlitků je relativně jednoduché, používá se na výrobu odlitků již tisíce let, „zdravost“ odlitku lze poměrně snadno řešit správným nálitkováním. Nevýhodou je pak horší vnitřní jakost odlitku a nižší využití tekutého kovu řádově o desítky procent celkové hmotnosti odlitku.

Tato případová studie má za úkol poskytnout náhled na úpravy a řešení technologie nízkotlakého lití, vyzdvihnout přínosnost použití numerické simulace pomocí software Magma a nakonec i popsat cesty hledání správného řešení pro zajištění kvalitních dodávek zákazníkovi a to všechno nastíněno příkladem odlévání komponenty k brzdovému systému vlaku.

POPIS PŘÍPADOVÉ STUDIE

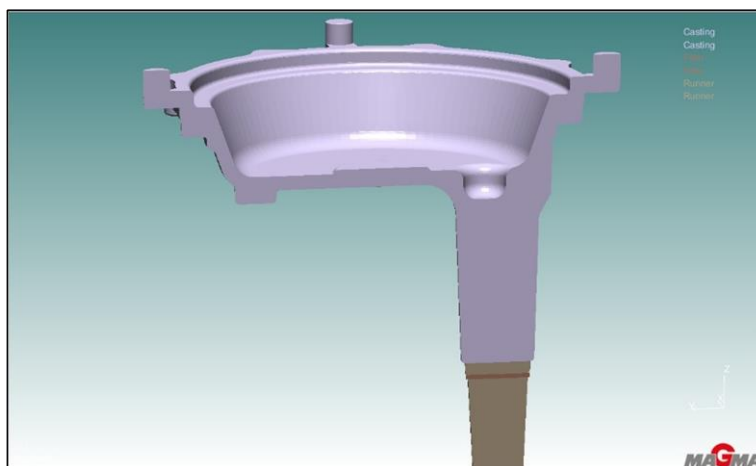
Předmětem této studie je odlitek s názvem „kryt válce“, odlévaného pro nadnárodní korporaci zabývající se výrobou brzdových systémů pro drážní vozidla, a to jak užitková, tak pro přepravu osob. Finální aplikace tohoto dílu je na nápravě nákladního vagónu – obr. 1, který je určen pro arktický provoz. To jsou lokality s vysokými mrazy dosahující až - 40 °C. Odlitek je odléván ze slitiny AlSi10Mg (EN-AC 43100). Geometrie odlitku není na první pohled nijak složitá – jedná se o rotační diskovitý tvar, který je doplněn o svislý kónický výstupek. Odlitek je zobrazen na obr. 2 a jeho rozměry jsou cca 200 x 150 mm. Hmotnost odlitku je přibližně 1,15 kg.



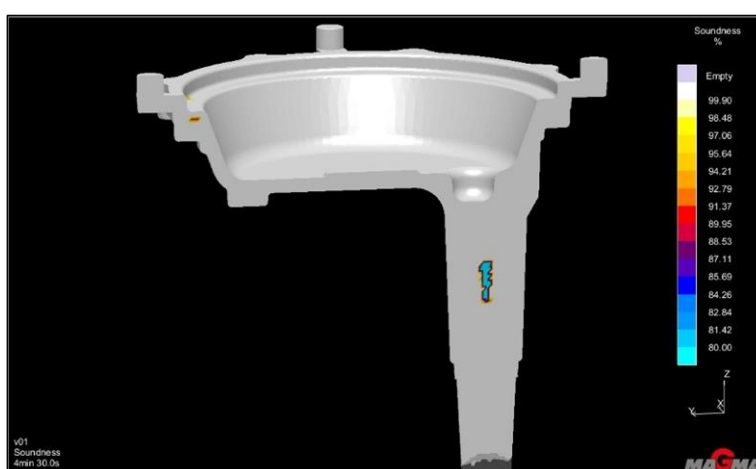
Obr. 1: Místo použití odlitku „kryt válce“



Obr. 2: Surový odlitek „kryt válce“



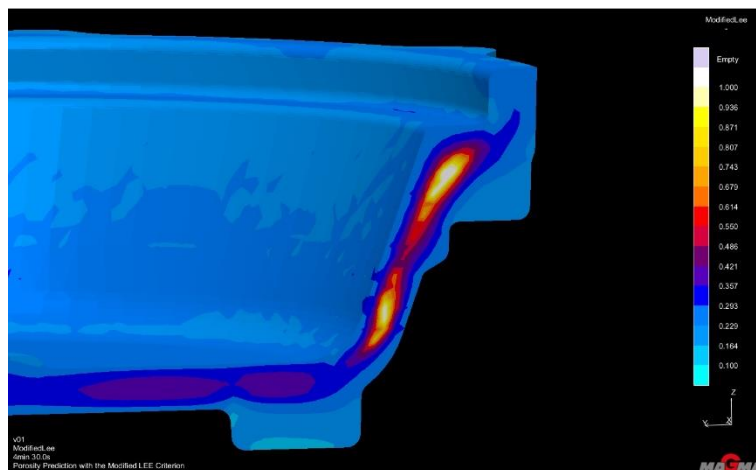
Obr. 3: 3D tvar odlitku použitý při numerické simulaci, svislý řez



Obr. 4: Zobrazení staženin na svislém řezu středem odlitku



Obr. 5: RTG snímek skutečného odlitku a porovnání výsledků simulace. Pro vyhodnocení výskytu mikroporozity používáme kritérium „modified Lee“, které velmi dobře vystihuje realitu.



Obr. 6: Zobrazení mikroporezity na svislém řezu – detail

Při samotné simulaci (obr. 3) byl proveden výpočet plnění a tuhnutí v cyklech (obvykle uvažujeme s 6 - ti cykly), které mělo za úkol provést teplotní temperaci výrobního nástroje. Při detailnějším pohledu na dosažené výsledky je zřejmé, že ve svislé kónické části se objevuje teplotní uzel s následnou staženinou (deficit kovu v tomto místě je větší jak 50 %) – obr. 4. Tato staženina ale vychází do obrazu obrobení dílu – středem tohoto výstupku prochází otvor a proto tato vada mohla být abstrahována. Problémem je drobná staženina v obvodové části odlitku a dále pak mikroporezita, kterou nalézáme po celém obvodu odlitku. Obr. 5 prezentuje snímek z RTG a porovnání s výsledkem simulace v problémové lokaci odlitku. Na obr. 6 je pak detailně zobrazen výskyt mikroporezity na svislém řezu přes stěnu odlitku – ta ale bohužel vychází do obráběné vnitřní plochy odlitku a díly byly po obrobení vyhodnoceny jako nevyhovující (NOK).

Na základě těchto výsledků byl proveden výpočet několika dílčích verzí simulací, kdy bylo zkoušeno zvětšení přídavku na obrábění na dně odlitku o 1 mm, zvětšení přídavku tloušťky boční stěny odlitku rovněž o 1 mm, úprava tvaru boční stěny tak, aby kopírovala obrábění, doplnění druhého vtokového kůlu ke kraji odlitku, doplnění regulovatelného příhřevu formy pomocí plynových hořáků, zkrácení prvotního vtokového kůlu, a podobně. Bohužel muselo být konstatováno, že žádná z uvažovaných verzí neodstranila výskyt mikroporezity po obvodu odlitku.

Následně byla navržena varianta s masivním zvětšením tloušťky dna odlitku, aby bylo možno dosazovat tekutý a pomalu krystalizující materiál až do boční stěny odlitku – obr. 7. Dle výsledku simulace se v odlitku nacházel pouze jeden teplotní uzel v oblasti přechodu dno – kónická část – viz obr. 8. Staženiny i mikroporezita (obr. 9 a 10) se vyskytovaly pouze v této masivní části. Pro vyhodnocování výskytu mikroporezity používáme modifikované Lee kritérium. Výskyt těchto vad byl potvrzen na RTG snímku i na řezu reálným odlitkem (obr. 11 a 12). Z tohoto návrhu bylo dále rozpracováno několik dalších variant, které měly za úkol odstranit teplotní uzel z centrální části odlitku. Postupně bylo zkoušeno zkracování vtokového kůlu, izolování vtoku, dále různé úpravy tvaru vložené izolace vtoku, příhřev vtoku, úprava tvaru horního jádra, doplnění vodního chlazení, chlazení horního jádra, časování chlazení, atd. Vývojové práce tímto směrem ale byly záhy zastaveny, neboť zákazník nebyl ochoten akceptovat vyšší cenu za opracování odlitku. A začínalo se takřka od začátku.



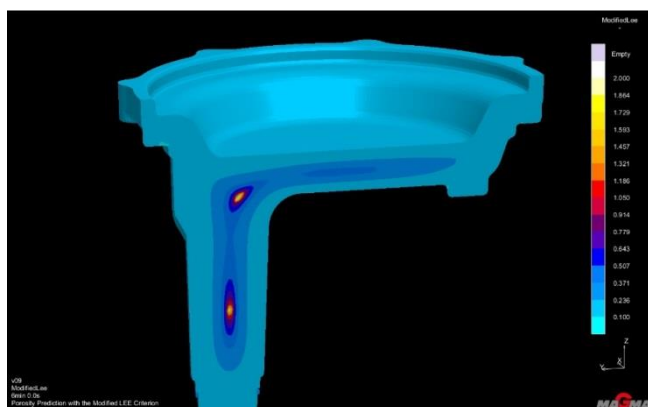
Obr. 7: Svislý řez středem geometrie s širokým dnem



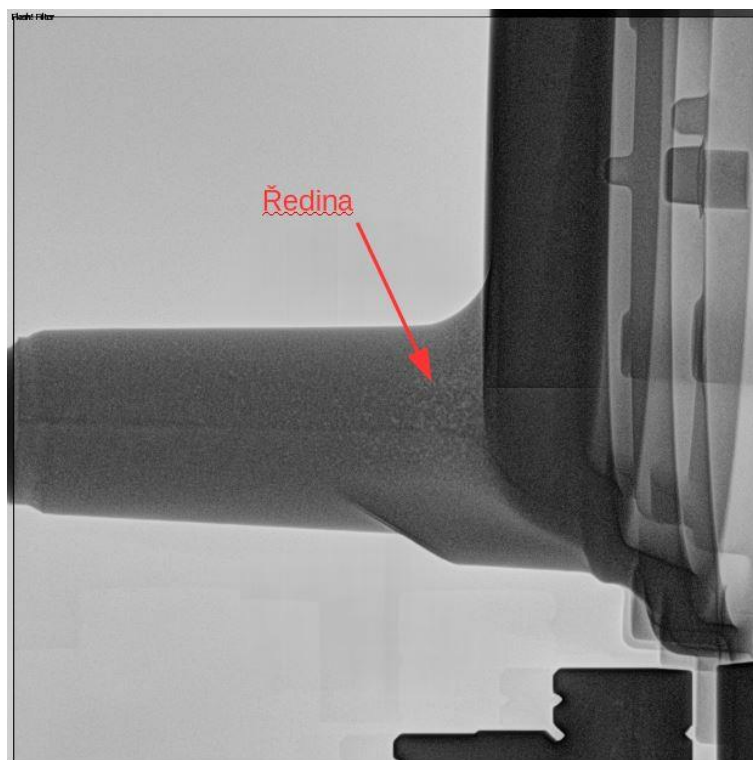
Obr. 8: Zobrazení teplotního uzlu na svislém řezu středem odlitku



Obr. 9: Zobrazení výskytu staženiny na svislém řezu středem odlitku



Obr. 10: Výskyt mikroporezity na svislém řezu středem odlitku



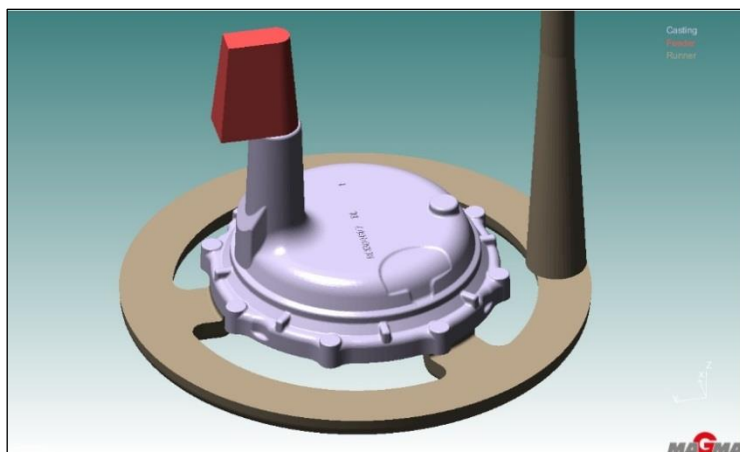
Obr. 11: RTG snímek odlitku



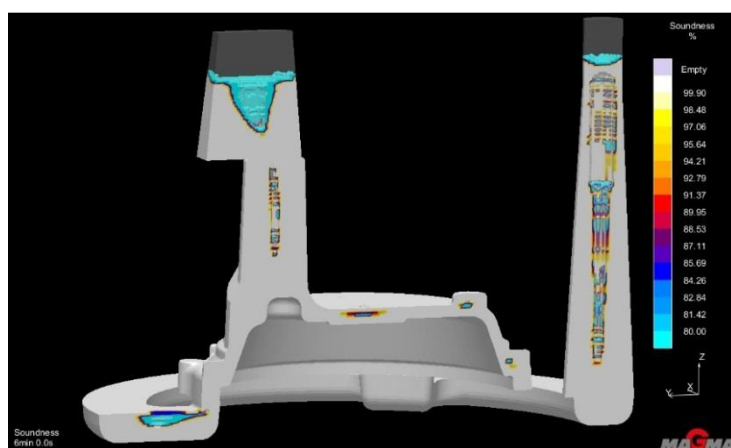
Obr. 12: Řez středem u reálného odlitku

KUDY DÁL ?

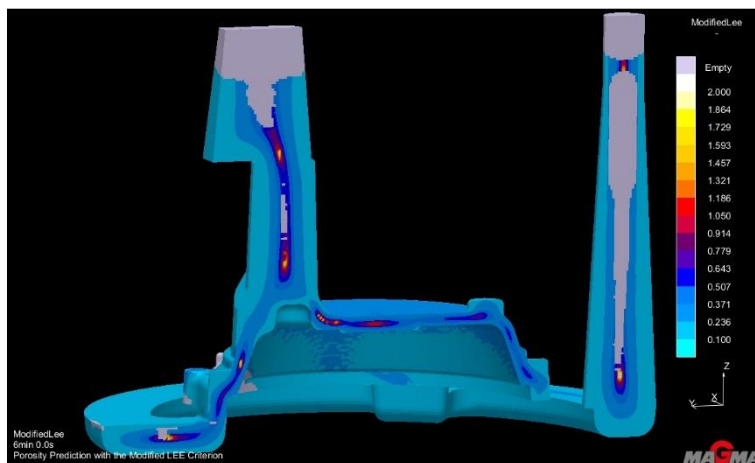
Z výše uvedených důvodů vyplývá stanovisko, že technologie nízkotlakého lití nám zde již neposkytuje dostatečný prostor pro zajištění kvalitní produkce. Proto byla navržena technologie gravitačního lití – viz obr. 13. A jak dokládají následující obrázky, rozhodně se jednalo o posun kupředu z hlediska vnitřní kvality odlitku. Obr. 14 prezentuje výskyt staženin na svislém řezu středem odlitku a obr. 15 výskyt mikroporozity.



Obr. 13: Výchozí návrh technologie gravitačního lití

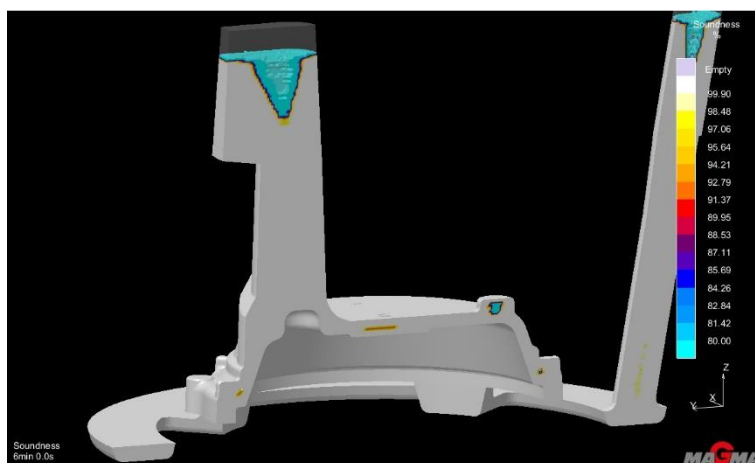


Obr. 14: Zobrazení výskytu staženin na svislém řezu středem odlitku

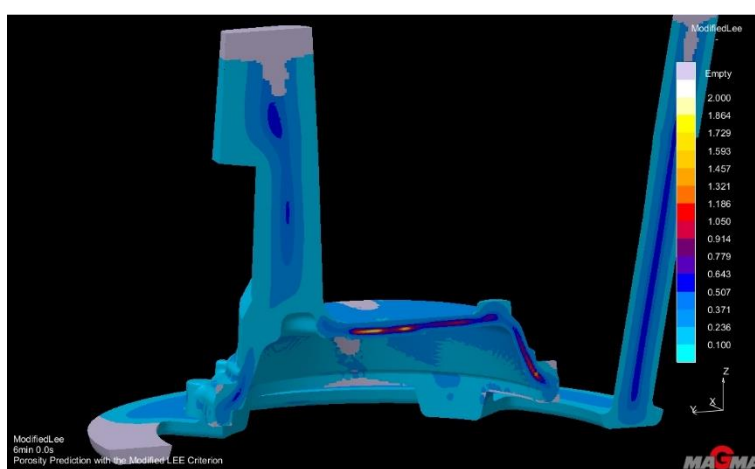


Obr. 15: Výskyt mikroporezity na svislém řezu středem odlitku

Jelikož se v odlitku stále nacházelo několik nepříjemných defektů, bylo nutností zpracovat a simulovat další úpravy této gravitační technologie. Tyto úpravy zahrnovaly doplnění izolace nálitku, zvětšení počtu zářezů, změnu tvaru vtokového kanálu a tvaru zářezu, doplnění chladítka a dolévání nálitku čerstvým tekutým kovem. Finální výskyt staženin a mikroporezity zachycují obr. 16 a 17.



Obr. 16: Zobrazení výskytu stažení na svislém řezu středem odlitku



Obr. 17: Výskyt mikroporozity na svislém řezu středem odlitku

Vzhled této gravitační technologie byl proveden i v kovovém nástroji a byly odlity zkušební vzorky (obr. 18), které byly představeny zákazníkovi. Ten akceptoval takto dodané kusy, pouze u jednoho kusu došlo k odhalení oxidického vměstku. Toto bude řešeno doplněním filtrace proudící taveniny vtokovou soustavou a to ocelovým sítkem umístěným na počátku diagonální větve vtokové soustavy.

ZÁVĚR

Jak je vidět u výše uvedené případové studie, technologové se musí v technické praxi potýkat s řadou problémů a požadavků ze strany zákazníka a obvykle bývá velmi složité určit „nejvhodnější“ technologii hned od začátku výroby konkrétního odlitku. Vydátnou podporou při řešení těchto otázek je pochopitelně použití numerické simulace, kdy zde bylo navrženo a vypočteno 37 různých variant. Nezbytnou podmínkou je samozřejmě i nastavení relevantních vstupních podmínek z reálné výroby. V tomto případě se po realizaci potvrdilo, že změna výrobní technologie je přínosem a došlo k významnému snížení zmetkovitosti tohoto dílu. Tato případová studie paradoxně nepotvrzuje trend jdoucí cestou automatizace výroby a o to je zajímavější. Jsou případy, kde pro dosažení požadované vnitřní homogenity odlitku není jiné řešení než prastará technologie gravitačního odlévání



Obr. 18: Fotografie reálného odlitku včetně kompletní vtokové soustavy

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bychom rádi poděkovali všem kolegům ze společnosti BENEŠ a LÁT a.s., především pak těm, kteří přidali ruku k dílu a poskytli nám kvalitní podklady pro sepsání této případové studie.

Nové poznatky v oblasti filtrace hliníkových slitin při užití keramických lisovaných filtrů PYRAL 15®

Procházka, P.¹⁾

¹⁾ Keramtech s.r.o., Horská 139, 542 01 Žacléř, prochazka@keramtech.cz

Klíčová slova

Keramický filtr; Pyral 15®; filtrace; kvalita odlitků; turbulentní energie,

Abstrakt

V tomto příspěvku jsme se zaměřili na shrnutí informací získaných z praktického a simulovaného použití lisovaných keramických filtrů PYRAL 15 při filtraci hliníkových slitin. V příspěvku je popsán vliv designu lisovaných filtrů a jejich umístění ve vtokové soustavě na výslednou kvalitu odlitků. Přesný popis provedených experimentů a simulací je součástí jednotlivých zpráv a není předmětem tohoto příspěvku.

ÚVOD DO PROBLEMATIKY PŘÍSPĚVKU

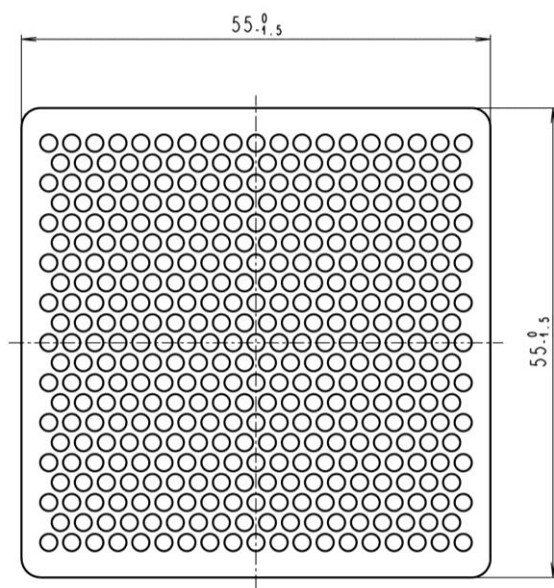
Stále přísnější požadavky na kvalitu a parametry hliníkových odlitků nutí technology sléváren k maximálnímu využití všech dostupných možností vedoucích k jejich zajištění. Jednou z mnoha možností, jak toho docílit, je nasazení filtrů při procesu odlévání. Toho jsme si, jako výrobce lisovaných keramických filtrů, plně vědomi a proto se snažíme naše produkty neustále zlepšovat. Cílem našeho snažení je nabídnout slévárně prostředek, který jí pomůže vyrobit kvalitnější a levnější odlitek. V tomto příspěvku jsme se pokusili shrnout doposud získané informace, jak tyto filtry správně vybrat a používat. Použité informace byly získány převážně v rámci spolupráce mezi fou Keramtech a Žilinskou Universitou v Žilině, a to buď experimentálně nebo teoreticky za pomoci simulačního softwaru ProCAST/QuikCAST.

PŘEDSTAVENÍ FILTRU PYRAL 15®

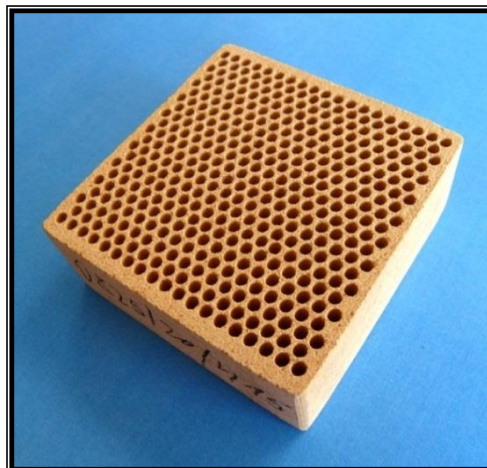
Firma Keramtech s.r.o. vyvinula pro filtraci hliníkových slitin speciální filtr uváděný na trh pod prodejním názvem Pyral 15®, jehož parametry splňují vysoké nároky na jeho funkci při odlévání hliníkových odlitků. Filtr je určen zejména pro gravitační lití do kokil, kde dosahuje velmi dobrých výsledků, může však být se stejným účinkem použit i při gravitačním lití do písku. Jeho přednosti jsou:

- 1) Nízká tepelná kapacita, zajišťující minimální ochlazení taveniny při průchodu filtrem (speciální odlehčená keramická hmota s měrnou hmotností cca 1,4 g/cm³)
- 2) Velmi přesně definovaná otevřená plocha zajišťující stále stejný řídicí průřez vtokové soustavy (přesně daný počet a průměr otvorů)
- 3) Velmi přesný a ergonomický vnější tvar filtru, zajišťující jeho bezproblémové založení do vtokového systému s minimálním rizikem vzniku sekundárních nečistot (ulomení keramiky při zavření kokily, zadrobení písku při založení filtru do formy)

- 4) Nízká měrná hmotnost a velká kompaktnost filtru zajišťuje jeho snadné odstranění z taveniny při zpracování vratu



Obr. 1



Obr. 2

VLIV DESIGNU FILTRU PYRAL 15® NA KVALITU ODLITKU

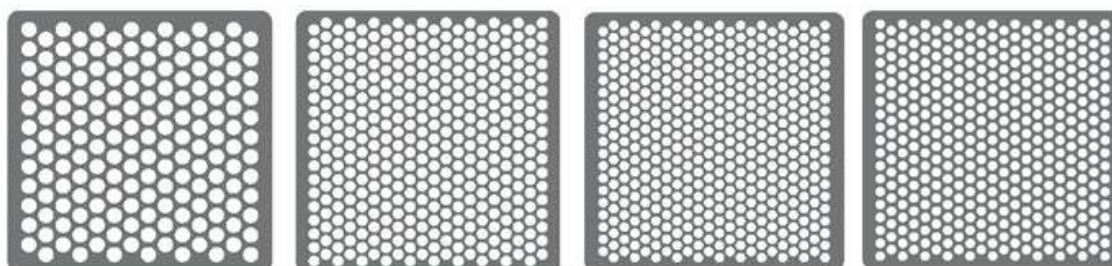
Pro získání informací v této oblasti byly vybrány filtry v běžném rozměru 55 x 55 x 12,7 mm, ale s různým designem průtočné plochy, který se liší hlavně v počtu a průměru otvorů. Byly použity 4 typy běžně používané v praxi:

TYP 0810

TYP 0812

TYP 0735

TYP 0825



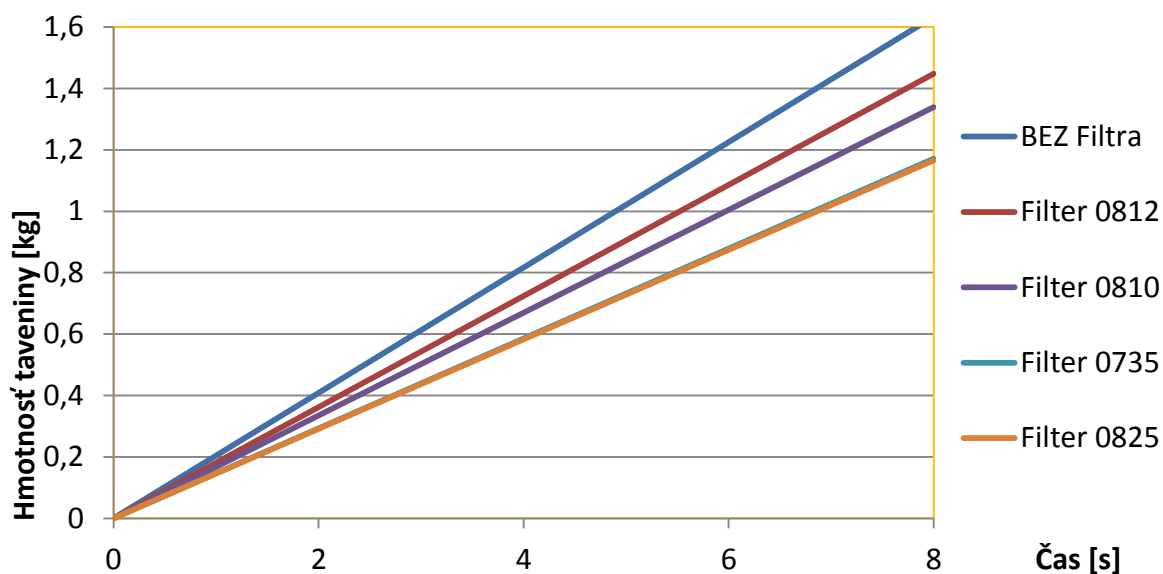
Obr. 3

Tab. 1: Základní parametry použitých filtrů

Označení	Filtr 0810	Filtr 0812	Filtr 0735	Filtr 0825
Rozměry [mm]	55x55x12,7	55x55x12,7	55x55x12,7	55x55x12,7
Průměr otvorů [mm]	Ø 3,2	Ø 2,3	Ø 2	Ø 2
Průtočná plocha [mm²]	1351	1495	1348	1223

Průtočnost filtrů - experimentální část

Pro získání dat o průtočnosti filtrů byl zvolen experiment, který se snažil maximálně přiblížit podmínkám v praxi. Byla použita ocelová kokila a slitina AlSiMg0,3, množství proteklého kovu bylo průběžně váženo. Získaná data byla zpracována graficky:



Obr.4: Graf průtočnosti zobrazený pomocí regresních přímek

Tab. 2: vyhodnocení průtočnosti filtrů

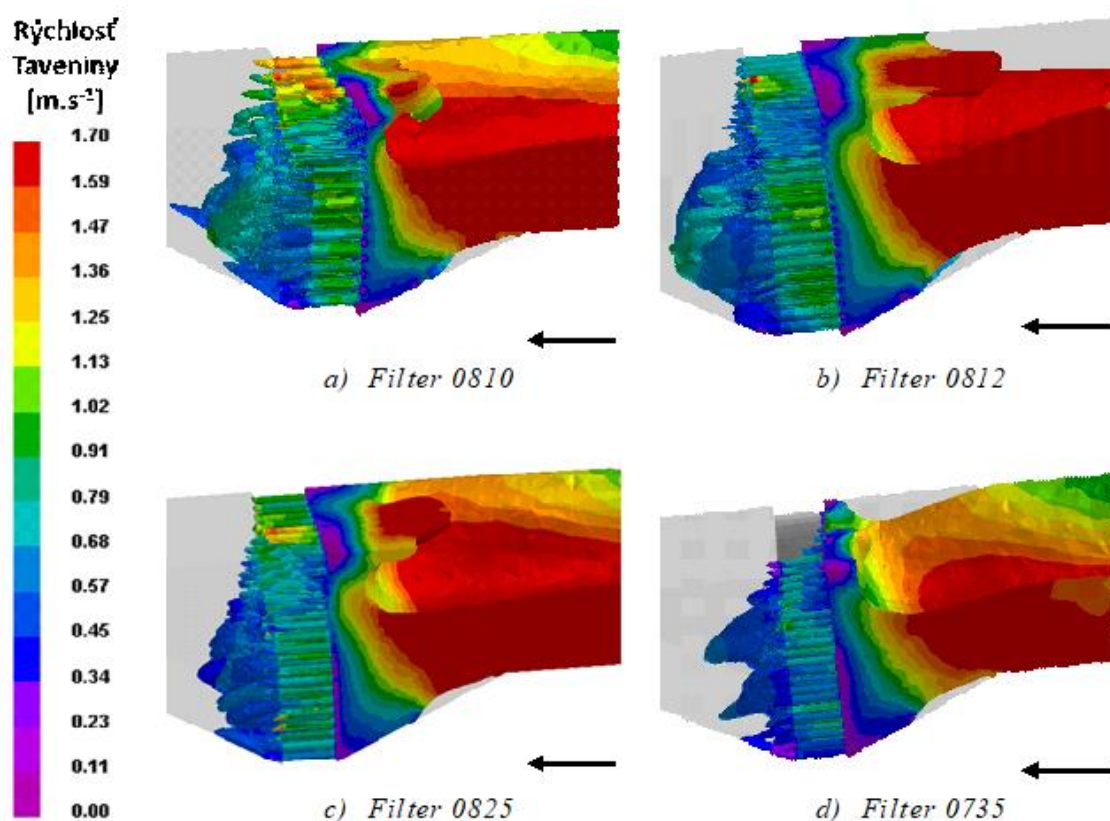
Označení	Průměr otvorů D [mm]	Průtočná plocha S_f [cm ²]	Průtočná plocha %	Strmost přímky φ [°]
Bez filtru	X	25	100	11,54
Filtr 0812	2,3	14,95	58	10,26
Filtr 0810	3,2	13,51	55	9,50
Filtr 0735	2	13,48	56	8,33
Filtr 0825	2	12,23	50	8,29

Z uvedených hodnot vyplývá, že průtočnost filtrů závisí hlavně na celkové průtočné ploše, průměr jednotlivých otvorů nemá výrazný vliv.

Hodnocení proudění kovu pomocí simulace v programu ProCAST

Odrázová vlna

Filtr vložený do vtokové soustavy tvoří pro tekutý kov překážku. Po vniknutí kovu do lící soustavy dojde k jeho nárazu na filtr - tzv. priming - kov se do určité míry od filtru odrazí, což je nežádoucí jev.

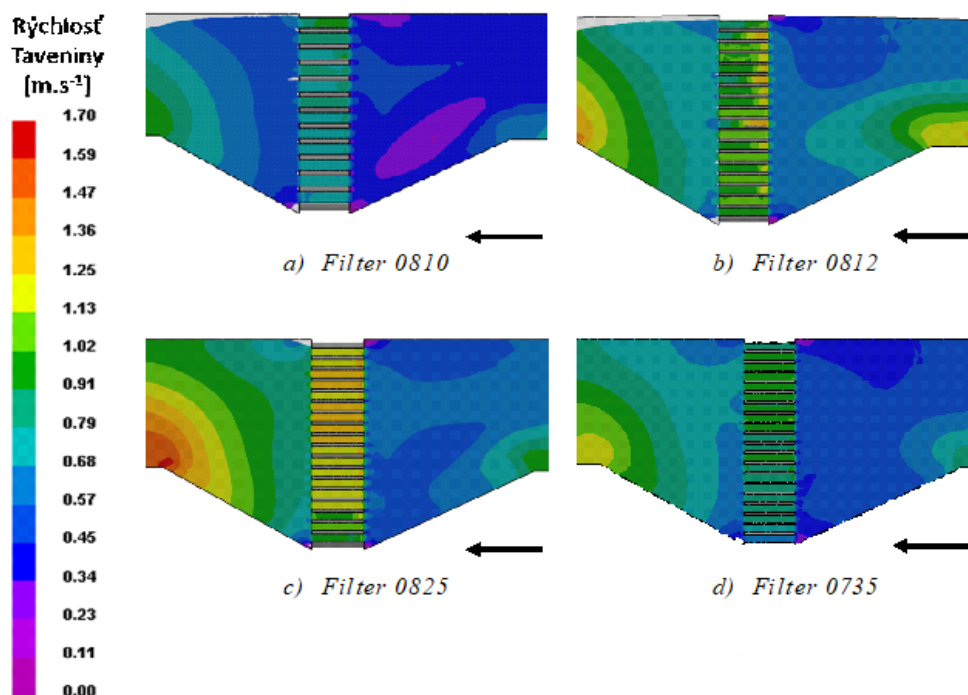


Obr. 5

Ze získaných dat lze odvodit, že největší odrazovou vlnu tvoří filtr 0812, naopak nejmenší vlnu tvoří filtr 0735.

Rychlost taveniny při průchodu filtrem

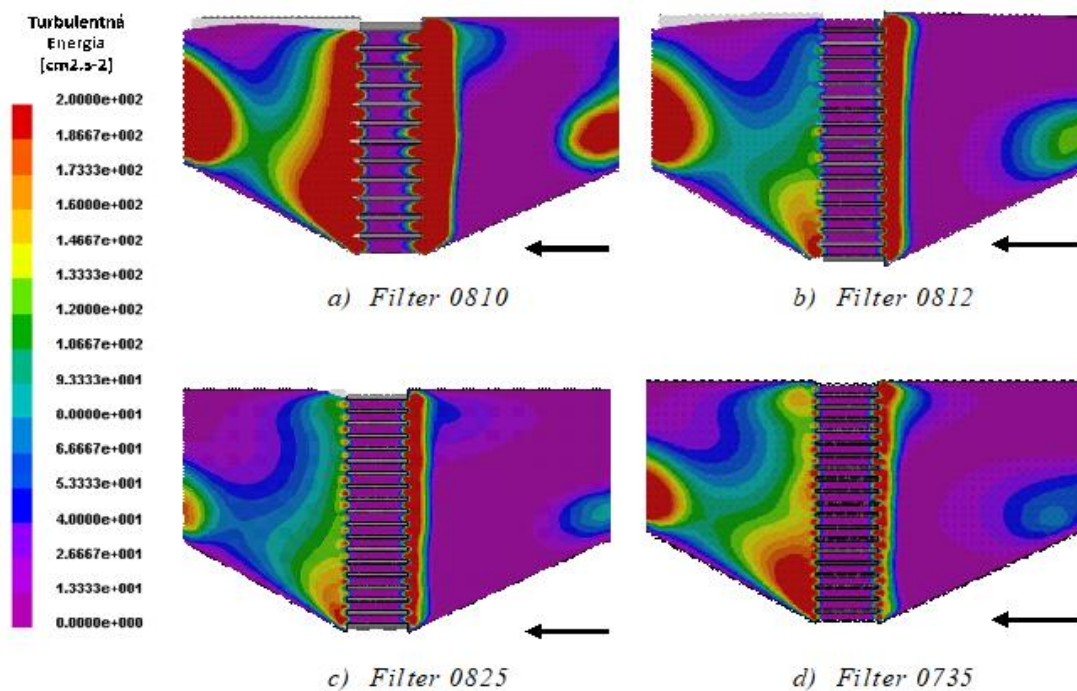
Dalším faktorem, který jsme zkoumali, je rychlost průtoku taveniny filtrem. Ze zkušenosti víme, že příliš nízká, ale hlavně příliš vysoká rychlost proudění není žádoucí. Důležité je i porovnání hodnot rychlosti před a za filtrem, tedy vliv filtru na zpomalení rychlosti proudění.



Obr. 6

Z dat získaných ze simulace plnění vtokové soustavy v čase 0,65 sec vyplývá, že nejnižší rychlost vykazuje filtr 0810 (největší otvory), naopak nejvyšší rychlost je predikována u filtru 0825.

Turbulentní energie taveniny v oblasti filtru



Obr. 7

Jedním z nejvíce diskutovaných faktorů poslední doby je turbulentní energie taveniny před a za filtrem. Turbulentní energie má přímý vliv na tvorbu sekundárních vměstků a je tedy nežádoucí. Z dat získaných ze simulace plnění formy v čase 0,65 sec viz. Obr.7 je patrné, že nejmenší turbulentní energie vzniká u filtru 0825 a 0735, u filtru 0810 je velmi pravděpodobný vznik sekundárních vměstků.

Vyhodnocení zjištěných poznatků

Výsledky „umístění“ v jednotlivých "disciplínách" byly obodovány (systém bodování: 8 bodů za 1. místo, 6 za druhé atd.) a zaznamenány do tabulky č.3 .

Tab. 3

Typ filtru	Průměr otvorů D [mm]	Průtočná plocha Sf [cm ²]	Průtočná plocha %	průtočnost	odrazová vlna	rychlost	turbulentnost	celkem bodů
Filtr 0812	2,3	14,95	58	8	3	4	4	19
Filtr 0810	3,2	13,51	55	6	6	2	2	16
Filtr 0735	2	13,48	56	3	8	6	6	23
Filtr 0825	2	12,23	50	3	3	8	8	22

Z výše uvedené tabulky je patrné, že jako nejvhodnější filtry byly vyhodnoceny typy 0735 a 0825. Filtr 0810 je pro filtraci hliníku zcela nevhodný.

VLIV UMÍSTĚNÍ FILTRŮ

Umístění filtrů do vtokové soustavy významně ovlivňuje proudění kovu, což se zákonitě projeví na kvalitě odlitku. Při umístění filtru do vtokové soustavy je třeba vzít v potaz zejména tyto dva hlavní faktory:

- kde je filtr uložen (ve které části vtokové soustavy)
- jak je filtr uložen (jeho orientace vůči směru proudění taveniny)

Vliv těchto faktorů jsme se snažili objasnit pomocí simulačního programu QuickCAST (Pro CAST nebyl v daném momentě k dispozici). Byly navrženy 3 typy v praxi obvyklých vtokových soustav, jako kov byla opět zvolena slitina AlSi7Mg0,3 a jako odlitek byl zvolen skutečný odlitek (příruba s žebry o hmotnosti cca 12 kg). Řídící poměry vtokové soustavy jsou uvedeny v tabulce č. 4

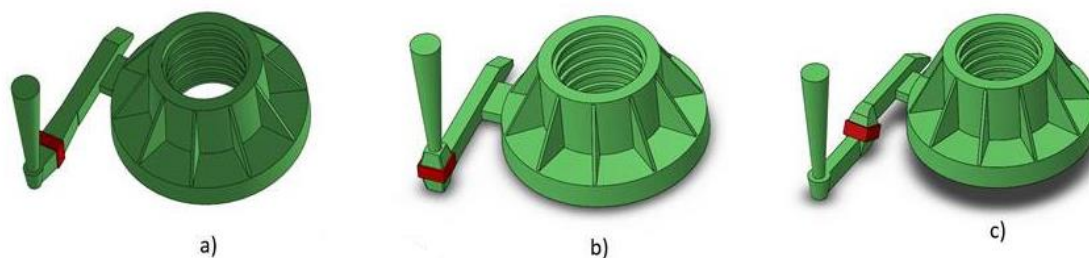
Tab. 4: Řídící poměry vtokové soustavy

Materiál	Vtokový kanál	Rozváděcí kanál	Zářezy
Hliníkové slitiny	1	4	4

Typy umístění filtru do vtokové soustavy (Obr. 8):

- svisle v rozváděcím kanále
- vodorovně pod vtokovým kulem

c) šikmo (45°) v rozváděcím kanále

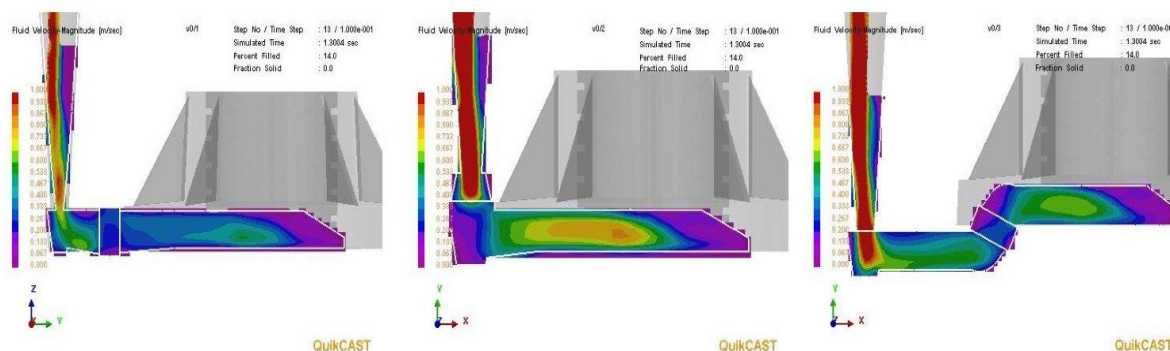


Obr. 8

Vliv umístění filtru na rychlost plnění

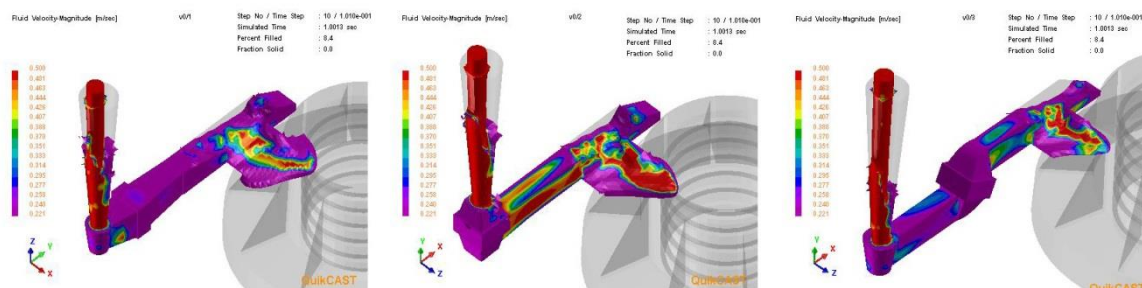
Za kritickou mez rychlosti plnění považujeme hodnotu 0,5 m/sec (modrozelená barva), doporučená rychlost proudění taveniny by měla být nižší, ideálně kolem 0,3 m/sec.

Dle grafického znázornění rychlosti plnění v čase 1,3 sec dle simulace v programu QuickCAST tomuto kritériu nejlépe vyhověla varianta a) = svislé umístění v rozváděcím kanále (obr. 9 nalevo):



Obr. 9

Izometrický pohled na rychlost plnění za stejných podmínek potvrdil předchozí zjištění:



Obr. 10

Z těchto zjištění lze vyvodit závěr, že nejvhodnější se jeví svislé umístění v rozváděcím kanále (obr. 10 nalevo), které vykazuje nejvyšší výskyt doporučených rychlostí, respektive nejmenší výskyt vyšších rychlostí

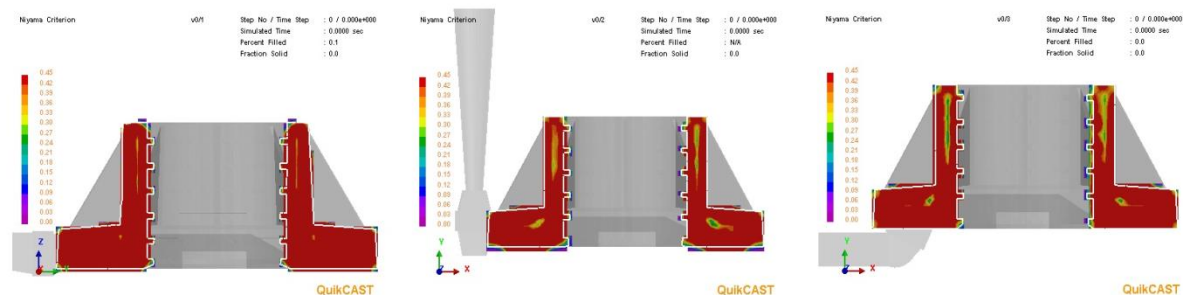
Hodnocení vlivu umístění filtru z pohledu vzniku pórovitosti při tuhnutí odlitku s využitím predikce dle Niyamova kritéria, kdy se kritická hodnota N_{kr} pro $Al = 0,3$ (červená barva) .

Vyhodnocením získaných dat viz. obr. 11 a 12, kde červené oblasti predikují bezproblémový průběh tuhnutí, kdežto ostatní barvy predikují možný problém (staženiny, porosita), lze konstatovat, že nejvhodnější umístění je opět svisle do rozváděcího kanálu. Toto tvrzení platí jak pro pískovou formu:



Obr. 11

tak pro kokilu:



Obr. 12

Varianta a) - vlevo na obr.11 i 12 - vykazuje v celém objemu odlitku nejmenší resp. žádné odchylky od optimální hodnoty Niyamova kritéria, u ostatních variant uložení tomu tak není. Z tohoto můžeme usoudit, že opět nejvíce vyhovuje svislé umístění filtru v rozváděcím kanále

Z výše popsaných výsledků provedené simulace lze vyvodit, že optimální uložení filtru je svisle v rozváděcím kanále. Uložení pod vtokovým kulem stejně jako diagonální uložení nelze doporučit.

ZÁVĚR

Výše uvedená zjištění korespondují s našimi zkušenostmi získanými z praktického používání lisovaných filtrů Pyral 15® ve slévárnách hliníku a lze je zobecnit na základní doporučení pro jejich používání:

- Nejvhodnější umístění filtru je svisle v rozváděcím kanále (kolmo ke směru proudu taveniny)
- Nejvhodnějším filtrem se jeví filtr s průměrem otvorů (2,0 mm) a s otevřenou plochou 50% z celkové plochy filtru (např. typ 0825)

Dále lze konstatovat, že numerické simulace potvrdily poznatky z praxe a lze je úspěšně využít při výběru vhodného filtru a jeho umístění při tvorbě vtokového systému

Na základě získaných zkušeností z používání filtrů ve slévárnách můžeme dále konstatovat následující:

- Filtry Pyral®15 (při správném výběru a uložení) garantují stabilizaci lícího procesu (rovnoměrné plnění formy, stabilní lící časy)
- Filtry Pyral®15 (při správném výběru a uložení) snižují výskyt vad způsobených oxidickými plenami, snižují výskyt staženin a mikroporosity a mají pozitivní vliv na povrchovou kvalitu odlitku
- Používání filtrů Pyral® 15 nemá žádná technologická omezení
- Filtry Pyral 15® se po odlití nerozpadají, při přetavení plavou na povrchu taveniny a lze je tak snadno mechanicky odstranit (nedochází ke znečištění tavícího zařízení úlomky filtrů)

LITERATURA

- [1] [http : // www.keramtech.cz](http://www.keramtech.cz)
- [2] BOLIBRUCHOVÁ, D. et al. : *Použitie keramických lisovaných filtrov pri filtrácii zliatiny*. Sborník vědeckých prací VŠB-TUO Ostrava, č.1, roč.L, 2007, s.1-8.
- [3] BOLIBRUCHOVÁ, D. : *Filtrácia hliníkových zliatin*, Žilinská Univerzita v Žilině, 2011
- [4] ŠVANDOVÁ, L.: *Studium účinnosti filtrace hliníkových slitin*. Bakalářská práce, VŠB-TUO Ostrava, 2008.

Optimalizace procesu tlakového lití ložiskových štítů za pomoci nové ošetřovací hlavy

Krňávek, Š. ¹⁾

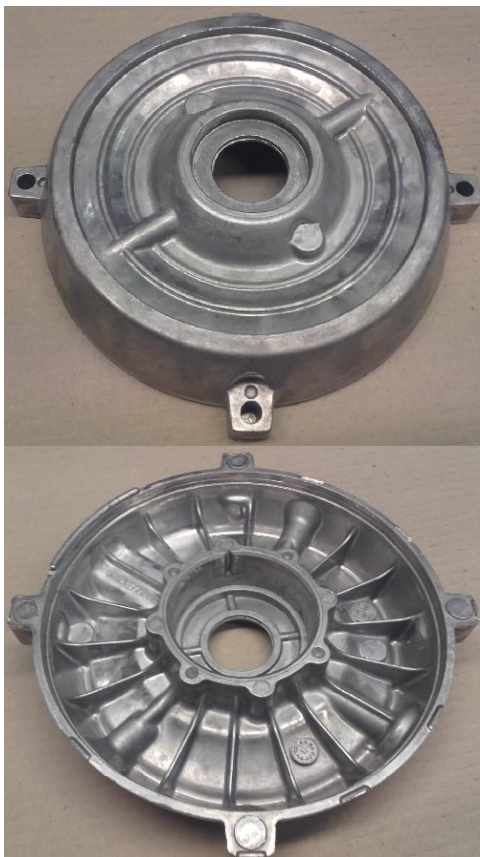
¹⁾ Tiesse Praha s.r.o., stepankrnavek@tiessepraha.cz

ÚVOD

Ve slévárenství je za poslední roky vidět jasný nárůst objemu výroby odlitků ze slitin neželezných kovů – jde hlavně o odlitky ze slitin AlSi vyráběné technologií vysokotlakého lití. Neustále vyšší poptávka po odlitcích ze slitin AlSi nutí slévárny zvyšovat výrobní kapacity, kvalitu odlitků a zkracovat výrobní časy s cílem zvýšení produktivity. K dosažení těchto cílů, slévárny mimo jiné pořizují a rozvíjejí nové technologie, které velkou měrou přispívají k dosažení vyšší kvality odlitků i ke zvýšení produktivity. Proces výroby odlitků ložiskových štítů (dále jen odlitků LŠ) elektromotorů ve firmě Siemens Mohelnice technologií vysokotlakého lití byl typickým případem, kde se nabízela možnost proces optimalizovat s cílem zvýšení produktivity celého pracoviště. Zde se firma Siemens Mohelnice rozhodla jít cestou optimalizace procesu ošetření licí formy z důvodu, že samotné ošetření formy u výroby odlitků LŠ představuje největší část výrobního času z celého cyklu stroje a má podstatný vliv i na životnost vložek licí formy. Ve spolupráci s firmami TIESSE PRAHA s.r.o. a RELBO Srl byla navržena a pořízena nová, speciálně upravená ošetřovací hlava fy RELBO Srl s cílem podstatně zkrátit dobu ošetření licí formy a tím zvýšit produkci i životnost samotné formy.

PŮVODNÍ STAV VÝROBY ODLITKŮ LŠ

Odlitek LŠ elektromotoru (obr. 1) je vyráběn prostřednictvím čtyřnásobné formy (obr. 2) na tlakovém licím stroji COLOSIO PFO 1200. Pracoviště je doplněno ostříhovacím lisem fy DIESSE PRESSE, vyjímacím robotem fy. KAWASAKI, translačním dávkovačem kovu TRANSAL, termoregulačními zařízeními fy ROBAMAT a nakonec ošetřovacím zařízením licích forem fy RELBO Srl s dvouřadou ošetřovací hlavou (obr. 3). Problematikou ošetření formy LŠ zde byly dlouhé přejezdy ošetřovací hlavy mezi jednotlivými tvary formy (dlouhý čas ošetření). Dlouhý čas ošetření má významný vliv na životnost hlavně pevné poloviny formy, kde dochází k rychlému opotřebení povrchu – vznik prasklin na povrchu vložek formy v oblasti vtokového nařiznutí. Zde je podstatný vliv právě dlouhé doby ošetření, při které je forma vystavena velkým teplotním šokům. Pro optimalizaci ošetření formy byla firmou RELBO Srl sestavena ošetřovací hlava nové koncepce (obr. 4) tak, že její tvar plošně zabírá všechny čtyři tvary LŠ ve formě s cílem výrazného zkrácení pohybů - nová hlava bude mezi horními a spodními tvary přejíždět jen minimálně. Výhodou hlavy je, že jednotlivé řady trysek – „lišty“ jsou vzájemně výměnné. Hlava také nabízí 2. okruh mazání, i pro jiný typ maziva – např. pro separátory na minimální dávkování.



Obr.1: Odlitek ložiskového štítu



Obr. 2: Forma LŠ, pohyblivá polovina



Obr. 3: Původní ošetrovací hlava



Obr. 4: Nová ošetrovací hlava fy RELBO

Lití na stroji COLOSIO PFO-1200 s použitím původní dvouřadé ošetrovací hlavy bylo s parametry procesu viz - tab. 1:

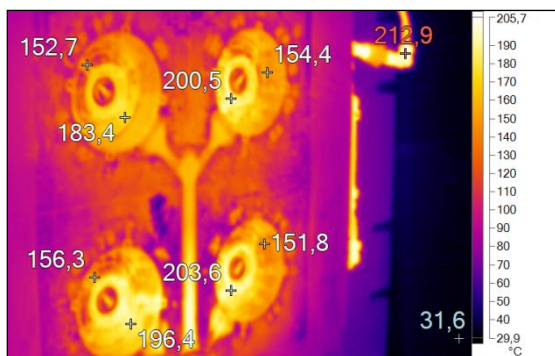
Tab. 1: Parametry procesu s původní hlavou

Cyklus stroje	85,5 s
Doba ošetření celkem	27,0 s
Doba postřiku	16,0 s
Doba ofuku	11,0 s
Separátor fy LUBROCHEM - DL602B	
Koncentrace separátoru:	2,2 %
Temperace formy	olej
Pevná pol. 1. okruh	235 °C
Pevná pol. 2. okruh	235 °C
Pohyblivá pol. 1. okruh	245 °C
Pohyblivá pol. 2. okruh	230 °C
Doba tuhnutí	8,5 s
Rychlost pístu I. fáze	0,2 m/s
Rychlost pístu II. fáze	2,9 m/s
Start II. fáze	400 mm
Dotlak III. fáze, (hydraulický)	310 bar
Doba náběhu dotlaku	120 ms
Licí teplota (nastavení)	720 °C
Licí teplota (skutečná na panelu)	720 °C
Slitina D226 - AlSi9Cu3(Fe)	

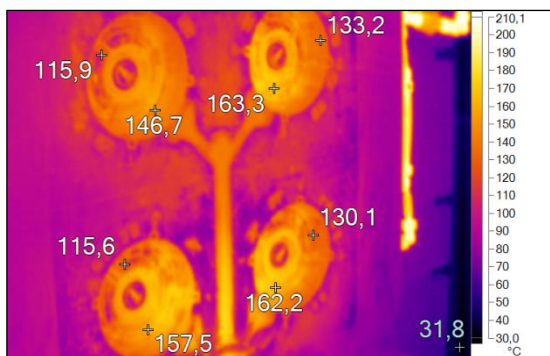
U původního procesu lití byla taktéž analyzována reálná teplota pevné pol. formy před a po ošetření (obr. 5 a 6) a pohyblivé pol. formy před a po ošetření (obr. 7 a 8) pomocí termokamery FlukeTi300.

Z uvedených termosnímků je zřejmé, že teplota pevné poloviny formy před ošetřením se pohybuje od 150 do 200 °C, což není optimální teplota pro vodou-ředitelný dělicí prostředek – nedostatečné odpaření vody dělicího prostředku a tím jeho nedokonalé uchycení na povrchu licí formy. Optimální teplota formy před ošetřením pro vodou ředitelné dělicí prostředky je obecně cca 250 °C. Optimální teplota taktéž závisí na typu dělicího prostředku. Používaný dělicí prostředek DL 602 B od fy LUBROCHEM může pracovat v rozmezí teplot 150 – 400 °C, kde ale optimální teploty jsou výrobcem doporučeny v rozsahu 250 – 350 °C pro dokonalou separační schopnost. Na pohyblivé polovině jsou teploty před ošetřením již vyšší, cca 170 – 270 °C, taktéž by ale bylo vhodnější dosažení teplot vyšších.

Z uvedené termoanalýzy vyplývá, že aktuální doba ošetření je nadměrná a použitím nové ošetřovací hlavy se vlivem zkrácení doby ošetření docílí vyšší teploty formy – tedy dosažení optimálnější teploty formy pro lepší funkci dělicího prostředku, dále také menších teplotních šoků na licí formě a tím prodloužení životnosti vložek.



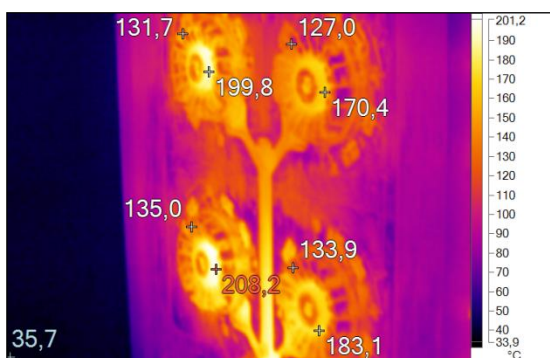
Obr. 5: Pevná pol. formy před ošetřením, s původní hlavou



Obr. 6: Pevná pol. formy po ošetření, s původní hlavou



Obr. 7: Po. pol. formy před ošetřením, s původní hlavou



Obr. 8: Pohyblivá pol. formy, po ošetření, s původní hlavou

LITÍ S POUŽITÍM NOVÉ OŠETŘOVACÍ HLAVY

Po instalaci nové ošetřovací hlavy fy Relbo Srl byl proces ošetření upraven tak, že nyní hlava vykonává jen krátké přejezdy. Navíc byl počet přejezdů podstatně snížen. Změny času jsou uvedeny v tab. 2.

Tab. 2: Úprava programu ošetření

	Původní	Po úpravě
doba ošetření celkem	27,0 s	13,0 s
doba postřiku	16,0 s	7,0 s
doba ofuku	11,0 s	6,0 s

Mimo úpravu programu ošetření došlo i k dalším úpravám v procesu:

- snížení teplot na ohřevěch formy (tab. 3) z důvodu, že je dosaženo vyšší teploty formy vlivem podstatně snížené doby ošetření, není nutné více temperovat (tab. 3)
- snížení koncentrace dělicího prostředku z původních 2,2 % (1:45) na 1,0 % (1:100). Původní koncentrace byla nadměrná. Výrobce dělicího prostředku byla doporučena koncentrace 1,0 % - při této koncentraci byla výroba odlitků LŠ bez zadírání a lepení hliníkové slitiny na povrchu licí formy. Naopak se dosáhlo světlejšího a čistšího povrchu odlitku

Tab. 3: Snížení teploty temperování

Temperace formy	Původní	Po úpravě
Pevná - 1. okruh	245 °C	190 °C
Pevná - 2. okruh	230 °C	190 °C
Pohyblivá - 1. okruh	235 °C	200 °C
Pohyblivá - 2. okruh	235 °C	200 °C

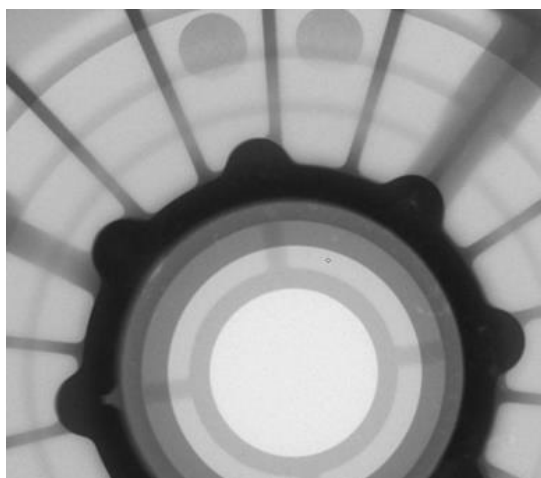
Vlivem provedených úprav došlo ke zkrácení cyklu stroje z 85,5 na 74,0 s. Zde bylo zjištěno, že cyklus by mohl být ještě rychlejší – byl zde problém s rychlostí a pohyby vyjímacího robota. Forma byla již otevřená s nachystaným odlevem k vyjmutí, zatímco robot ještě není připraven pro vyjmutí. Robot, po vyjmutí odlevu ulamuje přetoky a vlnovce odlevu, následně zachlazuje odlitek v chladicí vaně, zakládá odlev do ostřihovacího nástroje a následně po ostřihnutí odkládá vtok s tabletou na dopravník – čekání na tabletu a její následné odkládání na pás prodlužuje cyklus.

- na robotovi byla následně zvýšena rychlost všech pohybů, zkrácena doba čekání robota v lámacím přípravku, zvýšena rychlost pohybu z vany do lámacího přípravku a snížena doba čekání s odlevem nad chladicí vanou. Těmito úpravami se dosáhlo finálního cyklu 65,3 sec.
- poslední úpravou bylo snížení lící teploty nastavením ze 720 na 708 °C (skutečná teplota je po změření 710 °C). S nižší lící teplotou je menší riziko problematik zadírání odlitků a lepení hliníkové slitiny na povrchu formy. Snížená lící teplota nezpůsobila problematiky nedolití a studených spojů

Čas cyklu stroje 65,3 s byl finální. Proces výroby takto dále probíhal – nedocházelo k provozním problémům během lití, kvalita odlitků (obr. 1) byla vyhovující – odlitky dolité, bez studených spojů, čisté na svém povrchu bez mapovitosti. Taktéž byl porovnán RTG odlitků před zahájením zkoušky (obr. 9) a RTG odlitků po všech provedených úpravách technologie (obr. 10) s použitím nové ošetřovací hlavy, kdy cyklus lití byl zmíněných 65,3 s – zde bylo zjištěno, že došlo k mírnému zlepšení výskytu porezity uvnitř odlitku při optimalizovaném procesu za použití nové ošetřovací hlavy.



Obr. 9: Odlitky při původním procesu lití

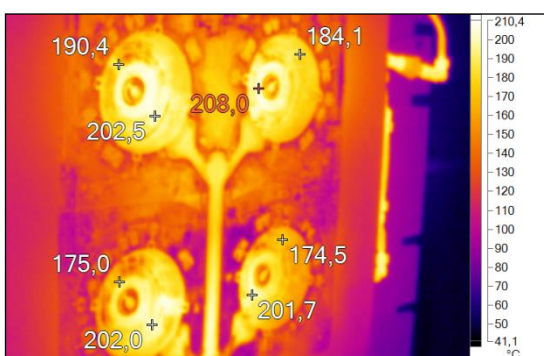


Obr. 10: Odlitky s použitím nové hlavy

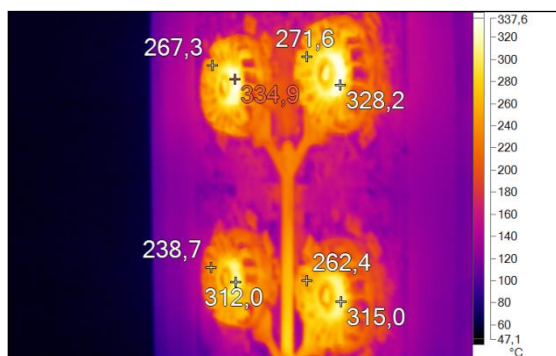
Optimalizací (úpravou ošetření formy) se podařilo zvýšit teplotu formy a tím dosáhnout příznivějších podmínek pro uchycení dělicího prostředku na povrchu formy a zvýšit jeho využití. Z termosnímků na obr. 11 až 14 je zřejmé, že nyní se na pevné polovině formy dosahuje teplot cca **239 °C** před ošetřením oproti původních cca **195 °C**. Na pohyblivé polovině formy došlo ke zvýšení teploty z původních cca **270 °C** na **334 °C** před ošetřením.



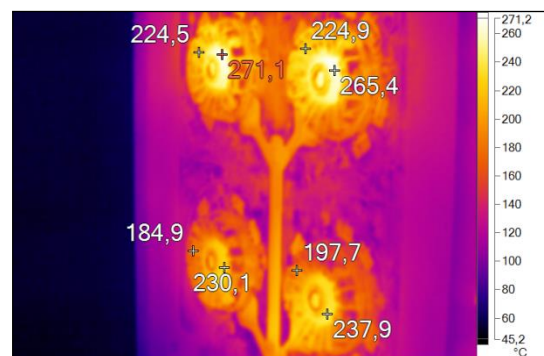
Obr. 11 Pevná pol. formy před ošetřením, nová hlava fy Relbo Srl



Obr. 12 Pevná pol. formy po ošetření, nová hlava fy Relbo Srl



Obr. 13 Poh. pol. formy před ošetřením, nová hlavy fy Relbo Srl



Obr. 14 Pohyblivá pol. formy po ošetření, nová hlavy fy Relbo Srl

Další možnosti využití nové hlavy

Nová hlava fy Relbo Srl disponuje 2. okruhem mazání v horní a spodní řadě hlavy s tryskami pro separátory na minimální dávkování (zelené trysky na obr. 4). Mísící jednotka fy Relbo Srl je sestavena pro 2 různé separační prostředky. Zde se nabízí varianta použití i 2. separátoru pro minimální dávkování (vodní, nebo olejová báze). Program ošetření na zařízení fy Relbo Srl je nastavován v tzv. „zónách“, kde každé zóně lze přiřadit, jestli bude aktivní 1. či 2. separátor. Podstatnou výhodou zařízení fy Relbo Srl je, že zóně lze přiřadit četnost provedení

– reálně tedy lze naprogramovat, aby 2. separátor pro minimální dávkování byl použit např. při každém x-tém cyklu. Takto lze občas přimazávat problémová místa formy.

Proces ošetření je možné nastavit i tak, že se přednostně bude v každém cyklu aplikovat separátor pro minimální dávkování (mikropostřik) a v případě přehřívání formy lze po určitém počtu cyklů provést 1 cyklus na standardní vodou-ředitelný separátor s cílem formu ochladit, což při běžném použití mikropostřiku nelze provést. Takový proces ošetření by bylo zajímavé otestovat pro pevnou polovinu formy, kde dochází k brzkému opotřebení (vznik prasklin) povrchu formy – uvedený způsob ošetření formy by mohl životnost vložek formy podstatně zvýšit.

Závěr

Zavedením nově vyvinuté ošetřovací hlavy fy Relbo Srl s následnou optimalizací celého procesu bylo dosaženo zkrácení výrobního času a tím zvýšení produktivity výroby odlitků LŠ. Níže jsou shrnuty všechny dosažené výsledky a jsou uvedeny i v tab. 4:

Tab. 4: Optimalizování procesu

Optimalizováno	Původní	Po úpravě
Doba cyklu	85,5 s	65,3 s
Doba ošetření formy	27,0 s	13,0 s
Koncentrace separátoru	2,20%	1,00%

- zrychlení cyklu stroje z 85,5 na 65,3 s tedy zvyšuje produktivitu výroby odlitků LŠ při dosažení ekonomické úspory
- zrychlením doby ošetření z 27,0 na 13,0 s se docílilo zvýšení teploty formy, čímž byly vytvořeny příznivější podmínky pro uchycení dělicího prostředku na licí formě, bylo dosaženo lesklejších a čistějších povrchů odlitků i s menším výskytem porezity. Vyšší teplota formy a kratší doba ošetření umožňuje dosáhnout vyšší životnost vložek formy, kde nedochází k velkým teplotním šokům na jejím povrchu. Kratší doba ošetření také přináší úsporu ve spotřebě separačního (dělicího) prostředku
- při optimalizaci byla taktéž snížena koncentrace dělicího prostředku DL 602 B fy LUBROCHEM z 2,2 % (1:45) na 1,0 % (1:100), což přináší taktéž ekonomickou úsporu vlivem nižší spotřeby prostředku

Již 4. generace nízkotlakých licích strojů ve slévárně BENEŠ a LÁT a.s.

Luňák, M.¹⁾, Horký, K.¹⁾

¹⁾ BENEŠ a LÁT a.s., Tovární 463, 289 14 Poříčany, milan.lunak@benesalat.cz

Klíčová slova

Nízkotlaký licí stroj; Hliníkové odlitky; Vývoj výrobních strojů; Konstrukce zařízení sléváren

Abstrakt

Tento příspěvek ze slévárenské praxe popisuje cestu postupného vývoje licích strojů pro odlévání pod nízkým tlakem. Jsou zmíněny ty nejvýznamnější milníky, což jsou generační obměny a rozšiřování strojového parku slévárny. Slévárna BENEŠ a LÁT a.s. si již mnoho let razí vlastní cestu vývoje a výroby nízkotlakých licích strojů. Současnou novinkou je již 4. generace licích strojů a nutno podotknout, že tento poslední model je postaven na základě letitého sběru provozních informací, podnětů slévačů či technologů a zároveň v sobě reflektuje všechny dostupné požadavky na konstrukční vylepšení. Celý vývoj byl podpořen bohatými zkušenostmi všech zúčastněných techniků a nejednalo se zdaleka jen o pracovníky slévárny lokalizované v Poříčanech u Českého Brodu.

ÚVOD

I v době, kdy statistikami produkce hliníkových odlitků rozhodně nejvíce hýbe vysokotlaká licí technologie, která díky tomu určuje směr a trendy v odlévání, se stále najde nemalý prostor pro nízkotlaké odlévání. Tato technologie je díky svým specifikám pro určitý segment výroby odlitků prozatím nepostradatelnou. I v ČR je poměrně mnoho sléváren hliníkových slitin jenž využívají tuto produkční technologii, ale jen málo která se vydává vlastní cestou vývoje licích strojů.

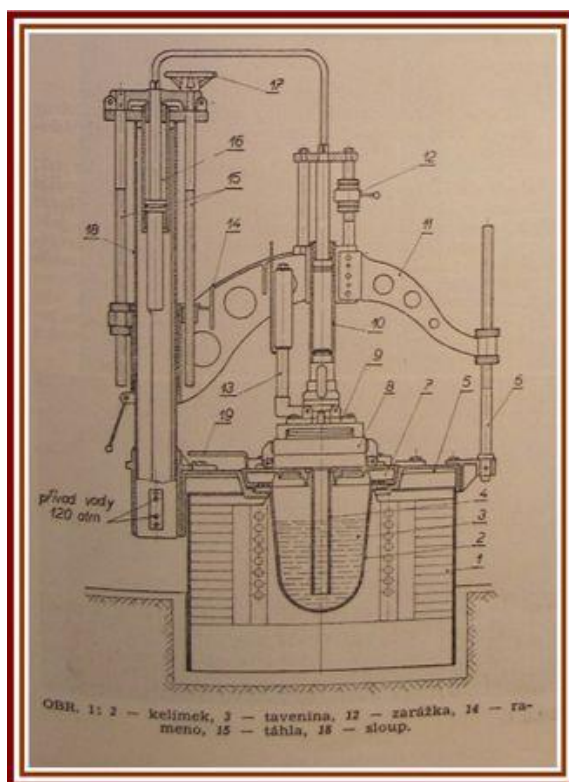
Mnozí se dozajista sami sebe ptají... *Co se ještě dá na nízkotlakém stroji vylepšit, rozvinout nebo optimalizovat?* Vždyť princip je jasně dán již dlouhá desetiletí a současně dostupné stroje na trhu dokáží vše potřebné a jsou na vysoké technické úrovni. Avšak všechno je to o vlastních potřebách a především rozvoji techniků podílejících se na vývoji v dané slévárně.

A proč se tedy slévárna BENEŠ a LÁT a.s. do vývoje a výroby licího stroje pustila? Je to vše o distribuci zkušeností a dovedností formou ztělesnění vlastních požadavků. A co je skutečnou přidanou hodnotou, jako duchovní vlastník vývoje držíte pevně pod pokličkou know-how a veškeré konstrukční a softwarové zdroje v nativních formátech. Při pohledu na tuto otázku z druhé strany je to poměrně logické, že slévárna se zkušenostmi přetrvávajícími přes 80 let se opět do vývoje licího stroje pustí. Domníváme se, že je ideální čas ve stručnosti a bez přílišných technických detailů, které si samozřejmě střežíme, nechat nahlédnout širší slévárenské veřejnosti do pomyslné kreativní kuchyně našich inženýrů.

JAK ŠEL ČAS NAPŘÍČ GENERACEMI NÍZKOTLAKÝCH LICÍCH STROJŮ...

Vývojem prvního nízkotlakého stroje se zabýval po roce 1948 již pan Ing. Josef Lát, děd současného předsedy představenstva společnosti BENEŠ a LÁT a.s.

Jednalo se o stacionární zařízení, které bylo pevně připevněno na kelímkovou udržovací pec bez možnosti vyklápění nástavby (rámu umístěném na peci), stoupací trubice byla přímo napojena na kovovou formu (kokilu), bez mezičlenu, tzv. mezikusu. Pro ilustraci uvádíme schéma výše popsaného zařízení na obr. 1. Již na první pohled je patrné, že od současných strojů se tento výrazně liší konstrukcí nástavby. A je třeba dodat, že o této generaci se nyní mluví jako o generaci „0“.



Obr. 1: Schéma prvního nízkotlakého licího stroje – 0. generace

Za další výrazný milník lze považovat vývoj a výrobu nízkotlakého licího stroje v 80. letech 20. století. Stroj vyprodukovaný v těchto letech je nazýván 1. generací. V této kompilaci (zobrazen na obr. 2) již není používán v provozu slévárny. Jeho pomyslná životní cesta byla ukončena s přesídlením provozu z Průhonice do Poříčan. Technicky vzato základním znakem bylo vyklápění nástavby, která byla otočnými čepy připevněna na víku vanové silitové pece o kapacitě 300 kg.

Výhodou byla velmi dobrá dostupnost k tavenině v peci při potřebě metalurgického ošetření rafinačními, očkovacími či modifikačními preparáty. Nevýhodou byla vanová udržovací pec se silitovými topnými tělesy, pozn. Silit je obchodní název pro Karbid křemíku SiC . Jelikož tyto topná tělesa měla nízký topný výkon a díky tomu nebylo udržování taveniny na licí teplotě efektivní, byla nutná změna. Dalším argumentem pro zahájené změny na tomto segmentu stroje byl fakt, že žáruvzdorná vyzdívka pece zarůstala nároty Korundu (Al_2O_3).



*Obr. 2: Lící stroj 1. generace s vanovou udržovací pecí,
přední strana vlevo a zadní strana vpravo*

Na počátku 21. století se tedy společnost rozhodla inovovat nízkotlaký lící stroj 1. generace a trvale nahradit vanovou udržovací pec se silitovými tělesy za udržovací pec elektrickou odporovou s kelímkem o kapacitě 350 kg resp. 500 kg uvnitř. Pozn. V současném strojním parku jsou obě varianty kapacitního provedení pece.



Obr. 3: 2. generace lícího stroje

Touto inovací vznikl stroj 2. generace, který se v průběhu následujících let vylepšoval převážně z hlediska SW řízení a drobnějších mechanických, pneumatických, hydraulických i

elektrických úprav. Na obr. 3 je možné si jej prohlédnout. Vylepšování trvá až do současnosti, ač se nejedná o radikální úpravy. Jelikož v posledních letech je snahou procesy optimalizovat a sériovou výrobu stabilizovat, tak jsou průběžně implementovány různé upgrady řídicího systému stroje. Ať už se týkají sběru výrobních dat, tzv. data miningu nebo fixování klíčových parametrů odlévání za účelem minimalizace variability procesu. Připomeňme, že tímto faktorem bývá nejčastěji ten lidský a proto je záhodno jeho vliv co nejvíce redukovat přístupovými právy, hesly a podobnými technikami.

V roce 2008 vyvstala potřeba většího nízkotlakého licího stroje, který musel mít větší pracovní prostor pro upnutí rozměrnější kovové formy a byl kladen důraz i na celkovou robustnost nástavby. Tím začal vývoj stroje 3. generace, jenž je zobrazen na obr. 4. Důležitou inovací bylo z mechanické stránky věci upínání forem do stroje, kde byl tlak na maximální časové zkrácení nutného prostoje. A z elektronické stránky věci řízení stroje. Stroj je vybaven dotykovým displejem, SW umožňuje řízení chlazení forem, nastavení technologických prodlev mezi výrobními cykly, detailněji nastavovat licí parametry, tedy tlaky a časy atd. Pro představu Vás čtenářů je na obr. 5 uvedeno foto řídicího systému, jeho dotykového panelu.



Obr. 4: 3. generace licího stroje



Obr. 5: Řídicí panel stroje 3. generace

A nyní se dostáváme skokem o téměř deset let dále, troufáme si říci k tomu naprosto klíčovému proč tento článek vznikl. Je jím vývoj nejnovějšího modelu nízkotlakého licího stroje označovaného jako NTL 3.2, který je poslední generací, tedy 4. generací (obráz. 6).

Rozdílů mezi 3. a 4. generací je skutečně mnoho, však nás učila sama zkušenost, nás všechny co se stroji pracujeme na každodenní bázi. Detailněji rozepisovat všechna vylepšení a změny, to by byl seznam velmi dlouhý. Pojdme se tedy zaměřit na to nejpodstatnější, i když předem musím zmínit, že z důvodu podpisu několika smluv na úrovni NDA (Non-disclosure agreement) nemůžeme vyrazovat konkrétní technické detaily.



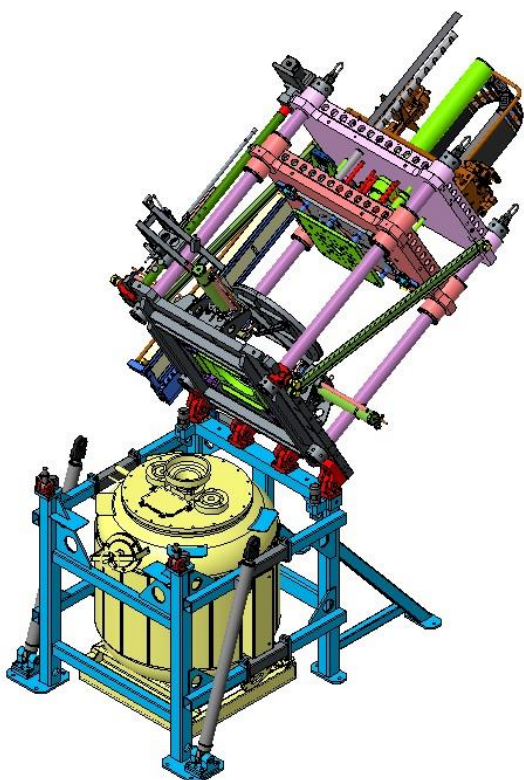
Obr. 6: Pohled na celý lící stroj 4. generace

Tím čím se sluší a patří začít je rozhodně fakt, že stroj vychází z 3. generace a hlavním záměrem bylo odladit provozní nedostatky stroje, zaměřit se na simplifikaci (tedy odstranění nepoužívaných funkcionalit a periferií) a přetvořit si řídicí systém ke svému uživatelskému obrazu.

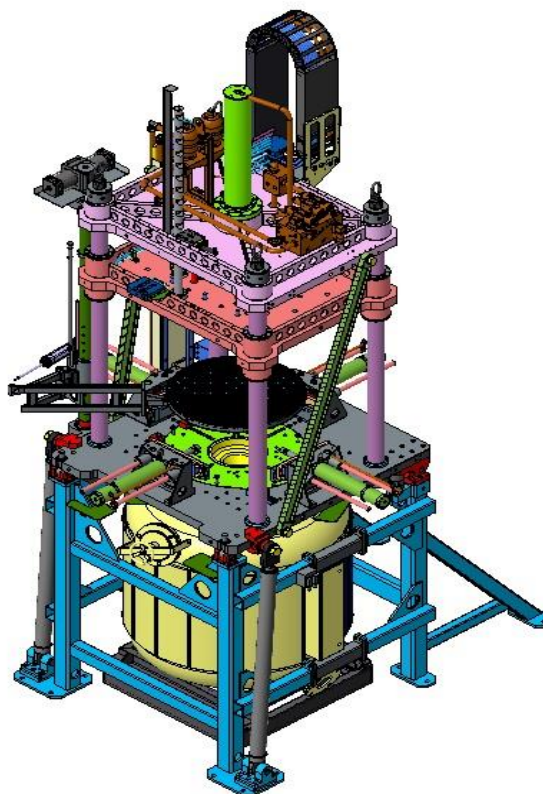
Když začneme od mechanické stránky stroje. Tuhost nástavby je to, co je pro nás úplně nejdůležitější. Je logické, že při dobré tuhosti není problém s vyrážením odlitků z formy, nedochází ke zbytečným otřesům, které škodí elektronice stroje a samozřejmě je možné vyrobit přesnější odlitky a nenastávají potíže při odformování rozměrných plošných odlitků. Cílem bylo také vyrobit upínání lících forem tak, aby bylo co nejjednodušší a hlavně existovala možnost upnout formy, které se běžně odlévají na strojích 2. i 3. generace. Velkou snahou při návrhu bylo zaměřit se na elektronické prvky a jejich polohu vůči hlavnímu zdroji tepla a díky tomu zajistit jejich delší živostnost a bezporuchovost. V tomto případě platí, že méně je někdy více a stroj NTL 3.2 je více produkčním strojem než aby byl nějakým výplodem sofistikovaného přístupu na poli elektroniky. To však lze prohlásit o řídicím systému stroje. PLC (Programmeable Logic Controller) je nabitý různými sledovači od běžných lících parametrů, přes různé statistiky i údaje o údržbě stroje. Již standardem je správa tzv. na dálku. Tedy připojení se přes PC z kterého koutu světa, kde je dostupný Internet a monitorování a dokonce vykonávání různých úkonů na ovládání stroje.

Stroj NTL 3.2 je postaven na udržovací peci odporové kelímkové o velikosti 800 kg taveniny.

Především ze stavebních důvodů haly provozu slévárny byl zachován systém vyklápění nástavby a z toho plynoucí metalurgický proces přípravy taveniny a distribuce slitin. Vyklápění je naznačeno na obr. 7 a 8. Nebylo ani opomenuto vodní chlazení forem a jeho řízení. Při skladbě výrobního programu je vodní chlazení licích forem stále větší nutnosti a jsou odlitky, u kterých se bez něho nelze obejít. I v této oblasti došlo k několika menším vylepšením. Pro představu uživatelského rozhraní na PLC je vložen obr. 9.



Obr. 7: 3D model celého stroje v CAD
– stroj v základní provozní poloze



Obr. 8: 3D model celého stroje v CAD
– stroj ve vyklopené poloze

ZÁVĚR

Jak jste se v průběhu článku mohli dočíst, historie i tradice výroby nízkotlakých strojů pro odlévání hliníkových slitin zůstává pod křídly společnosti BENEŠ a LÁT a.s. i nadále a nejen vedení společnosti věří, že podobné vývojové projekty budou pokračovat. Jsme si jistí, že skrze nabitě zkušenosti má technická základna inženýrů poříčanské slévárny co nabídnou nejen na poli působnosti tohoto projektu, ale také výraznou přidanou hodnotu technologického know-how. Stroj označovaný jako NTL 3.2 je postaven na míru a zahrnuje to nejlepší z našich vylepšení a inženýrských kreativních nápadů vůbec.

Úplným závěrem bychom rádi zmínili nové motto společnosti, které dle našeho názoru velmi zřetelně vystihuje tento počín o kterém je psáno v příspěvku. Motto společnosti je „*Souhra týmu, souhra technologií*“. Právě toto heslo razí pospolitost při týmovém návrhu, dílčích realizacích a finální implementaci zařízení do slévárenského provozu. Nezbyvá nic jiného než vyslovit..., „Skutečně velké díky, všem zúčastněným kolegům“.

Sborník přednášek z 8. Holečkovy konference

Autoři: Kolektiv autorů

Vydal: Česká slévárenská společnost, z.s., člen ČSVTS Praha

Adresa: Divadelní 6, 657 34 Brno

Rok vydání: 2019

Vydání: 1.

Náklad: 110 ks

Počet stran: 137

Vazba: brožovaná

Vytiskl: Česká slévárenská společnost, z.s. (vlastním nákladem)

Poznámka: Neprošlo jazykovou úpravou.

ISBN 978-80-02-02857-4

