

Grafitizační očkování při výrobě odlitků z litiny s lupínkovým a kuličkovým grafitem

Graphitizing inoculation in the manufacture of castings from lamellar and spheroidal graphite cast irons

Ing. Jan Bredl, student Ph.D.

Technická Univerzita v Liberci, Fakulta strojní, Katedra strojírenské technologie

doc. Ing. Iva Nováková, Ph.D.

Technická Univerzita v Liberci, Fakulta strojní, Katedra strojírenské technologie

Klíčová slova

Grafitizační očkování, odlévání, litiny s lupínkovým a kuličkovým grafitem

Key words

Graphitizing inoculation, casting, lamellar and spheroidal graphite cast irons

Abstrakt

Ve slévárně METALURGIE Rumburk s.r.o. jsou rotační pece tavicími agregáty pro výrobu litiny s lupínkovým a kuličkovým grafitem. Ve vsázce pro litinu s lupínkovým grafitem byl snížen podíl surového železa o 25 %, došlo tedy k velké změně poměru vsázkových surovin. Z tohoto důvodu bylo nutné prověřit účinky grafitizačního očkování nataveného kovu do lící jamky a rovněž do lící pánve. U prověřovaných taveb byly zjištěny mechanické hodnoty a bylo také provedeno detailní strukturní vyhodnocení. Vlivem grafitizačního očkování nedošlo ke změně mechanických hodnot a rovněž struktura byla perlitická, odpovídající požadovanému materiálu ČSN-EN-250 [1]. Očkování bylo účinné, na odlitcích nedošlo k vytvoření hranových zákalek, které jsou u složitých odlitků obráběcích strojů nepřijatelné [2]. U litiny s kuličkovým grafitem bylo prově-

řeno grafitizační očkování do proudu tekutého kovu termickou analýzou AccuVo a následným vyhodnocením pomocí softwaru Apromace. Eutektické tuhnutí lze ovlivnit množstvím očkovadla [3]. Grafitizační očkování se u LKG ve slévárně provádí plněným profilem ihned po modifikaci plněným profilem přímo v dávkovací stanici dodané firmou Progelta.

Abstract

The Metalurgie Rumburk Ltd. Foundry has rotation furnaces for the production of lamellar graphite cast iron (GJL) and nodular graphite cast iron (GSJ). The furnace charge of pig iron for GJL cast iron was decreased by 25% thus changing the ratio of the batch furnace raw materials. The effect of graphitization inoculation during casting of the metal into a foundry ladle and a pouring cup were verified. The inoculation was effective, no hard quenched edges on castings for machine tools were formed. Mechanical properties were verified on cast testing rods located on the castings. Modification in the GSJ material is performed in the foundry in the filled profile followed immediately by graphitisation inoculation also in the filled profile.

Úvod

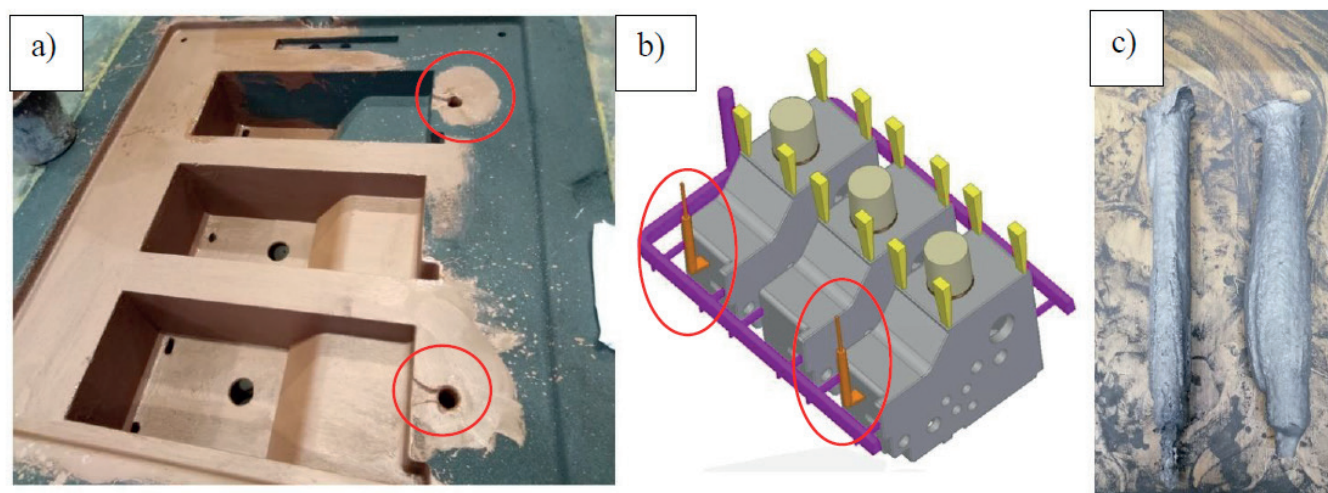
Vzhledem k vývoji ekonomické situace a neustálému zdražování vsázkových surovin v ČR během roku 2022, byly ve slévárně METALURGIE Rumburk s.r.o. (MR) provedeny zkoušky se snížením obsahu surového železa ve vsázce do rotační bubnové pece o 25 %. Zkoušky se se provedly u výchozího kovu v rotační peci pro litinu s lupínkovým grafitem (LLG). Ve zkušebních tavebách byl ověřen očkovací účinek očkovadel, které se ve slévárně MR běžně používají. V MR se používají čtyři

Tab. 1. Chemické složení očkovačel Germalloy a Optigran

GERMALLOY	% Si	68 - 76	OPTIGRAN	% Si	68 - 76
	% Al	3,2 - 4,5		% Al	0,8 - 1,8
	% Ca	0,3 - 1,5		% Ca	0,3 - 1,4
	% Mg	stopové množství		% Mn	3,5 - 4,5
	% Se	stopové množství			
	% Fe	zbytek			

Tab. 2. Výsledek tahové zkoušky u vzorků očkovaných OPTIGRANEM

Vzorek	Rm [MPa]
22A0158-0	231,116
22A0158-1	228,784
22A0158-2	243,6
Průměr vzorku 1-2	236,192



Obr. 1. Příprava vzorků při očkování pomocí očkovačel OPTIGRAN; a) foto vzorků ve formě, b) 3D model se vzorky, c) odlité vzorky odříznuté z odlitků

způsoby očkování, konkrétně se tedy jedná o očkování do licí jamky, očkování do licí pánve, očkování pomocí plněného profilu a očkování do proudu taveniny při odpichu pece. Pro ověření očkovacího účinku jednotlivých metod byl ve slévárně MR uskutečněn experiment pro každou metodu zvlášť. Vyhodnocením očkovacího účinku u jednotlivých metod se pak podrobně zabývají následující kapitoly.

Grafitizační očkovaní u odlitků z LLG

Grafitizační očkovaní do licí jamky

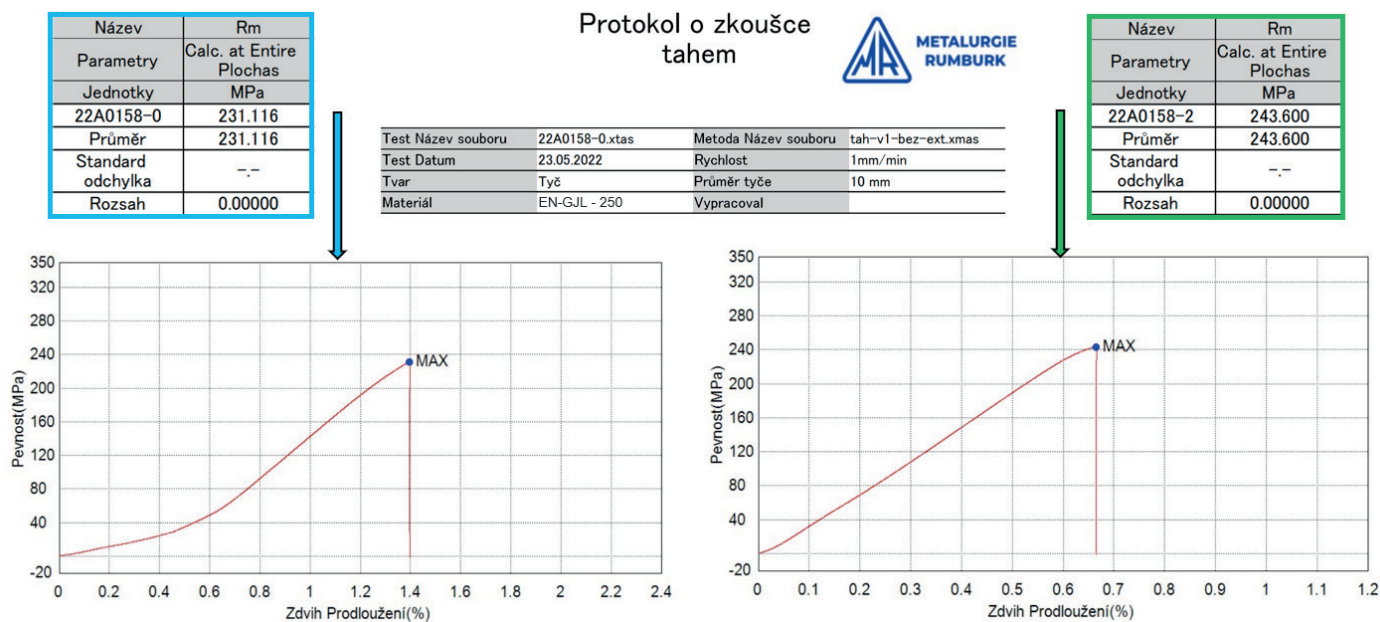
Grafitizační očkovaní do licí jamky se v MR provádí za pomoci očkovačel OPTIGRAN (pro litinu s lupinkovým grafitem) a GERMALLOY (pro litinu s kuličkovým grafitem). Chemické složení jednotlivých očkovačel je pak zachyceno v **tab. 1**, kde je uvedeno i očkovačel GERMALLOY používané pro očkovaní do licí jamky u odlitků z LKG.

Vliv očkování na mez pevnosti v tahu Rm

Pro zkoušku byl zvolen materiál EN-GJL-250 a očkovaní tedy proběhlo pomocí očkovačel OPTIGRAN. V rámci experimentu byly odebrány celkem 3 vzorky, kdy první vzorek č. 22A0158-0 byl získán z neočkované taveniny odlitím vertikální formičky se 3 tyčkami o průměru 30 mm. Jedna z těchto 3 tyček pak byla použita na výrobu vzorku pro tahovou a metalografickou zkoušku. Další dva vzorky č. 22A0158-1 a 22A0158-2 rovněž o průměru 30 mm byly připraveny ve formě pomocí speciálního vrtáku a byly odlity rovněž vertikálně. Pozice jednotlivých vzorků je zachycena na **obr. 1**.

Celkem tedy byly vyhotoveny 3 zkušební tyčky pro tahovou zkoušku, výsledek je uveden v **tab. 2** a na **obr. 2**. Rovněž byly vyhotoveny 3 vzorky pro metalografickou zkoušku, výsledky jsou zobrazeny na **obr. 3** a v **tab. 3**, pro prezentaci výsledků byly vybrány vzorky číslo 22A0158-0 a 22A0158-2.

Grafitizační očkovaní při výrobě odlitků z litiny s lupinkovým a kuličkovým grafitem



Obr. 2. Porovnání výsledků Rm tahové zkoušky u vzorku 22A0158-0 (neočkovaný kov) a 22A0158-2 (očkovaný kov)

Tab. 3. Výsledky metalografické zkoušky u jednotlivých vzorců za použití očkovač OPTIGRAN

Číslo vzorku	očkováno	struktura	Třída grafitu	Velikost grafitu	%
22A0158-0	NE	P, FE, C	4	120-250 μm	5
			5	60-120 μm	15
			6	30-60 μm	25
			7	15-30 μm	55
22A0158-1	ANO	P, FE, C	4	120-250 μm	5
			5	60-120 μm	20
			6	30-60 μm	20
			7	15-30 μm	55
22A0158-2	ANO	P, FE, C	4	120-250 μm	5
			5	60-120 μm	20
			6	30-60 μm	20
			7	15-30 μm	55

Legenda: P - perlit, FE - fosfidické eutektikum, C - cementit

Průměrná hodnota meze pevnosti v tahu ze vzorků č. 22A0158-1 a 22A0158-2 byla $R_m = 236,192$ MPa, což je poněkud více než 231,116 MPa, hodnoty dosažené u vzorku 22A0158-0, který byl vyroben z neočkované taveniny. Ani jedna hodnota tedy nedosáhla požadovaných $R_{m, \min}$ 250 MPa stanovených normou ČSN EN

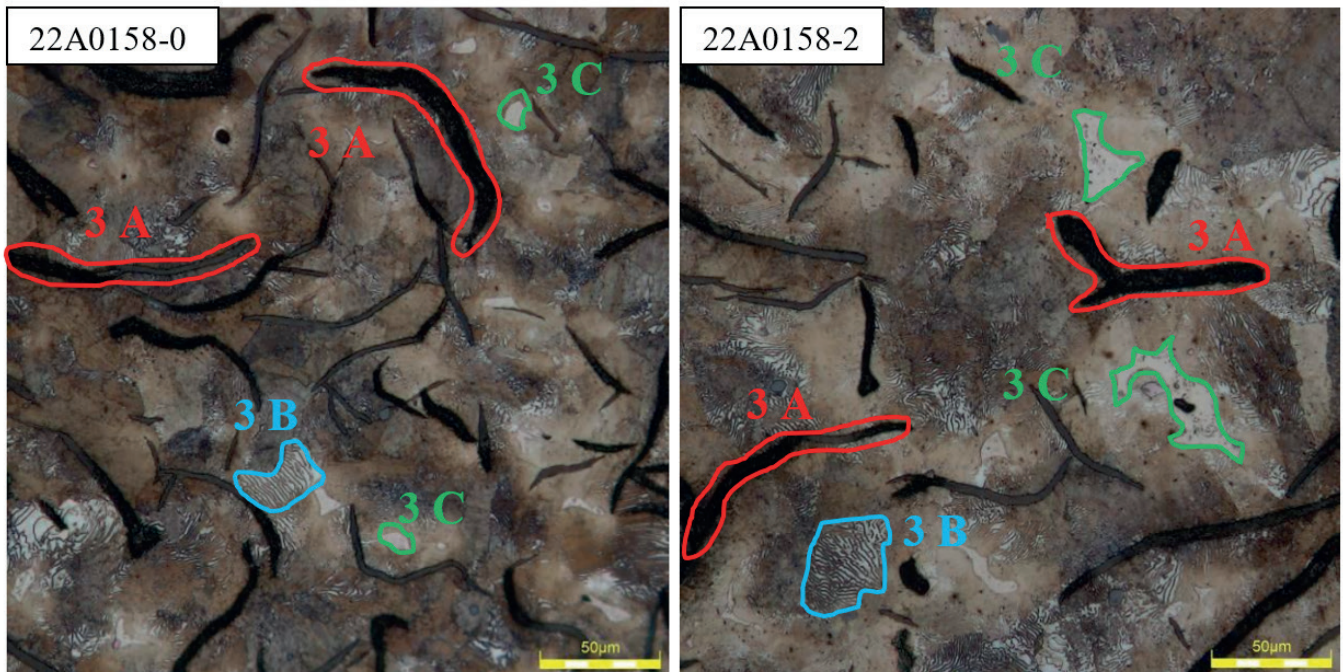
1561. Jak je tedy patrné z výsledků tahových zkoušek, očkovaní do jamky pomocí očkovač OPTIGRAN nemělo na mez pevnosti v tahu téměř žádný vliv. Je nutné zdůraznit, že mez pevnosti v tahu R_m byl zjišťován na průměrové tyči $d = 30$ mm, která byla součástí odlitků přímo ve formě.

Metalografické vyhodnocení

Velikost grafitu byla u všech tří vzorků velmi podobná a pohybovala se u vzorků 22A0158-1,2 od 15 do 250 μm, resp. 5 % třídy velikosti grafitu 4 (od 120 do 250 μm), 20 % třídy 5 (od 60 do 120 μm), 20 % třídy velikosti 6 (od 30 do 60 μm), 55 % třídy 7 (od 15 do 30 μm). Rozdíl mezi očkovaným a neočkovaným kovem je minimální a dá se konstatovat, že v tomto případě nemělo očkovaní zásadní vliv na velikost ani disperzitu grafitu. Rozložení grafitu ve struktuře je smíšené, v některých částech vzorků mezidendriticky usměrněné (22A0158-2) a v některých částech mezidendriticky neusměrněné (22A0158-0). Veškeré hodnoty ohledně velikosti grafitu jsou pro všechny vzorky uvedeny v **tab. 3**.

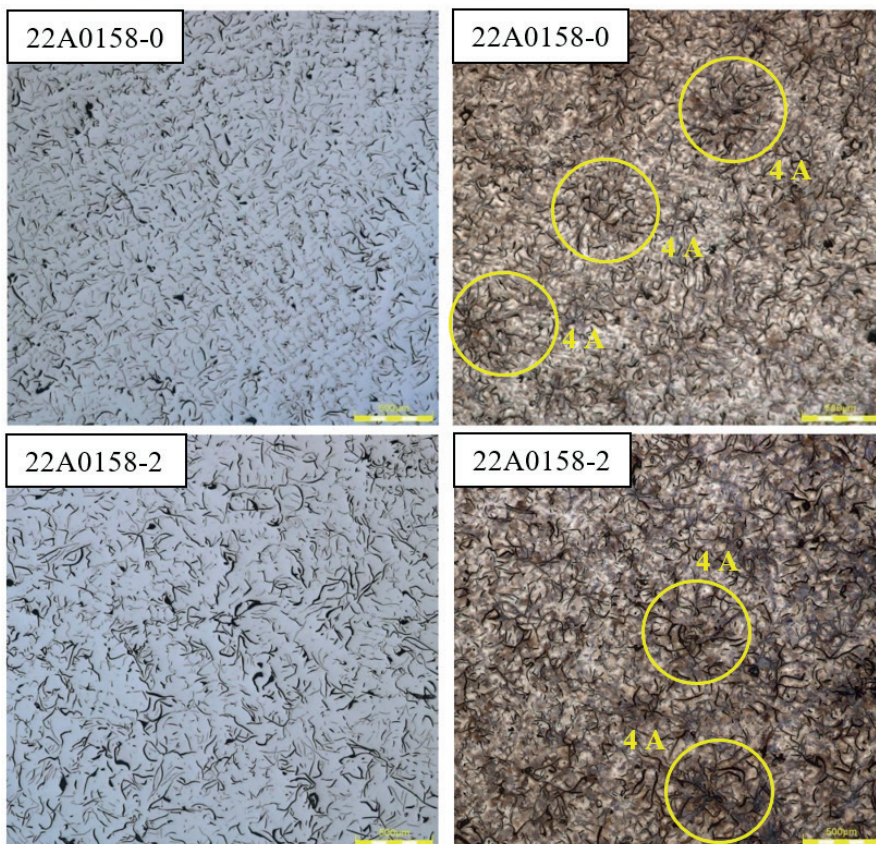
Tab. 4. Chemické složení tavy 22A0158

Číslo tavy	C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Cu [%]	Mg [%]
22A0158	3,175	0,909	1,736	0,218	0,061	0,136	0,182	0,0012



Obr. 3. Metalografický výbrus vzorků 22A0158-0 a 22A0158-2 z materiálu EN-GJL-250 s plně perlitickou matricí, lept. Nital 3 %, zvětšeno 1000×

Označení: 3 A – lupínkový grafit, 3 B – lamelární perlit, 3 C – fosfidické eutektikum



Obr. 4 Metalografický výbrus vzorků 22A0158-0 a 22A0158-2 z materiálu EN-GJL-250 s plně perlitickou matricí, obrázky vlevo neleptáno, obrázky vpravo lept. Nital 3 %, zv. 100×; označení: 4 A růžicové uspořádání LLG

Kovová matrice je plně perlitická, jak je patrné na **obr. 3 a 4**. To mohlo být způsobeno větším podílem perlitotvorných prvků, např. Mn a vyšším podílem fosforu, neboť ve vzorcích je přítomen steadit. Chemické složení tavby, ze které byly odlity vzorky, je zobrazeno v **tab. 4**.

Jak je patrné z **obr. 3 a 4**, tato litina s lupínkovým grafitem (označení 3 A) má perlitickou strukturou (označení 3 B). Ve struktuře se nachází pseudobinární fosfidové eutektikum (označení 3 C) vyloučené v jednotlivých útvarech a po hranicích zrn se vyskytuje cementit. Na **obr. 4** je viditelné růžicové uspořádání litiny (označení 4 A), rozložení grafitu ve struktuře je smíšené a v některých částech vzorku mezidendriticky usměrněné. Žádný ze vzorků nemá ve své struktuře místa s menší hustotou rozložení grafitu, vzorky jsou tedy v celém průřezu homogenní,

Tab. 5. Chemické složení očkovadla SUPERSEED

SUPERSEED	% Si	73-77
	% Sr	0,6-1
	% Ca	max 0,15
	% Al	max. 0,6
	% Fe	zbytek

Tab. 6. Výsledek tahové zkoušky u vzorků očkovaných SUPERSEEDEM

Vzorek	Rm [MPa]
22A0146-0	241,673
22A0146-1	233,994
22A0146-2	239,279
22A0146-3	237,939
22A0146-4	244,121
22A0146-5	VADNÁ ZKUŠ. TYČ
22A0146-6	NEDOLITÝ VZOREK
Průměr vzorků 1-4	238,833



Obr. 5 Příprava vzorků při očkování pomocí SUPERSEEDU

což má příznivý vliv na vlastnosti litiny.

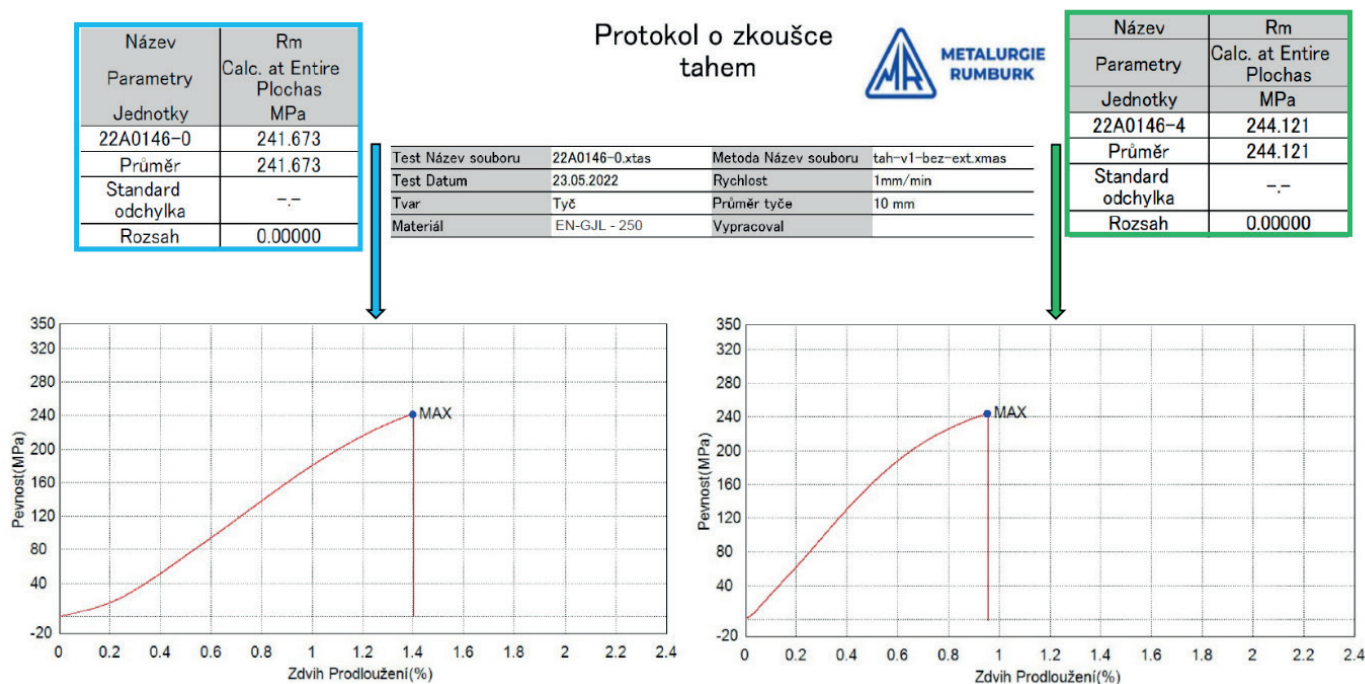
Očkování do licí pánve

Očkování do licí pánve se v MR provádí pomocí očkovadla SUPERSEED, které je rovněž známé pod označením SrFeSi neboli Ferrosillicon stroncium. To se v potřebném množství nasype na dno licí hrncové pánve a následně se na něj nalije tavenina. Pak dojde rozpuštění a rovnoměrnému promíchání taveniny s očkovadlem. Chemické složení SrFeSi je uvedeno v **tab. 5** [4].

Pro ověření funkčnosti očkovadla SUPERSEED byl opět zvolen materiál EN-GJL-250. V rámci experimentu bylo

odebráno celkem 7 vzorků, první vzorek č. 22A0146-0 byl získán z neočkované taveniny odlitím vertikální formičky se 3 tyčkami o průměru 30 mm. Jedna z těchto 3 tyček pak byla použita na výrobu vzorku pro tahovou a metalografickou zkoušku. Dalších šest vzorků, konkrétně č. 22A0146-1 až 22A0146-6, rovněž o průměru 30 mm, byly připraveny ve formě pomocí speciálního vrtáku a byly odlity vertikálně. Pozice jednotlivých vzorků je pak zachycena na **obr. 5**. Z těchto šesti připravených vzorků bylo pět úspěšně odlito, jeden vzorek byl nedolitý a byl nedostatečný, jak pro výrobu vzorku na tahovou zkoušku, tak pro výrobu vzorku pro metalografické vyhodnocení. Z odlitých vzorků bylo tedy vyrobeno 5 zkušebních tyček pro zkoušku tahem a 5 vzorků na

Grafitizační očkování při výrobě odlitků z litiny s lupinkovým a kuličkovým grafitem



Obr. 6. Porovnání výsledků tahové zkoušky u vzorku 22A0146-0 (neočkováný kov) a 22A0146-4 (očkováný kov)

Tab. 7. Výsledky metalografické zkoušky u jednotlivých vzorků za použití SUPERSEEDU Označení: P – perlit, FE – fosfidické eutektikum, C – cementit

Číslo vzorku	očkováno	struktura	Třída grafitu	Velikost grafitu	%
22A0146-0	NE	P, FE, C	4	120-250 μm	5
			5	60-120 μm	20
			6	30-60 μm	25
			7	15-30 μm	50
22A0146-1	ANO	P, FE, C	4	120-250 μm	5
			5	60-120 μm	25
			6	30-60 μm	20
22A0146-2	ANO	P, FE, C	4	120-250 μm	5
			5	60-120 μm	25
			6	30-60 μm	20
22A0146-3	ANO	P, FE, C	4	120-250 μm	5
			5	60-120 μm	25
			6	30-60 μm	20
22A0146-4	ANO	P, FE, C	4	120-250 μm	5
			5	60-120 μm	25
			6	30-60 μm	20
22A0146-5	ANO	P, FE, C	4	120-250 μm	5
			5	60-120 μm	20
			6	30-60 μm	25
22A0146-6		NEDOLITÝ VZOREK			

metalografii. Při kontrole tyček pak jedna byla vyřazena, protože obsahovala vadu.

Vliv očkování na mez pevnosti v tahu Rm

Vyhodnocení meze pevnosti bylo provedeno pouze ze 4 vzorků. Hodnoty meze pevnosti Rm, dosažené u jednotlivých vzorků, jsou zaneseny v **tab. 6** a na **obr. 6** jsou pak zobrazeny vybrané grafy z průběhu tahových zkoušek.

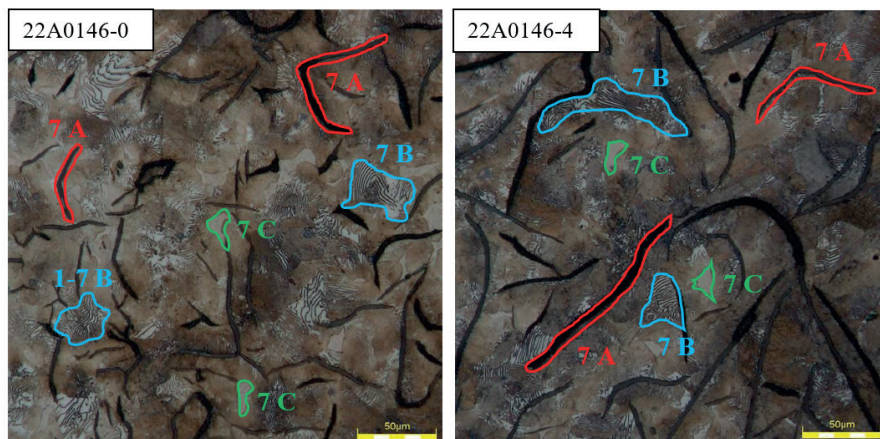
Průměrná hodnota meze pevnosti v tahu Rm ze vzorků č. 22A0146-1 a 22A0146-4 byla 238,833 MPa, což je o trochu méně než 241,673 MPa, než bylo dosaženo u vzorku 22A0146-0, který byl vyroben z neočkované taveniny. Mez pevnosti v tahu Rm u očkováných vzorků byla dokonce nižší než u neočkované varianty, z toho vyplývá, že očkování pomocí očkovadla SUPERSEED do pánve nemělo na mechanické vlastnosti žádný vliv.

V **tab. 7** a jsou uvedeny výsledky metalografických zkoušek jednotlivých vzorků a na **obr. 7** jsou zobrazeny fotografie výbrusů vzorků 22A0146-0 a 22A0146-4.

Jak uvádí **tab. 7**, velikost grafitu byla u všech vzorků prakticky stejná a pohybovala se v rozmezí od 15 do

Tab. 8. Chemické složení tavby 22A0146

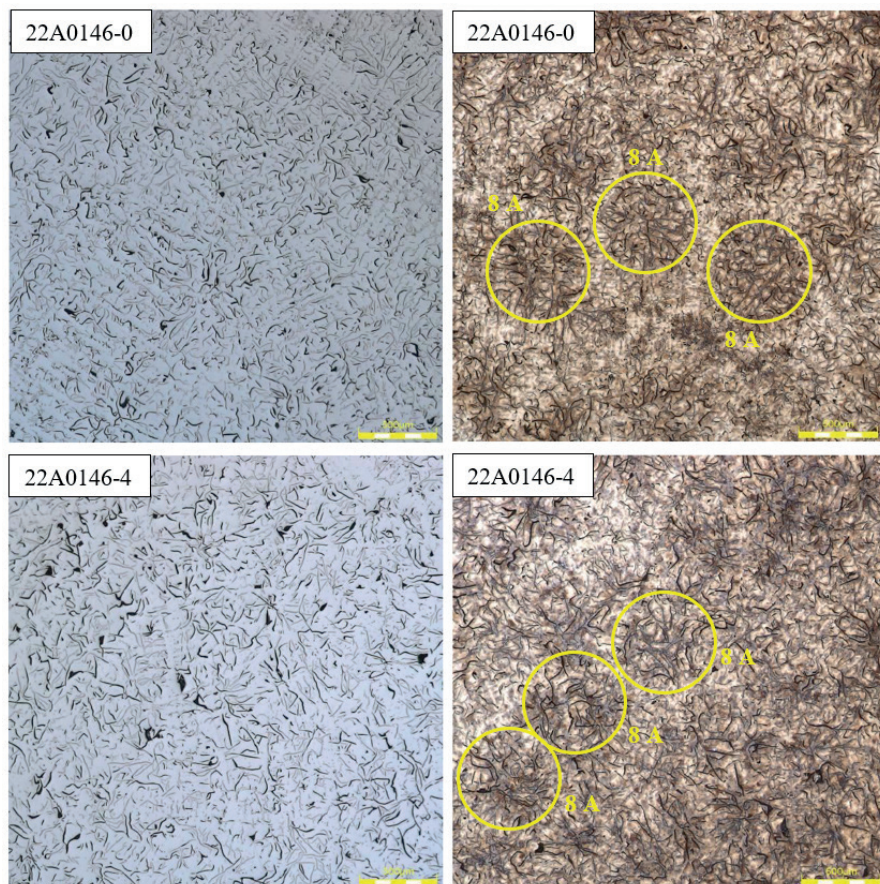
Číslo tavby	C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Cu [%]	Mg [%]
22A0146	3,207	0,648	1,807	0,242	0,059	0,085	0,134	0,001



Obr. 7 Metalografický výbrus vzorků 22A0146-0 a 22A0146-4 z materiálu EN-GJL-250 s plně perlitickou matricí, lept. Nital 3 %, zvětšeno 1000×
Označení: 7 A – lupinkový grafit, 7 B – lamelární perlit, 7 C – fosfidické eutektikum

250 µm, nejčastěji v tomto rozložení: 5 % třídy velikosti grafitu 4 (od 120 do 250 µm), 25 % třídy 5 (od 60 do 120 µm), 20 % třídy velikosti 6 (od 30 do 60 µm), 50 % třídy 7 (od 15 do 30 µm). Rozdíl mezi očkováním a neočkováním kovem je minimální a dá se říct, že ani v tomto případě nemělo očkování zásadní vliv z hlediska velikosti nebo disperzity grafitu.

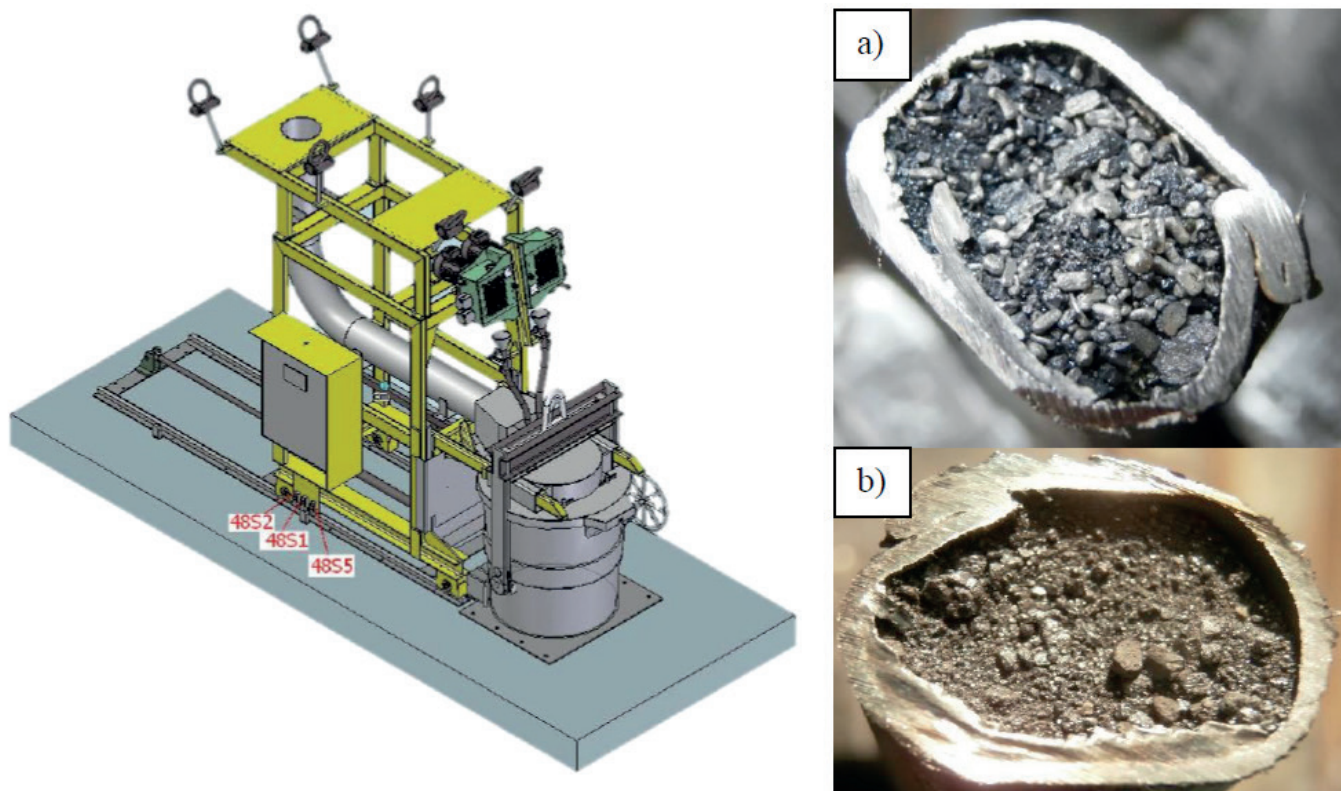
I v tomto případě nebyla kovová matrice perliticko-felitická, ale plně perlitická, což je vidět na **obr. 7 a 8**. To mohlo být opět způsobeno větším podílem perlitotvorných prvků, jako je např. Mn a vyšším podílem fosforu, neboť se ve struktuře vyskytuje steadit. Chemické složení tavby, ze které byly odlity vzorky, je zobrazeno v **tab. 8**.



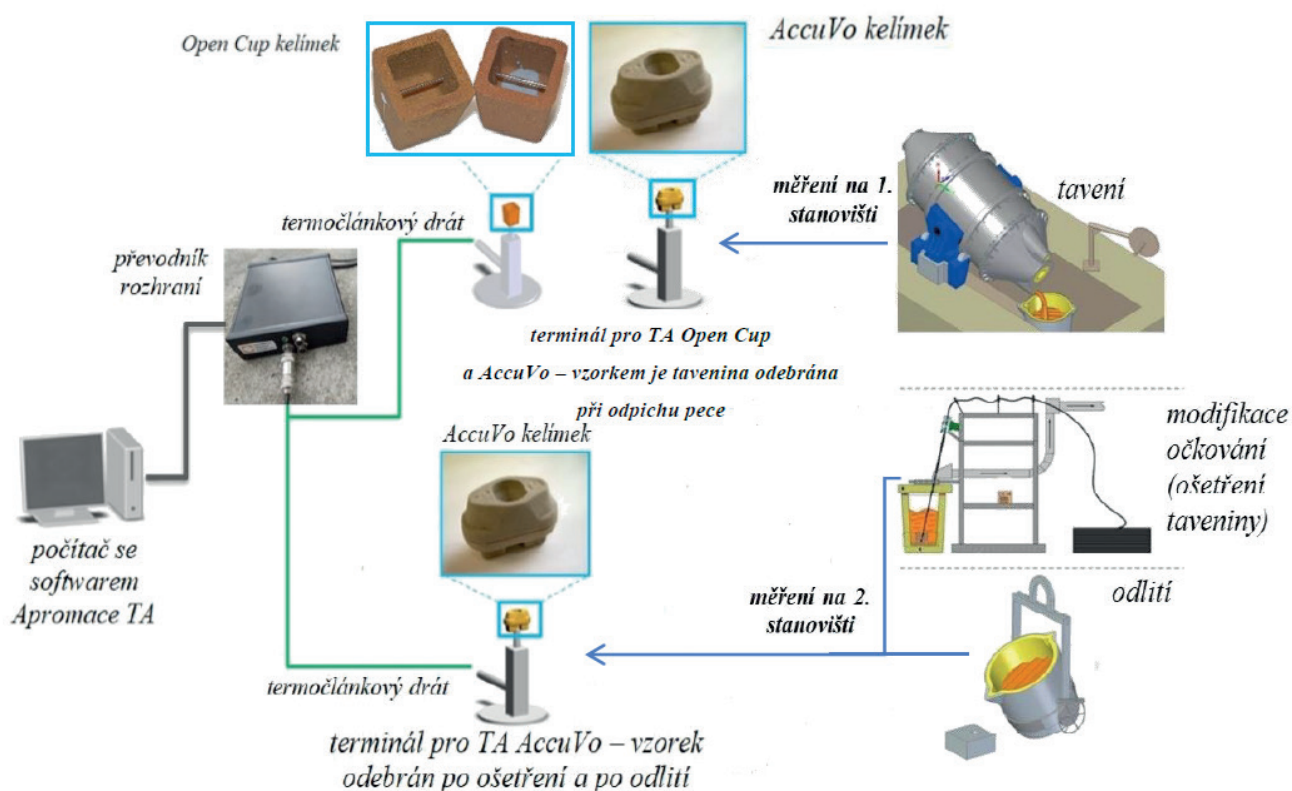
Obr. 8 Metalografický výbrus vzorků 22A0158-0 a 22A0158-2 z materiálu EN-GJL-250 s plně perlitickou matricí, obrázky vlevo neleptáno, obrázky vpravo lept. Nital 3 %, zv. 100×
Označení: 8 A růžicové uspořádání LLG

Na **obr. 7 a 8** je vidět litina s lupinkovým grafitem (označení 7 A), která má plně perlitickou strukturu (označení 7 B). Ve struktuře se nachází pseudobinární fosfidové eutektikum (označení 7 C) vyloučené v jednotlivých útvarech, po hranicích zrn se vyskytuje cementit. Na **obr. 8** je velmi dobře viditelné růžicové uspořádání této LLG (označení 8 A), rozložení grafitu ve struktuře je smíšené, v některých částech vzorku mezidendriticky usměrněné (22A0146-0, 22A0146-4). Žádný ze vzorků nemá ve své struktuře místa s menší hustotou rozložení grafitu, vzorky jsou tedy v celém průřezu homogenní, což má příznivý vliv na vlastnosti litiny.

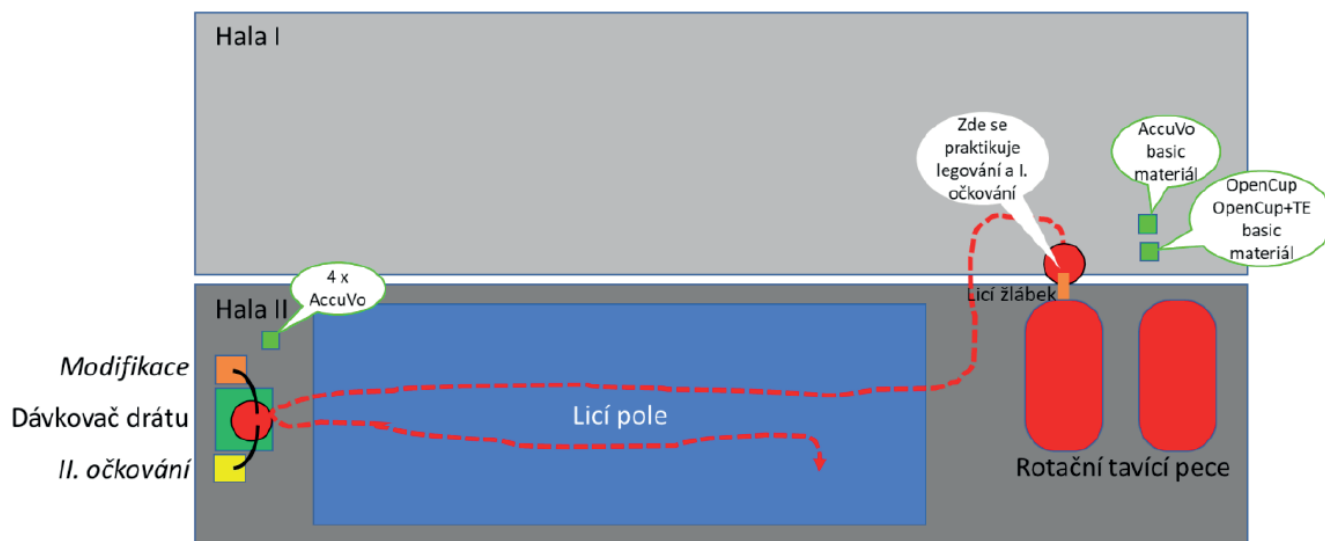
Grafitizační očkování při výrobě odlitků z litiny s lupínkovým a kuličkovým grafitem



Obr. 9 Metalurgická stanice Progelta a řezy plněného očkovacího a modifikačního profilu; a) modifikátor Progelta LSK 13412BS; b) očkovadlo Progelta WIN 13A [5]



Obr. 10. Zapojení aparatury při měření v MR [6]



Obr. 11. Schematické uspořádaní pracoviště se stanovišti termické analýzy při měření kvality tekutého kovu v MR

Očkování plněným profilem u odlitků z LKG

Očkování plněným profilem se v MR provádí na metalurgické stanici Progelta, která disponuje dvoužilovým podavačem plněných profilů. Očkování za pomoci plněného profilu se v MR provádí pouze při výrobě litiny s kuličkovým grafitem, buď jako primární případně jako sekundární očkování. Na jedno očkování či modifikaci lze na stanici zpracovat 2,5–2,7 t taveniny. Metalurgická stanice Progelta je pak zachycena na **obr. 9**.

Vyhodnocení kvality očkování za pomoci plněného profilu a očkováním do proudu kovu je uvedeno v následující kapitole.

Průběh měření kvality kovu termickou analýzou (TA)

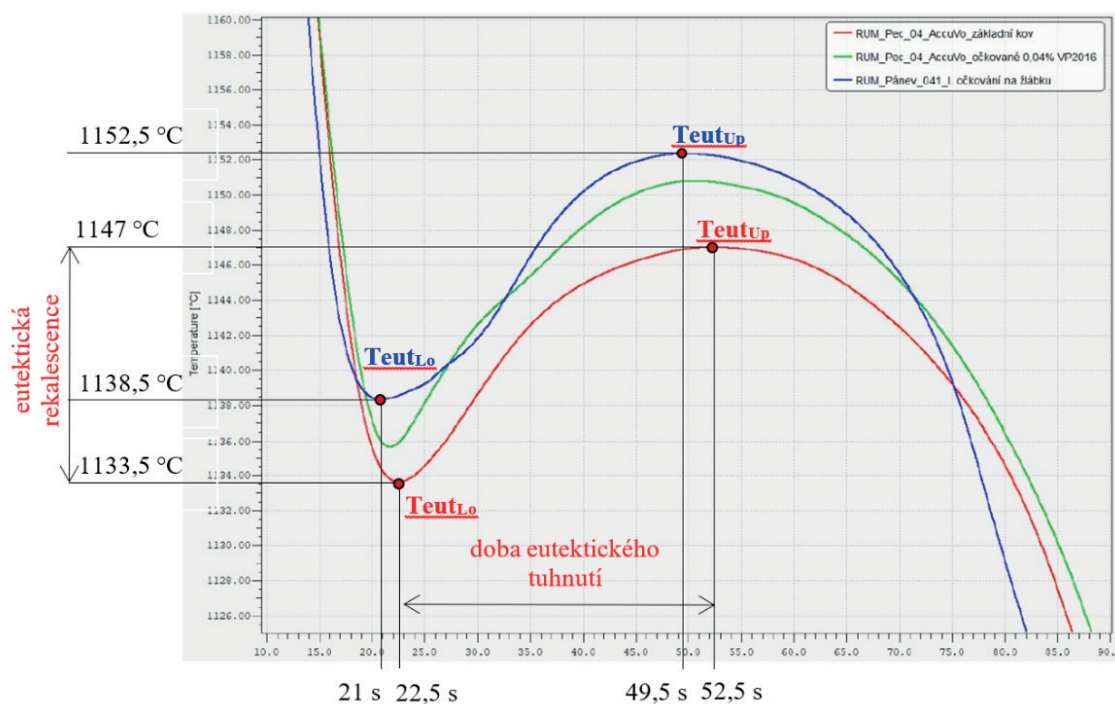
Pro hodnocení metalurgické kvality tekutého kovu při výrobě LKG bylo ve spolupráci s firmami Technical Service Kuehn GmbH a DETYCON Solutions s.r.o. uskutečněno měření kvality tekutého kovu termickou analýzou AccuVo s následným vyhodnocením pomocí softwaru Apromace. Účelem tohoto měření bylo zjistit, zda používané očkovač a modifikátor má při výrobě LKG odpovídající normě EN GJS 600-3 požadovaný účinek, nebo zda by nebylo vhodné použít jiný typ modifikátoru a očkovače, nebo zda by nebyla vhodná úprava jejich dávkování.

Samotné měření kvality taveniny pomocí TA probíhalo na dvou stanovištích. Schéma průběhu měření je zachyceno na **obr. 10**.

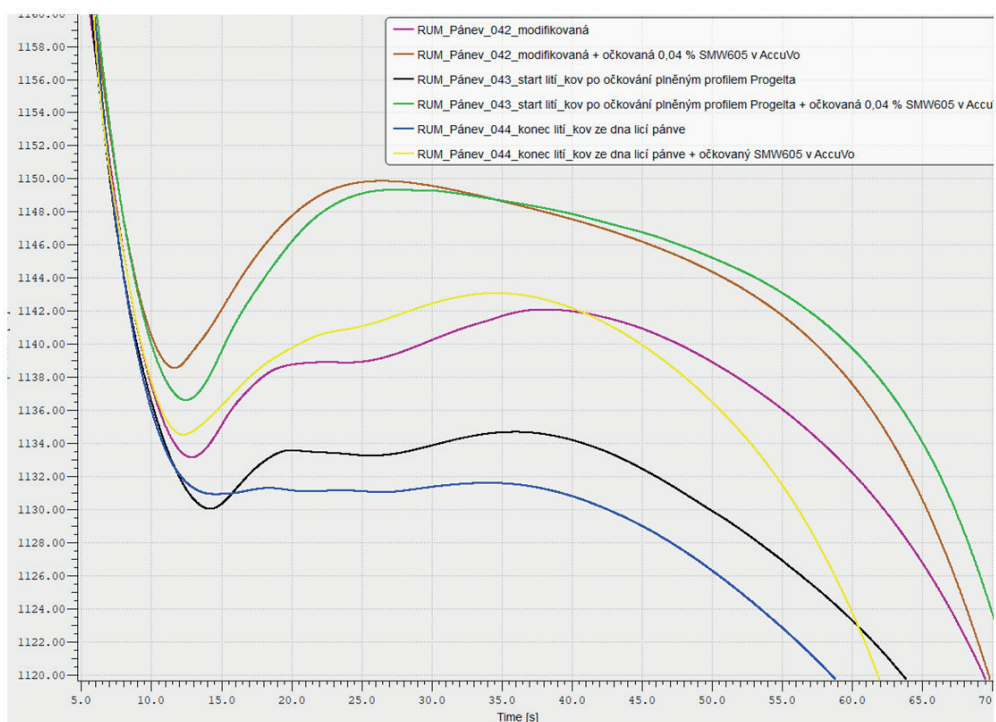
První stanoviště se nacházelo v blízkosti rotační pece a druhé stanoviště bylo zřízeno u stanice Progelta pro dávkování plněných profilů. Na **obr. 11** je schéma uspořádání jednotlivých stanovišť v rámci celé výrobní haly v MR.

Na **obr. 11** je ukázán průběh přípravy LKG a jsou zde vyznačeny i obě stanoviště, kde probíhal odběr vzorků pro termickou analýzu. Termická analýza zaznamenává a interpretuje změny teploty v čase při ochlazování nebo ohřívání materiálu. Ve slévárenství se používá pro interpretaci křivky chladnutí kov, který je analyzován při tuhnutí ve speciálním kelímku. Fázové přeměny, ke kterým dochází v průběhu tuhnutí a chladnutí kovu, se projevují na křivce jako anomálie. Při měření podchlazení na křivce chladnutí u její eutektické části je pak možné odhadnout, zda je tavenina správně naočkovaná pro výrobu konkrétního odlitku. Křivku lze tedy použít na hodnocení úrovně modifikace a očkování taveniny. Při vyhodnocování jednotlivých křivek bylo zjištěno, že plněný profil pro sekundární sériové očkování nefunguje správně. Dalším důležitým zjištěním pak bylo, že samotné eutektické složení vsázky nemusí zajistit eutektické tuhnutí bez toho, aniž by kov tuhl vícestupňově eutektic-

Grafitizační očkování při výrobě odlitků z litiny s lupinkovým a kuličkovým grafitem



Obr. 12 Ovlivnění eutektického tuhnutí množstvím očkovadla VP216 u pánve č. 4: Označení: základní kov před primárním očkováním (červená křivka), primární očkování na žlábků 0,2 % VP216 (modrá křivka), kov očkováný v AccuVo 0,04 % VP216 (zelená křivka)



Obr. 13. Porovnání očkování – porovnání očkování 0,04 % SMW 605 přímo po modifikaci a po očkování plněným profilem Progetla

Označení: modifikovaný kov (fialová křivka), modifikace + následné očkování pomocí 0,04 % SMW 605 (hnědá křivka), modifikace + očkování plněným profilem Progetla – standardní postup, vzorek před začátkem odlévání (černá křivka) a vzorek na konci odlévání (modrá křivka), modifikace + očkování plněným profilem Progetla + další očkování v AccuVo 0,04 % SMW 605 (zelená křivka), modifikace + očkování plněným profilem Progetla, vzorek odebraný na konci lití + další očkování v AccuVo 0,04 % SMW 605 (žlutá křivka)

ky či směřoval do podeutektického nebo nadeutektického tuhnutí. Při měření bylo celkem z 5 pánví pořízeno 65 křivek tuhnutí. Na vybraných křivkách jsou pak prezentovány výsledky měření.

Při tomto měření se k tavení kovu používala pouze 12t rotační bubnová pec. Na prvním stanovišti byly umístěny 2 stativy. Na prvním stativu byl umístěn jeden dvoukomorový kelímek AccuVo a na druhém stativu byly umístěny dva zkušební kelímky Open Cup, jeden s telurovým nátěrem a druhý bez nátěru. Otevřené kelímky s Te se používají na analýzu taveniny eutektického chemického složení. Kelímek bez Te, ve kterém vzorek tuhne stabilně podle rovnovážného diagramu Fe-C, se používá na podeutekticky tuhnoucí taveninu (*nadeutekticky tuhnoucí tavenina se prakticky téměř nepoužívá*). Stativ může být kombinovaný a může nést jeden až dva Open Cup kelímky a jeden AccuVo kelímek současně, nebo 2 AccuVo.

Ovlivnění eutektického tuhnutí množstvím očkovačla

Na **obr. 12** jsou zobrazeny křivky tuhnutí z pánve číslo 4. Červená křivka zde zobrazuje kov před primárním očkováním. Modrá křivka prezentuje standardně primárně očkovaný kov a zelená křivka zobrazuje očkování také standardním očkovačlem, ale za použití 5násobně menšího množství než při klasickém sériovém očkování. Průběh modré a zelené křivky je téměř totožný, z toho vyplývá, že 5násobné očkování na žlábkku, které se v Metalurgii Rumburk provádí standardně, nemá příliš velký efekt. Ani mezi průběhy červené a modré křivky nejsou velké rozdíly.

Rozdíl mezi eutektickou rekalescencí u neočkovaného a primárně očkovaného kovu je pouhých 0,5 °C. Podobně malý rozdíl (1,5 s) je však i u doby eutektického tuhnutí. Díky tomuto záznamu je patrné, že rozdíl eutektického tuhnutí mezi primárně očkovaným a neočkovaným kovem je minimální. Křivky tuhnutí mají velmi podobný průběh, z čehož vyplývá, že primární očkování na žlábkku je zbytečné.

Porovnání očkovačho účinku

Na **obr. 13**, který opět zobrazuje křivky tuhnutí z pánve číslo 4, je ukázáno nesprávné fungování sekundárního

očkovačla. Fialová křivka zde představuje stav taveniny po modifikaci plněným profilem a černá křivka představuje stav taveniny po očkování plněným profilem. Očkování, které probíhá po modifikaci, by mělo zvednout eutektickou teplotu, to znamená, že černá křivka na obrázku by se měla dostat nad fialovou křivku, ale ve skutečnosti tomu bylo právě naopak a černá křivka je nižší než fialová, což není správné. Při měření byly rovněž testovány i alternativní sekundární očkovačla, jejichž vliv na stav taveniny prezentuje zelená a hnědá křivka. Jak je patrné, tak zde je vše v pořádku, neboť došlo ke zvýšení eutektické teploty a obě tyto křivky se nachází nad fialovou křivkou. Poslední dva záznamy na tomto obrázku představuje modrá křivka, která zobrazuje stav taveniny po 4 minutách lití – vzorek byl odebraný ze dna licí pánve a v porovnání s černou křivkou lze vidět další degeneraci očkovačho účinku v čase. Žlutá křivka prezentuje stav taveniny také na konci lití – vzorek byl opět odebrán ze dna licí pánve a následně byl očkovan jedním z alternativních očkovačel (*kov tedy absolvoval primární očkování na žlábkku, modifikaci, sekundární očkování plněným profilem, určitou časovou výdrž v licí pánvi a poslední třetí očkování*). Jak je vidět i na toto očkování kov stále reaguje, neboť dojde k nárůstu eutektické teploty oproti stavu na konci lití – to je patrné z porovnání žluté a modré křivky. Tímto experimentem bylo tedy prokázáno, že sekundární očkování, které se v Metalurgii Rumburk používá standardně, nefunguje správně.

Závěr

V rámci uvedených zkoušek byl ověřen účinek čtyř způsobů očkování litin, očkování do licí jamky, do licí pánve u LLG, do proudu kovu a pomocí plněného profilu u LKG. První dva jmenované způsoby očkování dosáhly téměř stejných výsledků. U obou těchto způsobů byly porovnávány dosažené hodnoty meze pevnosti, a to jak u základního neočkovaného kovu, tak u očkované taveniny. Dále byly porovnávány metalografické výbrusy, a to opět u očkovaných a neočkovaných variant. Výsledkem těchto porovnání je, že jak u očkování do licí jamky, tak u očkování do licí pánve, nebyl pozorován žádný rozdíl u meze pevnosti v tahu R_m , a také na metalografických výbrusech. Dle normy ČSN EN ISO 945-1 je definováno 8 tříd velikostí grafitu a oba

tyto způsoby očkování dosáhly velikosti grafitu 25 % v 6. třídě a 50 % v 7. třídě, což je dohromady 75 % grafitu v posledních 3 „nejjemnějších“ velikostech. Těchto hodnot ovšem v obou případech dosahovala tavenina již před samotným očkováním a to znamená, že již na počátku byla tavenina ve velice dobré kvalitě. Grafit byl rozložen rovnoměrně a nikde na výbrusech se neobjevila místa, kde by byl grafit v menší koncentraci. Ani u jedné metody očkování se na odlitcích neobjevila zákal, proto lze konstatovat, že obě očkovadla fungovala, i když ani jedno nemělo vliv na mechanické vlastnosti a na velikost grafitu. Samozřejmě je nutné uvažovat, že velikost vzorku přilité tyče \varnothing 30 mm a pomalejší tuhnutí a chladnutí mohlo tyto vlastnosti ovlivnit. Před zavedením snížení obsahu surového železa ve vsázce musí ovšem proběhnout ještě další zkoušky (za použití jiného dávkování očkovadel či použití alternativních očkovadel), aby bylo ověřeno, že litina dosahuje požadované pevnosti v tahu Rm.

Další dva způsoby očkování – očkování do proudu kovu a plněným profilem u LKG – byly ověřovány pomocí termické analýzy AccuVo. Na základě této analýzy bylo zjištěno, že by při přípravě LKG mělo dojít jak k procesním, tak materiálovým změnám. Procesní změny se týkají primárního očkování do proudu kovu při odpichu z pece, které nemělo žádný efekt, a lze ho proto úplně vynechat. Materiálové změny by se týkaly především očkování pomocí plněného profilu, kde měření za pomocí termické analýzy AccuVo prokázalo, že tento způsob

očkování nefunguje správně. Před provozní změnou je ovšem nutné provést opakovaná měření a ověřit tak, že výsledky měření, které proběhlo při zkouškách, jsou reprodukovatelné. Hledání ideálního očkovadla, ostatní analýzy a provozní zkoušky pak budou dále řešeny.

Recenzent:

doc. Ing. Antonín Mores, CSc.

Literatura

- [1] GEDEONOVÁ, Z.; JELČ, I.: *Metalurgia liatin*. Vydání HT TU Košice 2000. ISBN 80-7099-516-5.
- [2] SÝKORA, P.: *Metalurgie litin II*. Svaz sléváren Brno, 2007. ISBN 80-87088-14-2.
- [3] ROUČKA, J.: *Metalurgia liatin*. VUT Brno 1998. ISBN 80-214-1263-1.
- [4] HAMPL, J.: *Metalurgie slévárenských litin*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3357-6.
- [5] BREDL, J.: *Optimalizace technologie výroby odlitku z LKG*. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, Katedra strojírenské technologie. 2020. 25
- [6] ANJOS, V.: *Use of Thermal Analysis to Control the Solidification Morphology of Nodular Cast Irons and Reduce Feeding Needs*. Dizertační práce. Universität Duisburg-Essen, Abteilung Maschinenbau und Verfahrenstechnik. 2015. 197.

Pozvánka na 31. ekologický seminář

25. 5. 2023 | Hradec Králové

Sledujte  Česká slévárenská společnost