

**WPŁYW MODYFIKACJI BEZPOŚREDNIEJ W FORMIE
ODLEWNICZEJ NA STRUKTURĘ STOPÓW ŻELAZA****EFFECT OF DIRECT IN-MOULD INOCULATION
ON THE STRUCTURE OF IRON ALLOYS**

Jerzy Tybulczuk, Krzysztof Jaśkowiec, Andrzej Gwiżdż

Instytut Odlewnictwa, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków

Streszczenie

W trakcie realizowanego projektu przeprowadzono serie badań nad wpływem rozdrobnionego modyfikatora naniesionego na powierzchnię formy na zmiany struktury powierzchni odlewów z żeliwa sferoidalnego i staliwa stopowego. Podczas prac przygotowawczych zdecydowano się na użycie dla żeliwa taniego i dostępnego modyfikatora FeSi75T, natomiast dla staliwa austenitycznego typu SUS316 (LH17N17M3) użyto specjalnie wytopiony i przygotowany modyfikator FeNbC. Sam proces modyfikacji polegał na rozpuszczeniu naniesionej warstwy modyfikatora, co wymagało doboru odpowiedniej granulacji oraz ilości modyfikatora umożliwiającej zajście procesu modyfikacji i wystąpienie oczekiwanych efektów, tj. głównie rozdrobnienia i zwiększenia ilości wydzielań grafitu w żeliwie oraz rozdrobnienia ziarna w przypadku staliwa.

Słowa kluczowe: modyfikacja, metody modyfikacji, odlewy cienkościenne, żeliwo sferoidalne, staliwo stopowe

Abstract

In the course of the executed project, a series of investigations has been made to establish what effect a refined inoculant applied on the mould surface can have on changes in the surface structure of castings made from ductile iron and alloyed cast steel. During preliminary research it was decided to use a cheap and readily available FeSi75T inoculant for cast iron, while for the austenitic SUS316 (LH17N17M3) cast steel, a FeNbC inoculant after special melting and treatment was selected. The inoculation process consisted in dissolving the applied layer of inoculant, thus requiring the choice of a best amount of the inoculant of proper granulation to induce the inoculation process along with all the expected effects, i.e. raising the number of graphite precipitates in cast iron combined with their refinement, and grain refinement in cast steel

Keywords: inoculation, methods of inoculation, thin-wall castings, ductile iron, alloyed cast steel

Wstęp

Ogólnie znane są trudności uzyskania właściwej struktury, zwłaszcza w cienkościennych odlewach z żeliwa sferoidalnego w aspekcie unikania zabieli (wydzieliń cementytu). Przeprowadzony projekt miał na celu doprowadzić do poprawy kulkowej formy grafitu, znaczącego jego rozdrobnienia oraz odpowiednio dużej ilości wydzieliń drobnych i równomiernych, zwłaszcza w cienkich ściankach odlewów w badanych materiałach.

Stosowane metody modyfikacji stopów metali polegają na wprowadzeniu modyfikatora w postaci 2–5 mm kawałków do kadzi lub na rynnę spustową. Ciekły stop w kontakcie z modyfikatorem reaguje, zmieniając krystalizację, a zatem strukturę i właściwości zakrzepłego stopu [1, 2]. W przypadku żeliwa, modyfikacja daje dobre wyniki, gdy ilość modyfikatora wynosi 0,5–0,8% wag. w stosunku do wielkości wsadu metalowego. Przy odlewaniu stopów z małych kadzi, odważoną ilość modyfikatora, w ilości 0,5–0,8% wag., w postaci granulek o wymiarach 3–5 mm, wsypuje się na dno kadzi i następnie zalewa się ciekłym metalem [3]. Innym znanym sposobem modyfikowania w kadzi jest wprowadzenie do ciekłego metalu, w strumieniu gazu nośnego, modyfikatora w postaci ziaren, o wymiarach 0,2–0,5 mm w ilości 0,2% wag.

Modyfikację przeprowadza się także w dużym zbiorniku wlewowym formy odlewniczej, wprowadzając modyfikator w ilości 0,3% wag., w postaci kawałków o wymiarach 0,5–1,0 cm, na strugę stopu podczas wlewania go do zbiornika wlewowego.

Inny znany sposób modyfikowania w formie polega na umieszczeniu modyfikatora w ilości 0,5% wag. w postaci kawałkowej, pod wlewem głównym w specjalnej komorze reakcyjnej [4]. Oczywiście istnieją inne metody modyfikacji jednakże mniej rozpowszechnione [5–10]. Proponowana przez autorów metoda dzięki swej prostocie, możliwości znacznej oszczędności modyfikatora oraz skuteczności jego działania może okazać się ciekawą alternatywą dla metod przedstawionych powyżej.

Zaplanowany zakres prób i badań

W celu uzyskania różnych zależności między parametrami technicznymi, w tym grubością ścianek odlewu (szybkością krzepnięcia i stygnięcia), wielkością ziarna modyfikatora, ilością wprowadzanego modyfikatora, a także składem chemicznym stopu, ustalono zakres prób i badań pozwalających w ogólnym zarysie określić powyższe zależności, przy ograniczeniu ze względu na koszty, różnorodności stosowanych modyfikatorów i ilości prób.

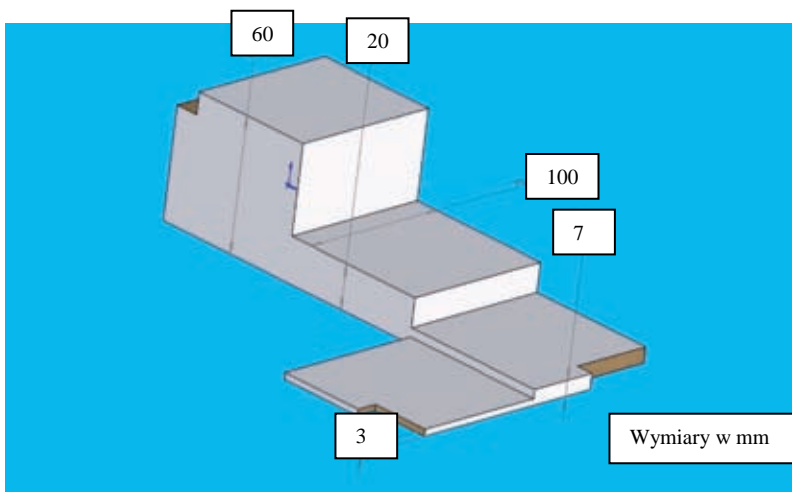
W związku z tym w prowadzonych próbach:

- Uwzględniono potrzebę doboru stosunkowo taniego i dostępnego modyfikatora. Założono, że będzie to FeSi75T - dla żeliwa (powszechnie stosowany modyfikator, zwłaszcza dla żeliwa sferoidalnego) oraz specjalnie wytopiony modyfikator FeNbC dla staliwa austenitycznego.
- Założono konieczność łatwego rozprowadzania modyfikatora w ściankach odlewu, dobierając odpowiednią granulację.
- Ze względu na wpływ szybkości krzepnięcia i stygnięcia na efekt modyfikacji i strukturę przyjęto do badań próbkę schodkową o wymiarach jak na rysunku 1.
- Do oceny właściwości wytrzymałościowych przyjęto standardowy klin o grubości ścianek 22 mm.

- e. Do oceny przebiegu krzepnięcia na podstawie krzywych stygnięcia próbek (modyfikowanych w formie i niemodyfikowanych), przyjęto próbki CES do rejestrowania krzywych stygnięcia. Biorąc pod uwagę potrzebę prostego zabiegu modyfikacji - szczególnie w cienkich elementach próbki - modyfikator wprowadzono, nanosząc go na powierzchnię próbki poprzez przesianie ze zbiornika zakończonego sitem o odpowiednim wymiarze oczek.
- f. Wytypowano do prób dwa rodzaje żeliwa sferoidalnego (perlityczne i ferrytyczne) oraz żeliwo sferoidalne typu Ni-resist, a w ostatnim wytopie zastosowano staliwo austenityczne. W żelwie sferoidalnym w gatunkach typu Ni-resist często trudno jest uzyskać wymagane wg normy wydłużenie (wybrano do badań gatunek ZsNi20Cr3 wg normy PN-88/H-83144 o żądanym składzie chemicznym (% wag.): C - max. 3,0%, Si - 1,5–3,0%, Mn - 0,5–1,5%, Ni - 18–22%, Cr - 2,5–3,5%, wytrzymałości na rozciąganie R_m - min. 390 MPa, A_5 - min. 7%) ze względu na występowanie w strukturze nierównomiernych skupień węglików. Natomiast w wybranym do prób staliwie SUS316 (wg normy japońskiej) o składzie C - 0,08%, Si - 1,0%, Mn - 2,0%, P - 0,045%, S - 0,030%, Ni - 18%, Cr - 12,0%, Mo - 2,5% wg badań japońskich [8] można uzyskać znaczące rozdrobnienie ziarna przy użyciu stosunkowo dużej ilości (ok. 3,0%) drogiego modyfikatora FeNbC (Fe ~50%, Nb ~35%, C ~15%).
- g. Próbkę wykonywano w masie formierskiej bentonitowej na wilgotno.

Do każdego wytopu zaformowano po dwie sztuki form (jedną z modyfikacją w formie, drugą bez modyfikacji w formie):

- klinów wytrzymałościowych,
- próbek schodkowych,
- próbek CES.



Rys. 1. Próbkę schodkowa

Fig. 1. Stepped test casting

Proponowany w pracy badawczej sposób modyfikacji stopów metali w formie odlewniczej polega na tym, że stop metalu wlewa się do formy odlewniczej, której całą lub część powierzchni i/lub rdzenia odtwarzających kształt odlewu pokrywa się uprzednio warstwą rozdrobnionego modyfikatora, w ilości 0,05–0,08% w stosunku do masy odlewu próbki.

Modyfikacja powinna zachodzić podczas krzepnięcia stopu na powierzchni kontaktu forma-krzepnący fragment odlewu. Rozdrobniony modyfikator, dzięki odpowiednio drobnej wielkości ziarna, łatwo ulega rozpuszczeniu w ciekłym stopie, co potęguje skuteczność procesu modyfikacji i nie zachodzi obawa zaniku efektu modyfikacji. W proponowanym sposobie stosuje się mniej modyfikatora niż w znanych metodach. Dzięki jego rozdrobnieniu, możliwe jest dokładne pokrycie modyfikatorem każdego fragmentu powierzchni formy i rdzenia. Proces modyfikacji zachodzi dokładnie na całej wyznaczonej powierzchni odlewu, powodując eliminację zabieleń w ściankach odlewów żeliwnych o małej grubości, nawet o grubości 2–3 mm [5, 7]. W przypadku żeliwa stopowego można otrzymać rozdrobnienie i równomierny rozkład węglików, co daje w efekcie wzrost właściwości wytrzymałościowych i plastycznych. Dodatkową zaletą proponowanego sposobu modyfikacji jest możliwość częściowego pokrywania powierzchni wnętrza formy lub rdzenia, co dodatkowo wpływa na mniejsze zużycia modyfikatora.

Wykonanie prób i badań

Wytopy wykonano w piecu średniej częstotliwości o pojemności tygla 50 kg, sferoidyzację przeprowadzono metodą przelewania do kadzi z zaprawą umieszczoną na dnie oraz modyfikacją w kadzi za pomocą FeSi75T w ilości 1% wag. Każdorazowo mierzono temperaturę w piecu przed spustem, która mieściła się w przypadku żeliwa w zakresie 1420–1460°C, a w przypadku staliwa wynosiła 1520°C. Z każdego wytopu wykonano po dwa kliny YII, dwie sztuki próbek schodkowych, dwie sztuki próbek CES (wszystkie odlewy próbne wykonano w wersji bez modyfikacji w formie i zabiegiem modyfikacji w formie - domodyfikowaniem).

Dla każdego z wytopów przeprowadzono badania mikrostruktury oraz określono właściwości wytrzymałościowe.

Wyniki badań

Żeliwo sferoidalne – perlityczne

Tabela 1. Skład chemiczny żeliwa sferoidalnego - perlitycznego, % wag.

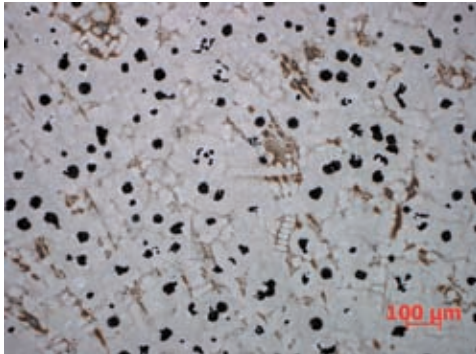
Table 1. Chemical composition of pearlitic ductile iron, wt. %

C	Si	Mn	P	S	Mg	Cu
3,85	2,43	0,40	0,05	0,010	0,095	0,82

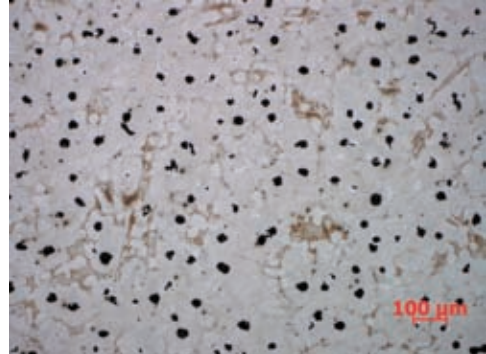
Właściwości wytrzymałościowe (próbki wykonane z klina YII):

R_m – 764 MPa, A_5 – 7,8% (bez modyfikacji w formie),

R_m – 752 MPa, A_5 – 8,0% (z modyfikacją w formie).



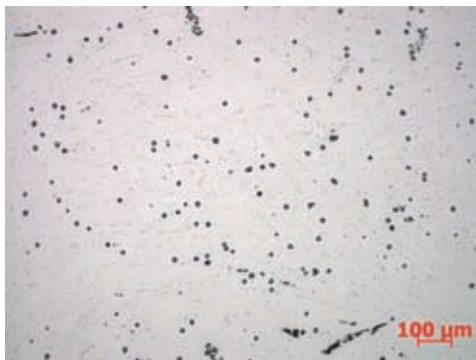
Próbka 1, traw., pow. 100x



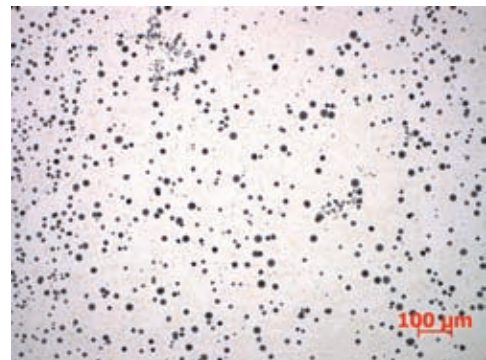
Próbka 1M, traw., pow. 100x

Rys. 2. Struktura żeliwa sferoidalnego perlitycznego bez modyfikacji w formie (próbka oznaczona 1) oraz po modyfikacji w formie (próbka oznaczona 1M). Próbki pobrane z klina YII

Fig. 2. Pearlitic ductile iron structure before (test piece 1) and after (test piece 1M) the in-mould inoculation. Specimens taken from the YII keel block



Próbka 1/3, nietraw., pow. 100x



Próbka 1M/3, nietraw., pow. 100x

Rys. 3. Struktura żeliwa sferoidalnego perlitycznego bez modyfikacji w formie (próbka oznaczona 1/3) oraz po modyfikacji w formie (próbka oznaczona 1M/3). Próbki pobrane ze ścianki o grubości 3 mm

Fig. 3. Pearlitic ductile iron structure before (test piece 1/3) and after (test piece M/3) the in-mould inoculation. Specimens taken from the stepped test casting wall 3 mm thick

Żeliwo sferoidalne – ferrytyczne

Tabela 2. Skład chemiczny żeliwa sferoidalnego - ferrytycznego, % wag.

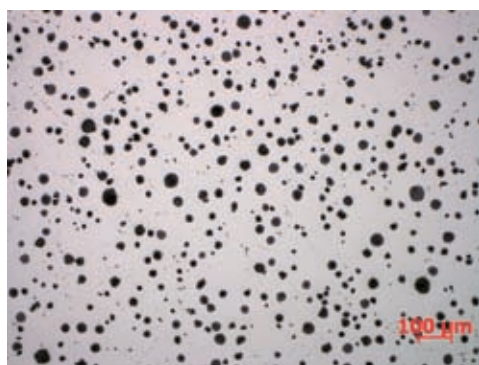
Table 2. Chemical composition of ferritic ductile iron, wt. %

C	Si	Mn	P	S	Mg	Cu	Ni
3,55	2,4	0,11	0,05	0,01	0,06	0,63	0,11

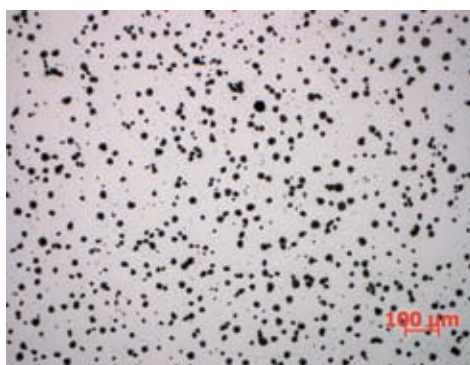
Właściwości wytrzymałościowe (próbki wykonane z klina YII):

R_m – 470 MPa, A_5 – 15,4% (bez modyfikacji w formie),

R_m – 468 MPa, A_5 – 17,8% (z modyfikacją w formie).



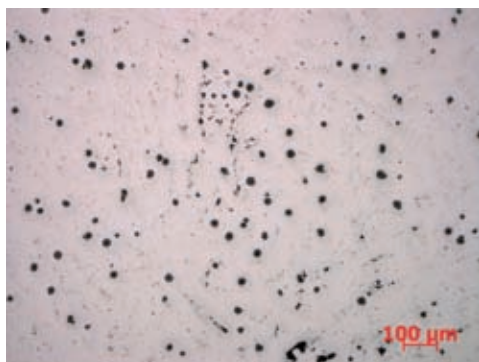
Próbka 2, traw., pow. 100x



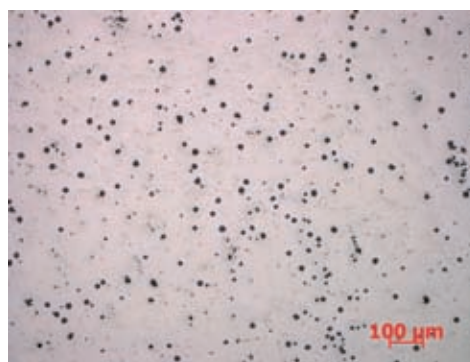
Próbka 2M, traw., pow. 100x

Rys. 4. Struktura żeliwa sferoidalnego ferrytycznego bez modyfikacji w formie (próbka oznaczona 2) oraz po modyfikacji w formie (próbka oznaczona 2M). Próbki pobrane z klina YII

Fig. 4. Ferritic ductile iron structure before (test piece 2) and after (test piece 2M) the in-mould inoculation. Specimens taken from the YII keel block



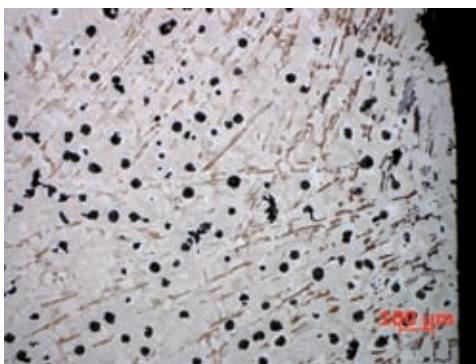
Próbka 2/3, traw., pow. 100x



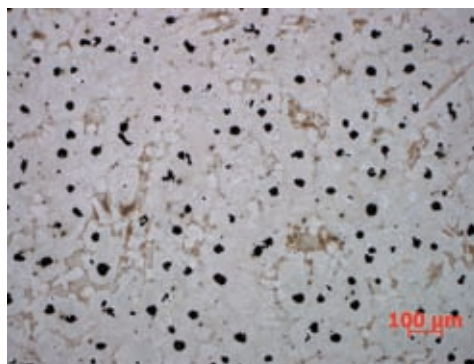
Próbka 2M/3, traw., pow. 100x

Rys. 5. Struktura żeliwa sferoidalnego ferrytycznego bez modyfikacji w formie (próbka oznaczona 2/3) oraz po modyfikacji w formie (próbka oznaczona 2M/3). Próbki pobrane ze ścianki próby schodkowej o grubości 3 mm

Fig. 5. Ferritic ductile iron structure before (test piece 2/3) and after (test piece 2M/3) the in-mould inoculation. Specimens taken from the stepped test casting wall 3 mm thick



Próbka 2/60, traw., pow. 100x



Próbka 2M/60, traw., pow. 100x

Rys. 6. Struktura żeliwa sferoidalnego ferrytycznego bez modyfikacji w formie (próbka oznaczona 2/60) oraz po modyfikacji w formie (próbka oznaczona symbolem 2M/60). Próbkę pobrane z ścianki próby schodkowej o grubości 60 mm

Fig. 6. Ferritic ductile iron structure before (test piece 2/60) and after (test piece 2M/60) the in-mould inoculation. Specimens taken from the stepped test casting wall 60 mm thick

Żeliwo sferoidalne Ni-resist

Tabela 3. Skład chemiczny żeliwa sferoidalnego Ni-resist, % wag.

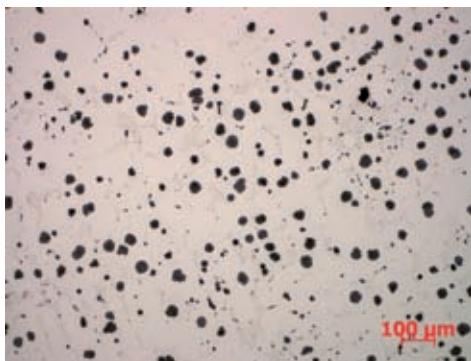
Tabel 3. Chemical composition of Ni-resist ductile iron, wt. %

C	Si	Mn	P	S	Mg	Cr	Ni
2,65	2,1	1,12	0,035	0,02	0,12	2,5	19,4

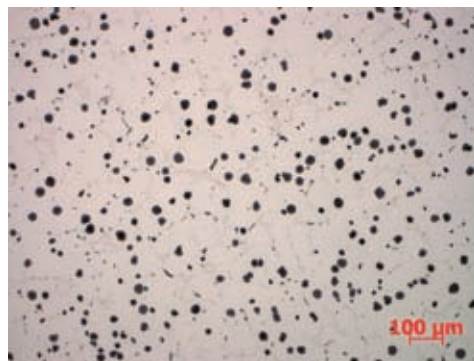
Właściwości wytrzymałościowe (próbki wykonane z klina YII):

R_m – 420 MPa, A_5 – 7,0% (bez modyfikacji w formie),

R_m – 446 MPa, A_5 – 11,2% (z modyfikacją w formie).



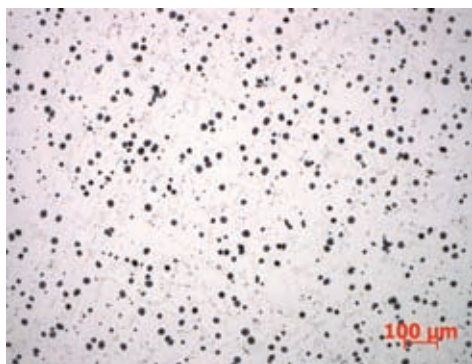
Próbka 3, traw., pow. 100x



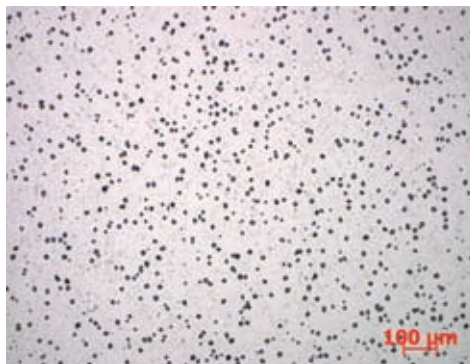
Próbka 3M, traw., pow. 100x

Rys. 7. Struktura żeliwa sferoidalnego Niresist bez modyfikacji w formie (próbka oznaczona 3) oraz po modyfikacji w formie (próbka oznaczona 3M). Próbkę pobrane z klina YII

Fig. 7. Ductile Niresist iron structure before (test piece 3) and after (test piece 3M) the in-mould inoculation. Specimens taken from the YII keel block



Próbka 3/3, nietraw., pow. 100x



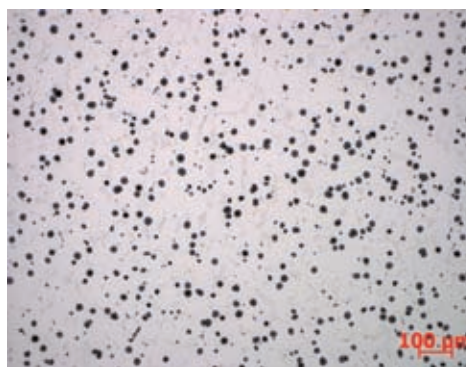
Próbka 3M/3, nietraw., pow. 100x

Rys. 8. Struktura żeliwa Niresist bez modyfikacji w formie (próbka oznaczona 3/3) oraz po modyfikacji w formie (próbka oznaczona 3M/3). Próbki pobrane ze ścianki próby schodkowej o grubości 3 mm

Fig. 8. Ductile Niresist iron structure before (test piece 3/3) and after (test piece 3M/3) the in-mould inoculation. Specimens taken from the stepped test casting wall 3 mm thick



Próbka 3/60, nietraw., pow. 100x



Próbka 3M/60, nietraw., pow. 100x

Rys. 9. Struktura żeliwa Niresist bez modyfikacji w formie (próbka oznaczona 3/60) oraz po modyfikacji w formie (próbka oznaczona 3M/60). Próbki pobrane ze ścianki próby schodkowej o grubości 60 mm

Fig. 9. Ductile Niresist iron structure before (test piece 3/60) and after (test piece 3M/60) the in-mould inoculation. Specimens taken from the stepped test casting wall 60 mm thick

Staliwo niklowo-chromowe

Tabela 4. Skład chemiczny staliwa niklowo - chromowego, % wag.

Table 4. Chemical composition of nickel-chromium cast steel, wt.%

C	Si	Mn	P	S	Mo	Cr	Ni
0,11	1,05	2,1	0,15	0,15	2,65	11,8	17

Właściwości wytrzymałościowe (próbki wykonane z klina YII):

R_m – 490 MPa, A_5 – 40,0% (bez modyfikacji w formie),

R_m – 518 MPa, A_5 – 44,5% (z modyfikacją w formie).



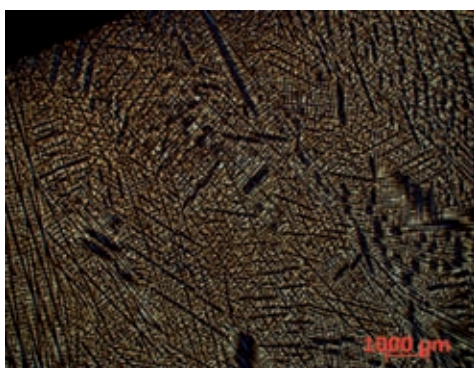
Próbka 4, traw., pow. 100x



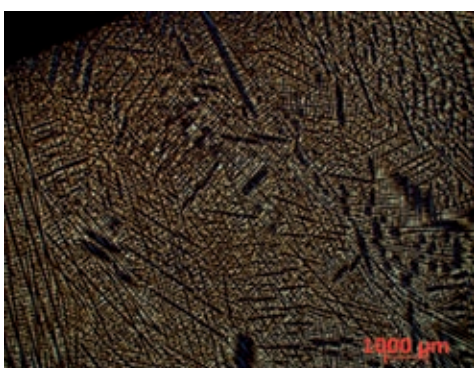
Próbka 4M, traw., pow. 100x

Rys. 10. Mikrostruktura staliwa bez modyfikacji w formie (próbka oznaczona 4) oraz po modyfikacji w formie (próbka oznaczona 4M). Próbki pobrane z klina YII

Fig. 10. Cast steel microstructure before (test piece 4) and after (test piece 4M) the in-mould inoculation. Specimens taken from the YII keel block



Próbka 4/60, traw., pow. 100x



Próbka 4M/60, traw., pow. 100x

Rys. 11. Mikrostruktura staliwa bez modyfikacji w formie (próbka oznaczona 4/60) oraz po modyfikacji w formie (próbka oznaczona 4M/60). Próbki pobrane z ścianki próby schodkowej o grubości 60 mm

Fig. 11. Cast steel microstructure before (test piece 4/60) and after (test piece 4M/60) the in-mould inoculation. Specimens taken from the stepped test casting wall 60 mm thick

Wnioski

Przedstawione wyniki wstępnych badań świadczą o bardzo pozytywnym wpływie modyfikacji, prowadzonej w formie odlewniczej, na rozdrobnienie struktury, wzrost ilości wydzielań sferoidalnych - zwłaszcza w cienkich ściankach odlewu - oraz poprawę właściwości mechanicznych odlewów.

Analizując mikrostrukturę badanych materiałów, można stwierdzić, że:

- występuje wyraźna różnica w ilości i wielkości wydzielań grafitu w przypadku żeliwa oraz rozdrobnienie struktury w przypadku staliwa,
- porównanie struktur żeliwa w najcieńszych ściankach próbki schodkowej (grubość 3 mm) oraz w grubszych (60 mm) pozwala stwierdzić widoczny wpływ zastosowanej modyfikacji w formie - zmniejszenie wydzielań grafitu.

Podziękowania

Publikację sporządzono na podstawie wyników realizacji pracy statutowej pt. „Badanie zjawisk fizykochemicznych w procesie wytapiania oraz odlewania stopów na bazie niklu i żelaza, zachodzących w wyniku wprowadzania mikrododatków stopowych”, wykonanej w 2009 r. (zlec. 8006/00).

Literatura

1. Nakae H.: Influence of inoculation on solidification in cast iron, *International Journal of Cast Metals Research*, 2008, Vol. 21, no.4, pp. 7–10
2. Skaland T.: A New Approach to Ductile Iron Inoculation, Elkem ASA, Research Kristiansand, Norway, 2008, pp. 4–11
3. Labrecque C., Gane M.: Development of Carbide-Free Thin-Wall Ductile Iron Casting, *AFS Transactions*, Rio Tinto Iron and Titanium, Kanada, 2000, Vol. 108
4. Javaid A., Thomason J.: Effect of Microstructure on the Mechanical Properties of Thin-Wall Ductile Iron Castings, *AFS Transactions*, MTL / CANMET, Kanada, 1989
5. Laukhin N., Lerner Y.S.: Pre-Inoculation Effect of SiC of in Thin-Wall Ductile Iron Production, *AFS Transactions* 01–064, 2001
6. Stefanescu D.M., Dix L.P., Ruxanda R.E.: Tensile Properties of Thin Wall Ductile Iron, *AFS Transactions* 02-178, 2002, Vol. 110
7. Loper C.R., Winardi L., Lekakh S.: Experiments in Pretreatment of Ductile Irons, *Material Science and Engineering*, *AFS Transactions* 02-023, 2002, Vol. 110
8. Mizumoto M., Sasaki S., Ohgai T.: Development of new additive for grain refinement of austenitic stainless steel, *International Journal of Cast Metal Research*, 2008, Vol. 21, pp. 49–55
9. Schiffel A., Simon R.: Verbesserungen auf Allen Ebenend, *Giesserei-Erfahrungsaustausch*, 2009, pp. 20–28
10. Juarez O.M., Kendrick R.D., Loper C.R.: Postinoculated Low-CE Ductile Iron Melts Treated with Minor Additions of Ferromanganese, *AFS Transactions*, 2000, Vol. 108, pp. 39–45