

Odporność na szoki cieplne żeliwa sferoidalnego utwardzonego roztworowo z dodatkami wybranych pierwiastków stopowych

Thermal shock resistance of solution-hardened spheroidal cast iron with selected alloy elements

Mieczysław Kuder¹, Krzysztof Jaśkowiec¹

¹ Instytut Odlewnictwa, Zakład Stopów Żelaza, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków, Polska

¹ Foundry Research Institute, Department of Ferrous Alloys, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków, Poland

E-mail: mieczyslaw.kuder@iod.krakow.pl

Received: 08.02.2017. Accepted in revised form: 30.09.2017.

© 2017 Instytut Odlewnictwa. All rights reserved.

DOI: 10.7356/iod.2017.15

Streszczenie

W ramach realizacji pracy wykonano siedem wytopów żeliwa sferoidalnego, umocnionego roztworowo podwyższoną zawartością krzemu, w tym z dodatkami Cu, Mo i Ni. Wykonano analizy termiczne wytapianego żeliwa i określono parametry charakterystycznych punktów krzywych krystalizacji. Badania laboratoryjne przeprowadzono na próbkach wyciętych z wlewków próbnych oddzielnie odlewanych bez dodatkowej obróbki cieplnej. Wykonano ocenę struktury – grafitu i osnowy żeliwa, właściwości wytrzymałościowych, twardości oraz odporności na wstrząsy cieplne.

Uzyskano znacząco lepsze właściwości żeliwa z wytopów doświadczalnych w porównaniu z niestopowym żelazem wermikularnym, podstawowym tworzywem stosowanym na elementy pracujące w warunkach udarów cieplnych. Stwierdzono szczególnie korzystne działanie molibdenu oraz niklu (1,4% i 1,8%) na odporność żeliwa na wstrząsy cieplne.

Słowa kluczowe: żeliwo sferoidalne, Cu, Mo, Ni, struktura, wytrzymałość, wstrząsy cieplne

Abstract

The study involved the preparation of seven melts of spheroidal cast iron solution reinforced by means of an elevated content of silicon, including Cu, Mo and Ni additions. Thermal analyses of the melted cast iron were made and the parameters of the characteristic points on the crystallization curves were determined. The laboratory tests were performed on samples cut out of separately cast test ingots, without additional thermal treatment. An evaluation was performed of the graphite and cast iron matrix structure, as well as strength properties, hardness and thermal shock resistance.

Significantly better properties of the cast iron in the case of the experimental melts was established as compared to the non-alloy vermicular cast iron, which is the basic material used for elements working under conditions of thermal shocks. An especially advantageous operation of molybdenum and nickel (1.4% and 1.8%) on the thermal shock resistance of the cast iron was stated.

Keywords: spheroidal cast iron, Cu, Mo, Ni, structure, strength, thermal shocks

1. Wprowadzenie

Żeliwo sferoidalne to bardzo popularny rodzaj stopu żelaza mający szerokie zastosowanie w przemyśle maszynowym i samochodowym. Posiada korzystny zespół właściwości wytrzymałościowych, plastycznych

1. Introduction

Spheroidal cast iron is a very popular type of iron, being broadly applied in the engineering and automotive industry. It exhibits an advantageous set of strength, ductility and functional properties (e.g. vibration damp-

i użytkowych (np. tłumienie drgań). Wytrzymałość kształtuje się w szerokich granicach od 350 MPa do 900 MPa, a wydłużenie odpowiednio od 22% do 2% (PN-EN 1563:2012 [1]). W tradycyjnych gatunkach żeliwa sferoidalnego wzrost wytrzymałości jest uzyskiwany głównie przez dodatki pierwiastków perlitotwórczych (Mn, Cu, Sn) zwiększające udział perlitu i modyfikujące morfologię tego składnika w osnowie. Najczęściej stosowane gatunki to EN-GJS-400-15, EN-GJS-450-10, EN-GJS-500-7 i EN-GJS-600-3. Wzrastające wymagania stawiane przez konstruktorów i ostra konkurencja na rynku producentów tworzyw konstrukcyjnych doprowadziły do pojawienia się nowych, tanich gatunków żeliwa sferoidalnego, w których podwyższone właściwości wytrzymałościowe i plastyczne uzyskuje się przez zwiększenie zawartości krzemu, pierwiastka stabilizującego i utwardzającego ferryt. Są to tzw. gatunki umocnione roztworowo. We wspomnianej normie ujęto trzy gatunki takiego żeliwa: EN-GJS-450-18, EN-GJS-500-14 i EN-GJS-600-10. Dzięki podwyższonej zawartości krzemu uzyskuje się znaczące podwyższenie granicy plastyczności oraz wytrzymałości na rozciąganie przy wysokim wydłużeniu, nieco lepszą odporność na korozję oraz stabilność struktury zarówno przy pracy na podwyższonej temperaturze, jak też przy cyklicznych zmianach tego parametru. Jednym z niekorzystnych efektów podwyższonej zawartości krzemu w żelwie jest tendencja do tworzenia niekorzystnych postaci wydzielań grafitu (np. grafit „chunky”) znacząco obniżających właściwości plastyczne tworzywa. Problematyka właściwości żeliwa sferoidalnego utwardzonego roztworowo oraz istotne zagadnienia produkcji odlewów z tego materiału są dostępne w najnowszej literaturze fachowej [2–6].

Gwałtowny rozwój motoryzacji, a szczególnie tzw. *downsizing* silników spalinowych spowodował znaczny wzrost obciążeń mechanicznych i cieplnych wielu odlewanych elementów, jak np. kolektory wydechowe czy elementy turbin. Dla tych nowych warunków właściwości stosowanych dotychczas materiałów okazały się niewystarczające; odpowiedzialne elementy z nich wykonane cechowała zbyt krótka trwałość eksploatacyjna, natomiast wykonane z wysokostopowych gatunków stali czy żeliwa były zbyt drogie w produkcji. W odpowiedzi na takie zapotrzebowanie zostało opracowane sferoidalne żeliwo niskostopowe typu Si-Mo. Norma PN-EN 16124:2012 [7] ujmuje aż 9 gatunków o różnicowanej zawartości krzemu (2,3–5,2%) i molibdenu (0,4–1,1%) umożliwiające długotrwałą pracę w zakresie do około 850°C. W dalszym ciągu prowadzone są badania nad poznaniem właściwości tego typu stopów oraz próby dalszego podwyższenia szczególnych właściwości użytkowych przez dodatki chromu, wanadu lub zastosowanie odpowiednich modyfikatorów [8–10].

Celem przeprowadzonych badań było określenie wpływu niewielkich ilości: Cu, Mo i Ni na właściwości wytrzymałościowe i odporność na działanie uderzeń ciepl-

ing). Its strength is within a broad range of 350 MPa to 900 MPa, and its elongation equals 22% to 2% (PN-EN 1563:2012 [1]). In traditional types of spheroidal cast iron, an increase of strength is mainly obtained by means of additions of pearlite-forming elements (Mn, Cu, Sn), which increase the content of pearlite and modify the morphology of this component in the matrix. The usually applied types are EN-GJS-400-15, EN-GJS-450-10, EN-GJS-500-7 and EN-GJS-600-3. The rising requirements made by constructors and the high competition on the market of construction material production have led to the elaboration of new, cheap types of spheroidal cast iron, in which elevated strength and ductility are obtained by increasing the silicon content, which hinders the formation of pearlite and strengthens the ferrite. These are the so-called solution reinforced types. The mentioned standard includes three types of cast iron: EN-GJS-450-18, EN-GJS-500-14 and EN-GJS-600-10. Owing to the elevated silicon content, a significant increase of the yield point and tensile strength are obtained, with high elongation, as well as a slightly better corrosion resistance and structure stability, both during the operation at elevated temperatures and in the case of periodical changes of this parameter. One of the disadvantageous effects of an elevated silicon content in cast iron is the tendency for the formation of unfavourable graphite precipitates (e.g. “chunky” graphite), which significantly lower the ductility of the material. The production and properties of solution hardened spheroidal cast iron have been examined in the recent literature [2–6].

The rapid progress in engine development, especially the so-called downsizing of internal combustion engines, has caused a significant increase of the mechanical and thermal loads of many cast elements, such as exhaust manifolds or turbine components. For these new conditions, the properties of the materials used so far have become insufficient; the relevant elements made with them exhibit insufficient durability, whereas those made of high-alloy steel or cast iron grades are too expensive. In response to such demand, Si-Mo low-alloy spheroidal cast iron has been developed. The standard PN-EN 16124:2012 [7] includes as many as 9 grades, differing in the content of silicon (2.3–5.2%) and molybdenum (0.4–1.1%), which enable long-term operation in the temperature range of up to about 850°C. Research is being continuously performed aimed at acquiring information on the properties of this type of alloy as well as further improving their special functional properties by means of chromium and vanadium or with the use of appropriate modifiers [8–10].

The aim of the present study is to determine the effect of small amounts of Cu, Mo and Ni on the strength and thermal shock resistance of solution hardened spheroidal cast iron. The above mentioned elements were selected on the basis of their interaction with the

nych utwardzonego roztworowo żeliwa sferoidalnego. Pierwiastki powyższe wybrano z uwagi na ich oddziaływanie na główne składniki osnowy metalicznej – ferryt i perlit, jak również tworzenie wydzielań wewnątrz ziaren i na ich granicach. W odróżnieniu od znanych gatunków żeliwa Si-Mo, w przeprowadzonych badaniach zastosowano podwyższoną zawartość manganu.

Dodatkowo, dla celów porównawczych, analogiczną procedurę badań zrealizowano dla żeliwa niestopowego wermikularnego odpowiadającego gatunkowi EN-GJV-400 wg PN-EN 16079:2012 [11] i oznaczonego numerem 0. Żeliwo z grafitem wermikularnym jest, szczególnie w ostatnich latach, zalecane na elementy pracujące w warunkach zmian temperatury [12].

2. Metodyka badań i wyniki

Badania zrealizowano wg poniższego schematu:

- wykonanie wytopów doświadczalnych z przeprowadzeniem:
 - analizy termicznej krystalizacji,
 - odlanie wlewków próbnych,
 - oznaczenia składu chemicznego metodą spektrometryczną;
- badania materiału doświadczalnego:
 - badania metalograficzne – ocena osnowy i postaci grafitu,
 - oznaczanie właściwości wytrzymałościowych,
 - oznaczenie twardości,
 - oznaczanie odporności na wstrząsy cieplne.

2.1. Realizacja wytopów

Wytopy doświadczalne przeprowadzono w piecu indukcyjnym tyglowym średniej częstotliwości o wyłożeniu obojętnym. Wsad zestawiano z: surówki specjalnej, złomu żeliwa sferoidalnego niestopowego, żelazostopów (FeSi75, FeMn80, FeMo65), metali czystych (Cu, Ni), nawęglacza. Obróbkę metalurgiczną prowadzono przy użyciu zaprawy FeSiMg9 i modyfikatora złożonego z zawartością baru w tyglu pieca w temperaturze 1420°C.

Przed i po wykonaniu wymienionych zabiegów, odlano próbki na skład chemiczny, zalewano próbki do analizy termicznej i wlewki próbne oddzielnie odlewane Y typ II według normy PN-EN 1563:2012 [1] (o grubości 25 mm). Wszystkie badania zostały przeprowadzone na próbkach wyciętych z wlewków próbnych w stanie lanym.

2.2. Analiza termiczna

Dla określenia parametrów charakterystycznych punktów krzywej krystalizacji oraz prognozowania

main constituents of the metallic matrix, i.e., ferrite and pearlite, as well as their contribution to the formation of precipitates inside the grains and on their boundaries. As opposed to the known Si-Mo cast iron grades, in this investigation, an elevated manganese content was applied.

Additionally, for comparison, a similar research procedure was performed on a vermicular non-alloy cast iron, corresponding to the GJV-400 type according to PN-EN 16079:2012 [11] and denoted with number 0. This grade was chosen because, in recent years vermicular graphite cast iron, has been recommended for elements working under variable temperature conditions [12].

2. Experimental methods and results

The experiments were performed according to the following schedule.

- Preparation of experimental melts, including:
 - thermal crystallization analysis,
 - casting of test ingots,
 - determination of chemical composition by means of spectrometry;
- Investigations of experimental material, including:
 - metallographic examination (evaluation of the metallic matrix and of the graphite shape),
 - tensile testing,
 - hardness measurement,
 - determination of thermal shock resistance.

2.1. Casting procedure

The experimental melts were performed in a crucible induction furnace with medium frequency and inert lining. The charge was prepared of: special pig iron, scrap of non-alloy spheroidal cast iron, ferroalloys (FeSi75, FeMn80, FeMo65), pure metals (Cu, Ni) and carburizer. The metallurgical treatment was performed with the use of a FeSiMg9 master alloy and a modifier with a barium content, in the furnace crucible at 1420°C.

The test ingots were cast individually, with the Y type II cross-section shape and size according to PN-EN 1563:2012 [1] (thickness 25 mm). All tests (except the thermal analysis) were performed on samples cut from the as-cast test ingots.

2.2. Thermal analysis

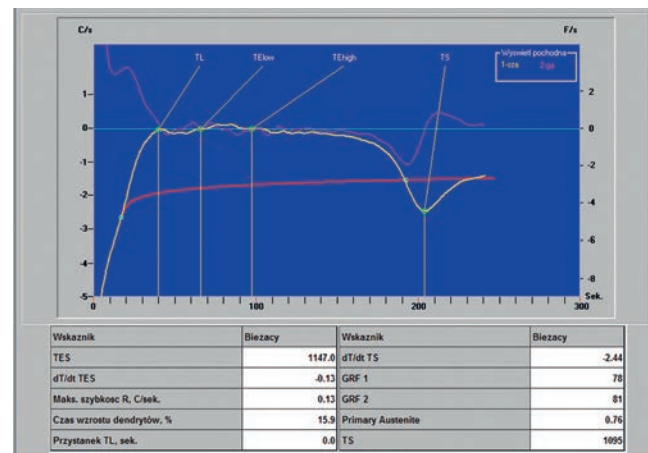
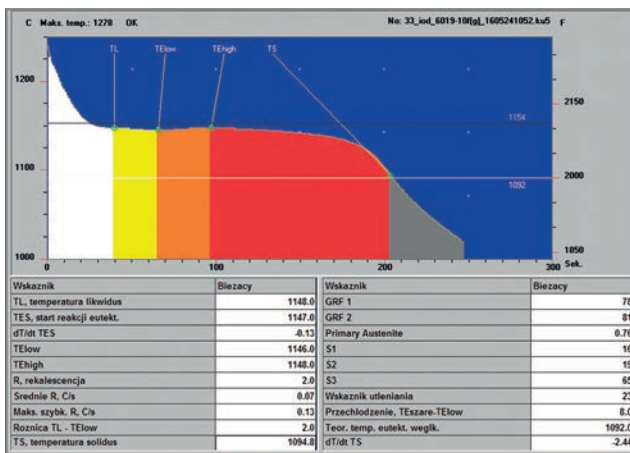
To determine the parameters of the characteristic points on the crystallization curve as well as predict the

właściwości wytapianego żeliwa po jego zakrzepnięciu w formie zastosowano adaptacyjny system analizy termicznej ATAS (wersja 7.2). System ATAS prowadzi analizę termiczną żeliwa wlanego do jednorazowego próbnika Quick-Cup QC 4010¹ wyposażonego w termoparę typu K. Przez analizę krzywej krzepnięcia oraz jej pochodnych, zostały określone następujące parametry: ACEL (aktywny równoważnik węglowy), TL (temperatura likwidus), TE_{low} (dolna temperatura eutektyczna), R (rekalescencja), S1, S2, S3 (zakresy krystalizacji), GRF1, GRF2 (czynniki grafityzacji), TS (temperatura solidus) [13] i zapisane w pamięci systemu.

Na rysunku 1 pokazano zrzut ekranu systemu ATAS z wynikami analizy termicznej żeliwa z wytopu nr 6.

properties of the melted cast iron, after its solidification in the mould, the adaptive system of thermal analysis ATAS (version 7.2) was applied. The ATAS system performs a thermal analysis of cast iron poured into a Quick-Cup QC 4010¹ disposable cup sensor equipped with a K type thermocouple. The following parameters were determined by analyzing the cooling curve and its time derivative: ACEL (Active carbon equivalent), TL (Liquidus temperature), TE_{low} (Lowest eutectic temperature), R (Recalescence), S1, S2, S3 (Crystallization ranges), GRF1, GRF2 (Graphite factors), TS (Solidus temperature) [13] and stored in the system memory.

An example of the determination of these parameters from the solidification curve and from its time derivative for melt no. 6 is shown in Figure 1.



Rys. 1. Krzywe krzepnięcia, pochodne czasowe oraz istotne punkty i temperatury dla żeliwa sferoidalnego nr 6

Fig. 1. Solidification curve, time derivatives and relevant points and temperatures for spheroidal cast iron no. 6

W tabeli 1 zestawiono ważniejsze parametry krystalizacji żeliwa sferoidalnego z wytopów doświadczalnych.

Table 1 compiles the most important crystallization parameters of the spheroidal cast iron from the experimental melts.

Tabela 1. Parametry krystalizacji żeliwa z wytopów doświadczalnych

Table 1. Crystallization parameters of cast iron from experimental melts

Nr/No.	Typ/Type	ACEL	TL, °C	TE _{low} , °C	R, °C	S1	S2	S3	GRF1	GRF2	TS, °C
0	2.4 Si (GJV400)	4,22	1149	1139	2	33	16	51	79	69	1092
1	4.6 Si - 0.7 Cu	3,89	1187	1140	6	35	22	43	51	139	1092
2	4.1 Si - 0.5 Mo - Mn	4,11	1162	1138	4	32	22	46	60	107	1092
3	4.0 Si - 1.0 Mo - Mn	4,19	1153	1135	3	30	21	49	57	136	1086
4	4.0 Si - 0.5 Ni	4,30	1140	1140	8	0	32	68	62	124	1088
5	4.0 Si - 0.9 Ni	4,27	1144	1144	4	0	39	61	56	126	1089
6	4.0 Si - 1.4 Ni	4,23	1148	1146	2	16	19	65	78	81	1095
7	4.0 Si - 1.8 Ni	4,26	1145	1141	7	18	25	57	51	144	1087

¹ Typ próbnika jednorazowego produkowanego przez Heraeus Electro-Nite

¹ Type of cup sensors manufactured by Heraeus Electro-Nite

2.3. Analiza chemiczna

W tabeli 2 zestawiono wyniki oznaczeń składu chemicznego żeliwa sferoidalnego z wytopów doświadczalnych.

Tabela 2. Skład chemiczny żeliwa z wytopów doświadczalnych, % wag.

Table 2. Chemical composition of cast iron from experimental melts, wt. %

Nr/No.	Typ/Type	C	Si	Mn	Cu	Mo	Ni	Mg
0	2.4 Si (GJV400)	3,60	2,43	0,35	0,02	0,01	0,07	0,040
1	4.6 Si - 0.7 Cu	2,85	4,65	0,22	0,69	0,01	0,08	0,061
2	4.1 Si - 0.5 Mo - Mn	3,09	4,10	0,58	0,05	0,45	0,10	0,059
3	4.0 Si - 1.0 Mo - Mn	3,07	3,99	0,65	0,03	0,95	0,10	0,048
4	4.0 Si - 0.5 Ni	3,35	4,00	0,21	0,06		0,51	0,070
5	4.0 Si - 0.9 Ni	3,38	4,02	0,19	0,05		0,92	0,056
6	4.0 Si - 1.4 Ni	3,19	3,96	0,16	0,04		1,40	0,046
7	4.0 Si - 1.8 Ni	3,25	3,99	0,19	0,06		1,80	0,072

2.4. Metalografia

Badania mikrostruktury przeprowadzono za pomocą mikroskopu metalograficznego na zgładach nietrawionych (dla oceny morfologii grafitu) i trawionych (dla oceny osnowy metalowej). W tabeli 3 zestawiono wyniki oceny mikrostruktury żeliwa z wytopów doświadczalnych. Na rysunkach 2–9 pokazano obrazy zgładów trawionych wykonanych przy powiększeniach optycznych 100×.

2.3. Chemical analysis

Table 2 presents the results of the determination of the chemical composition of the spheroidal cast iron from the experimental melts.

2.4. Metallography

The microstructure was examined with an optical microscope on both polished cross-sections (for the evaluation of the graphite morphology) and polished and etched cross-sections (for the evaluation of the metal matrix). The results of the evaluation of the cast iron microstructure of the experimental melts are summarized in Table 3. Figures 2–9 show images of the etched cross-sections made with the (original) magnification of 100×.

Tabela 3. Oznaczenie struktury żeliwa z wytopów doświadczalnych

Table 3. Determination of cast iron microstructure from experimental melts

Nr/No.	Typ/Type	Mikrostruktura grafitu wg PN-EN ISO 945-1:2008 [14] / Graphite morphology according to PN-EN ISO 945-1:2008 [14]	Mikrostruktura osnowy metalowej wg PN-H-04661:1975 [15] / Metal matrix microstructure according to PN-H-04661:1975 [15]
0	2.4 Si (GJV400)	95% IIIA5 + 5% VI5	Pf1-P20-Pd1,0
1	4.6 Si - 0.7 Cu	30%VI6 + 70%V6 + IIIA5 (ślady/traces)	Pf1-P45-Pd0,5
2	4.1 Si - 0.5 Mo - Mn	70%VI6 + 30%V6	Pf1-P6-Pd0,5
3	4.1 Si - 1.0 Mo - Mn	40%VI6 + 60%V6	Pf1-P20-Pd0,5-C2-Cw2000
4	4.0 Si - 0.5 Ni	80%VI6 + 20%V6	Pf1-P6-Pd0,5
5	4.0 Si - 0.9 Ni	70%VI5 + 30%V5	Pf1-P20-Pd0,5
6	4.0 Si - 1.4 Ni	60%VI6 + 40%IIIA4	Pf1-P6-Pd1,0
7	4.0 Si - 1.8 Ni	40%VI6 + 60%V6	Pf1-P20-Pd0,5

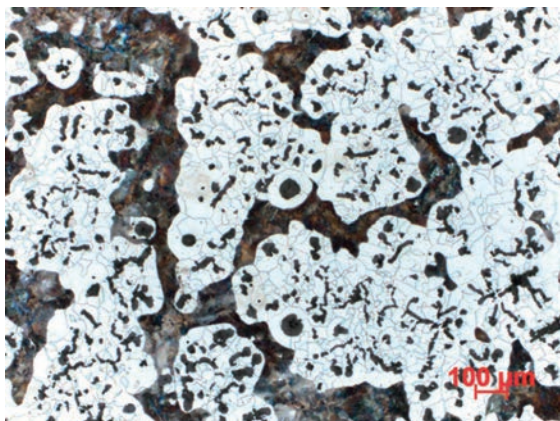
Pf1 – perlit płytkowy / plate pearlite

P6...45 – zawartość perlitu / pearlit content

Pd 0,5..1,0 – dyspersja perlitu / pearlite dispersion

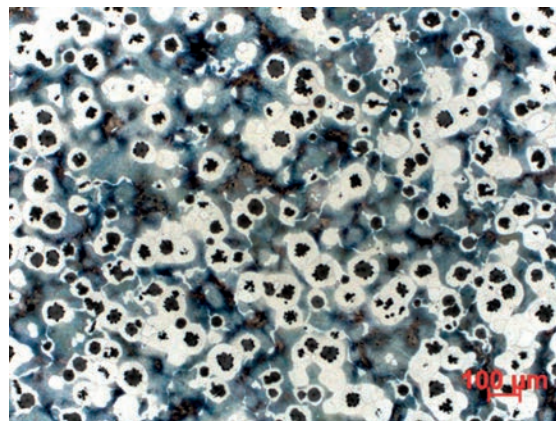
C2 – ilość cementytu – 2% w strukturze / amount of cementite – 2% on microsection

Cw2000 – wielkość wydzielań cementytu (wszystko wg wzorców) / cementite precipitate size (all according to reference images)



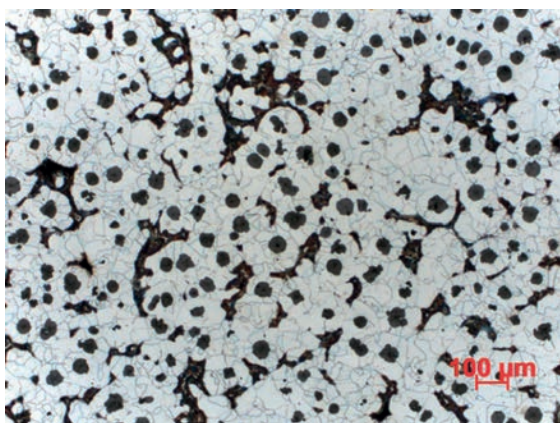
Rys. 2. Próbkę nr 0, zgląd trawiony; grafit wermikularny, grafit sferoidalny, ferryt, perlit

Fig. 2. Sample no. 0, etched microsection; vermicular graphite, spheroidal graphite, ferrite, pearlite



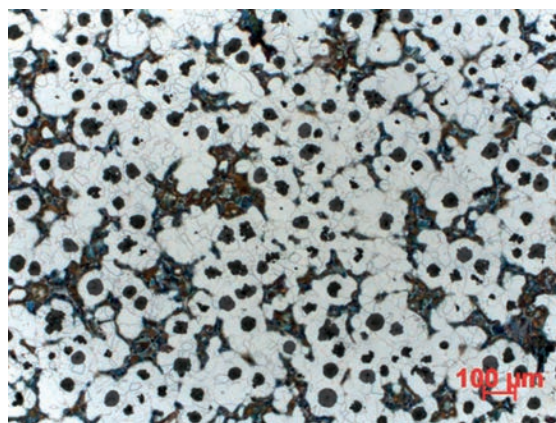
Rys. 3. Próbkę nr 1, zgląd trawiony; grafit sferoidalny, ferryt, perlit

Fig. 3. Sample no. 1, etched microsection; spheroidal graphite, ferrite, pearlite



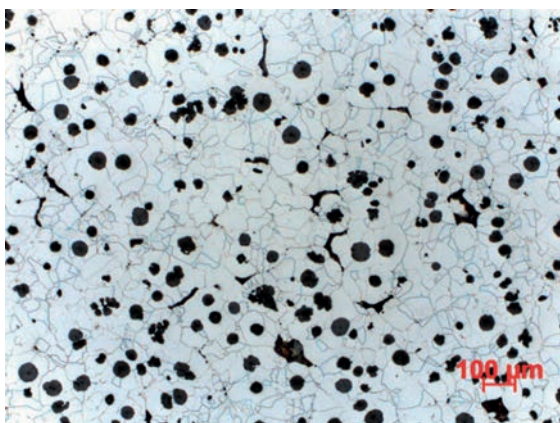
Rys. 4. Próbkę nr 2, zgląd trawiony; grafit sferoidalny, ferryt, perlit

Fig. 4. Sample no. 2, etched microsection; spheroidal graphite, ferrite, pearlite



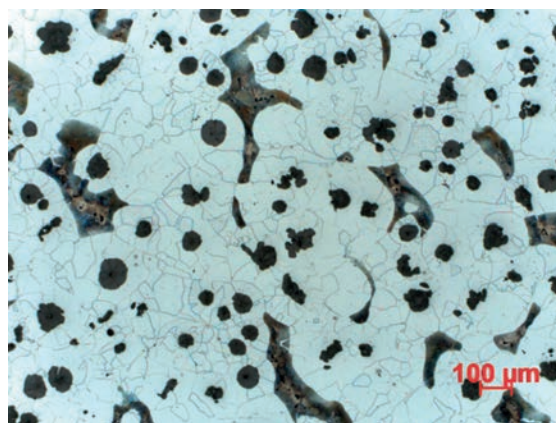
Rys. 5. Próbkę nr 3, zgląd trawiony; grafit sferoidalny, ślady węglików, ferryt, perlit

Fig. 5. Sample no. 3, etched microsection; spheroidal graphite, carbide traces, ferrite, pearlite



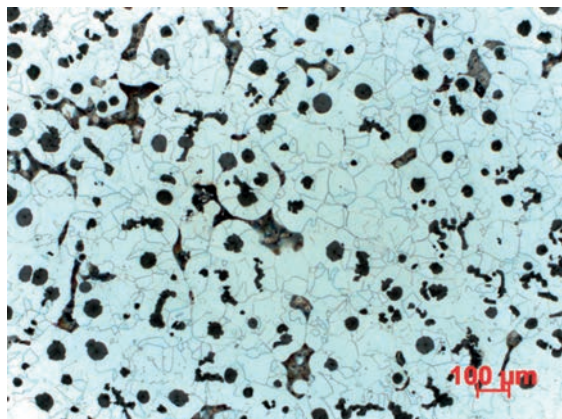
Rys. 6. Próbkę nr 4, zgląd trawiony; grafit sferoidalny, ferryt, ślady perlitu

Fig. 6. Sample no. 4, etched microsection; spheroidal graphite, ferrite, pearlite traces



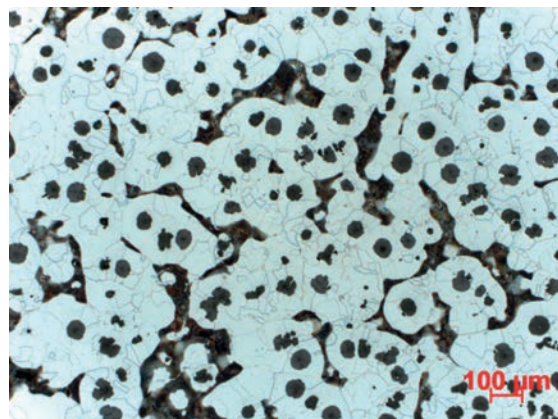
Rys. 7. Próbkę nr 5, zgląd trawiony; grafit sferoidalny, ferryt, perlit

Fig. 7. Sample no. 5, etched microsection; spheroidal graphite, ferrite, pearlite



Rys. 8. Próbkę nr 6, zgląd trawiony; grafit sferoidalny, grafit wermikularny, ferryt, perlit

Fig. 8. Sample no. 6, etched microsection; spheroidal graphite, vermicular graphite, ferrite, pearlite



Rys. 9. Próbkę nr 7, zgląd trawiony; grafit sferoidalny, ferryt, perlit

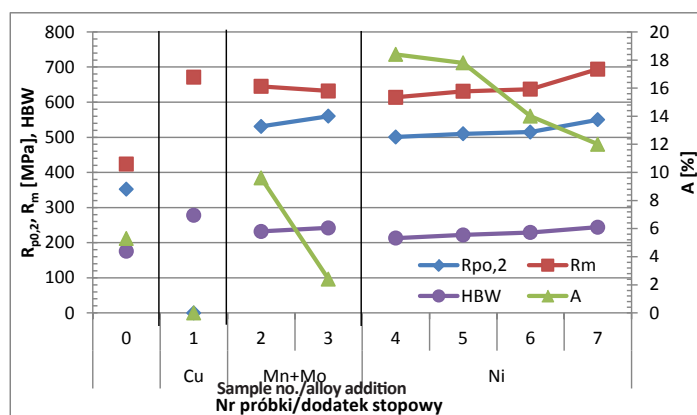
Fig. 9. Sample no. 7, etched microsection; spheroidal graphite, ferrite, pearlite

2.5. Właściwości mechaniczne

Próby rozciągania wykonano zgodnie z PN-EN ISO 6892-1:2009 [16]. Twardość żeliwa mierzono metodą Brinella 2,5/187,5/15 na próbkach wyciętych ze środkowych części wlewków próbnych. Wyniki przedstawiono na rysunku 10.

2.5. Mechanical properties

The tensile tests were carried out in accordance with PN-EN ISO 6892-1:2009 [16]. The cast iron hardness was measured on samples cut out of the central parts of the test ingots by means of the Brinell method, 2.5/187.5/15. The results are presented in Figure 10.



Rys. 10. Właściwości wytrzymałościowe żeliwa z wytopów doświadczalnych

Fig. 10. Strength properties of cast iron from experimental melts

2.6. Badanie odporności na wstrząsy ciepłe

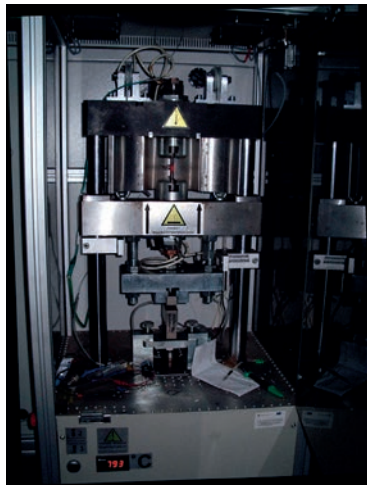
Badania odporności żeliwa na wstrząsy ciepłe zostały wykonane przy użyciu specjalistycznego aparatu skonstruowanego w Instytucie Odlewnictwa. Na rysunku 11 pokazano widok urządzenia podczas wykonywania próby, a na rysunku 12 – kształt i wymiary próbki do badań. Badania polegają na cyklicznym, szybkim nagrzewaniu próbki do określonej, wysokiej temperatury i następnie szybkim schłodzeniu do określonej temperatury. Nagrzewanie próbki realizowane jest przy użyciu prądu elektrycznego o bardzo dużym natężeniu, którego źródłem jest precyzyjnie sterowany zasilacz dużej mocy.

2.6. Thermal shock resistance tests

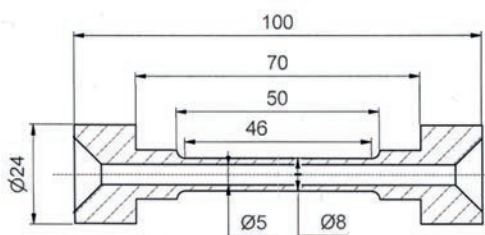
The tests of the cast iron's resistance to thermal shocks were performed with the use of a special apparatus constructed at the Foundry Research Institute. Figure 11 shows a view of the device during the test, whereas Figure 12 presents the shape and dimensions of the test sample. The experiments consisted in periodical, rapid heating and cooling between specific temperatures. Heating was realized by means of resistance heating due to a very high electrical current flowing through the specimen itself. Cooling was performed by means of compressed air, forced into the inner duct

Chłodzenie próbki realizowane jest przy użyciu sprężonego powietrza, wciąganego do kanału wewnętrznego próbki. Bieżąca temperatura była mierzona przy pomocy termopary typu K, zainstalowanej w środkowej części próbki. Wszystkie parametry prowadzonej próby mogą być regulowane w szerokim zakresie. Na monitorze komputera sterującego aparatem można obserwować, podczas prowadzenia próby, zmiany takich parametrów, jak: naprężenia w próbce, wartość prądu nagrzewającego, bieżąca temperatura próbki, współczynnik rozszerzalności temperaturowej materiału próbki, rezystancja próbki itp. (rys. 13).

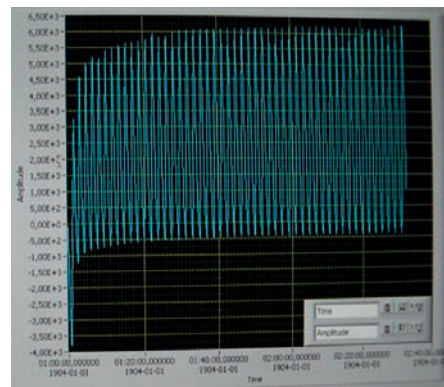
of the sample. The current temperature was measured with a K type thermocouple installed in the middle of the sample. The following parameters were continuously monitored during the test: stresses in the sample, value of the heating current, current temperature of the sample, thermal expansion coefficient of the sample material, resistance of the sample, etc. (Fig. 13).



Rys. 11. Aparat do badania udarów cieplnych
Fig. 11. Apparatus for thermal shock tests



Rys. 12. Próbkę do badania odporności na udary cieplne
Fig. 12. Thermal shock resistance sample



Rys. 13. Wykres siły działającej na próbkę podczas początkowej fazy badania odporności na wstrząsy cieplne
Fig. 13. Diagram of the force working on the sample during the initial phase of the thermal shock resistance test

Parametry prób zmęczenia cieplnego:

- zakres temperatury: pomiędzy 100°C a 800°C,
- pełny cykl nagrzewania i chłodzenia – ok. 60 sekund,
- prąd nagrzewający – 330 A,

The parameters of the thermal fatigue tests were:

- temperature cycle: between 100°C and 800°C
- full cycle duration – about 60 seconds.
- heating current – 330 A,

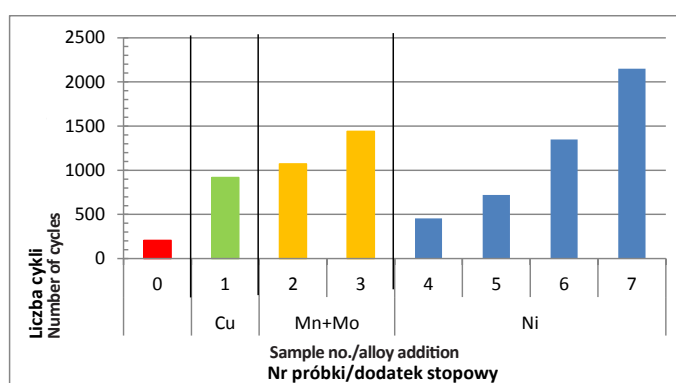
- obciążenie wstępne (rozciągające) – 20 N,
- zamocowanie sztywne, wymuszające naprężenia ściskające w próbkach podczas nagrzewania (zależne od współczynnika rozszerzalności temperaturowej materiału badanej próbki).
- initial load (tension) – 20 N,
- constant displacement, causing compression stresses in the samples during the thermal cycle (dependent on the thermal expansion coefficient of the examined material).

Miarą odporności materiału na wstrząsy ciepłe jest liczba cykli nagrzewania i chłodzenia próbki do momentu jej pęknięcia i przzerwania obwodu nagrzewającego ją prądu.

Na rysunku 14 zestawiono wyniki oznaczeń odporności na wstrząsy ciepłe żeliwa z wytopów doświadczalnych.

The measurement of the material's resistance to thermal shocks is the number of heating and cooling cycles until the sample fractures and the circuit of the heating current is broken.

Figure 14 compiles the results of the determination of the thermal shock resistance of the cast iron from the experimental melts.



Rys. 14. Odporność żeliwa z wytopów doświadczalnych na wstrząsy ciepłe
Fig. 14. Thermal shock resistance of cast iron from experimental melts

3. Analiza wyników i wnioski

Wszystkie zastosowane pierwiastki stopowe wpłynęły pozytywnie na właściwości wytrzymałościowe (rys. 10) i odporność na wstrząsy ciepłe żeliwa (rys. 14).

Żeliwo z dodatkiem miedzi w ilości około 0,7%, przy wysokim stopniu utwardzenia ferrytu (ok. 4,65% Si), osiągnęło wysoką twardość i wytrzymałość, przy bardzo niskim wydłużeniu. W porównaniu do żeliwa odniesienia (nr 0) odporność na wstrząsy ciepłe żeliwa z Cu była około 4,5 razy większa.

Żeliwo z molibdenem w obu zastosowanych stężeniach: 0,45% i 0,95% (i przy zawartości manganu większej niż w normalnych żeliwach typu Si-Mo) cechowało się umiarkowaną twardością i wysoką wytrzymałością. Wzrost zawartości molibdenu spowodował również bardzo silny spadek wydłużenia – z prawie 10% do około 2%. Odporność na wstrząsy ciepłe żeliwa z molibdenem okazała się wysoka i wynosiła odpowiednio około 5 i 7 razy więcej niż dla żeliwa odniesienia.

Nikiel, który wprowadzono w czterech stężeniach (od około 0,5% do 1,8%), wykazał bardzo korzystny wpływ na wszystkie właściwości badanego żeliwa. Ze wzrostem zawartości niklu, przy umiarkowanym

3. Analysis of results and conclusions

All the applied alloy elements had a positive effect on the strength properties (Fig. 10) and thermal shock resistance of the cast iron (Fig. 14).

The cast iron with the copper addition of about 0.7%, with a high degree of ferrite hardening (about 4.65% Si), reached a high hardness and strength value, with a very low elongation. Compared to the reference cast iron (no. 0), the thermal shock resistance of the cast iron with Cu was about 4.5 times higher.

The cast iron with molybdenum at both applied intensities, i.e. 0.45% and 0.95% (and with the manganese content higher than in the regular Si-Mo type cast irons), exhibit a moderate hardness and high strength value. An increase in the molybdenum content caused also a very strong drop of elongation – from nearly 10% to about 2%. The thermal shock resistance of the cast iron with molybdenum turned out to be high, equaling 1070 and 1440 thermal shock cycles, respectively, which constituted about 5 and 7 times more than in the case of the reference cast iron, respectively.

Nickel, which was introduced in four concentrations (from about 0.5% to 1.8%), exhibited a very beneficial effect on all the properties of the examined cast iron.

wzroście twardości żeliwa, znacząco wzrastała jego wytrzymałość i granica plastyczności. Dodatkowo, nawet przy najwyższej zawartości Ni, żeliwo zachowało wysokie wydłużenie (ok. 12%). Dodatek niklu w ilości 1,4% i 1,8% okazał się bardzo korzystny dla odporności tworzywa na wstrząsy cieplne. W stosunku do żeliwa odniesienia uzyskano odpowiednio około 6,5 i 10,5 razy większą odporność na wstrząsy cieplne. Należy nadmienić, że spośród badanych próbek żeliwa, najwyższą odporność na wstrząsy cieplne wykazało żeliwo oznaczone nr 7, zawierające około 4,0% Si i 1,8% Ni, gdyż wytrzymało aż 2150 cykli uderów cieplnych do pęknięcia próbki.

W oparciu o uzyskane wyniki badań można sformułować następujące wnioski:

1. Dzięki wprowadzaniu do żeliwa sferoidalnego umocnionego roztworowo niewielkich ilości pierwiastków stopowych, można otrzymać materiał konstrukcyjny o wysokich właściwościach wytrzymałościowych i odporności na wstrząsy cieplne. Uzyskane właściwości badanego żeliwa w znaczący sposób przewyższyły analogiczne dla żeliwa wermikularnego, przyjętego jako punkt odniesienia.
2. Miedź wspiera powstanie perlitu, bardzo silnie zwiększa twardość i wytrzymałość żeliwa. Odporność na wstrząsy cieplne podwyższa w sposób umiarkowany.
3. Molibden do zawartości około 0,5% działa korzystnie na właściwości wytrzymałościowe żeliwa, łącząc wysoką wytrzymałość z dobrym wydłużeniem i stosunkowo dobrą odpornością na wstrząsy cieplne. Wzrost zawartości molibdenu w stopie wydawnie podwyższa odporność na wstrząsy cieplne, lecz równocześnie znacznie obniża plastyczność żeliwa.
4. Zawartość niklu w żeliwie sferoidalnym bardzo korzystnie wpływa na wytrzymałość tworzywa przy zachowaniu wysokiego wydłużenia. Żeliwo o zawartości 1,8% Ni przy wytrzymałości na rozciąganie około 700 MPa posiadało wydłużenie $A = 12\%$. Szczególnie pozytywny wpływ niklu na odporność na wstrząsy cieplne stwierdzono przy wyższych zawartościach tego pierwiastka, tj. 1,4% i 1,8%.

Podziękowania

Badania zostały przeprowadzone w ramach prac statutowych Instytutu Odlewnictwa w 2016 roku i były finansowane przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

With the increase of the nickel content and a moderate increase of the cast iron hardness, its strength and yield point significantly rise. Additionally, even with the highest Ni content, the cast iron maintained high elongation (about 12%). The addition of nickel in the amount of 1.4% and 1.8% turned out to be very advantageous for the material's resistance to thermal shocks. In respect of the reference cast iron, about 6.5 and 10.5 times higher thermal shock resistance was obtained, respectively. It should be noted that, of all the examined cast iron samples, the highest thermal shock resistance was demonstrated by the cast iron denoted as no. 7, which contained about 4.0% Si and 1.8% Ni, as it withstood as many as 2150 cycles of thermal shocks until the sample fractured.

On the basis of the obtained test results, we can draw the following conclusions:

1. Owing to the introduction of low amounts of alloy elements into the solution reinforced spheroidal cast iron, it is possible to obtain a construction material of high strength properties and thermal shock resistance. The obtained properties of the examined cast iron were significantly better than the corresponding properties of the vermicular cast iron, assumed as the reference point.
2. Copper favours the formation of pearlite; it also significantly increases the hardness and strength of the cast iron, while moderately increasing its thermal shock resistance.
3. A molybdenum content of up to about 0.5% positively affects the strength properties of the cast iron, combining a high strength with a good elongation and a relatively good thermal shock resistance. An increase in the molybdenum content in the cast iron significantly increases its resistance to thermal shocks, yet, at the same time, strongly reduces the cast iron's ductility.
4. Nickel introduced into spheroidal cast iron has a very positive effect on the material's strength, at the same time, preserving its high elongation. Cast iron with the 1.8% Ni content, with the elongation strength of about 700 MPa, demonstrated elongation $A = 12\%$. An especially beneficial effect of nickel on the thermal shock resistance was stated with higher contents of this element, i.e. 1.4% and 1.8%.

Acknowledgements

The studies were realized within the statutory work of the Foundry Research Institute in 2016, owing to the financial support of the Ministry of Science and Higher Education.

Literatura/References

1. PN-EN 1563:2012 Odlewnictwo – Żeliwo sferoidalne.
2. Löblich H., W. Stets. 2013. „Werkstoff- und fertigungstechnische Grundlagen der Herstellung und Anwendung von hoh siliciumhaltigem Gusseisen mit Kugelgraphit. Teil 1: Einfluss von Silicium auf die mechanischen Eigenschaften, Versprötlungs- effekte, Seigerungen, Graphitformabweichungen, Wirkung von höheren Gehalten an Mn, Cr und V”. *Giesserei* 100 (07) : 30–47.
3. Löblich H., W. Stets. 2013. „Werkstoff- und fertigungstechnische Grundlagen der Herstellung und Anwendung von hoh siliciumhaltigem Gusseisen mit Kugelgraphit. Teil 2: Impftechnologie, Abweichungen in der Graphitform, Bearbeitbarkeit”. *Giesserei* 100 (08) : 42–53.
4. Vollrath K. 2013. „Neue, hochinteressante Kugelgraphit-Gusswerkstoffe”. *Giesserei* 100 (09) : 70–73.
5. Larker R. 2009. „Solution strengthened ferritic ductile iron ISO 1083/JS/500-10 provides superior consistent properties in hydraulic rotators”. *China Foundry* 6 (4) : 343–351.
6. Werner H., I. Lappat, B. Aurich. 2016. „Mischkristallverfestigte EN-GJS-Werkstoffe für Groß- und Schwergussteile”. *Giesserei* 103 (2) : 38–42.
7. PN-EN 16124:2012 Odlewnictwo – Żeliwo sferoidalne ferrytyczne niskostopowe do zastosowań w podwyższonej temperaturze.
8. Black B., G. Burger, R. Logan, R. Perrin, R. Gundlach. 2002. „Gefügestabilität und Maßhaltigkeit von GJS-SiMo zum Einsatz bei erhöhten Temperaturen”. *Giesserei-Praxis* (10) : 363–374.
9. Åberg L.M., C. Hartung. 2012. „Solidification of SiMo nodular cast iron for high temperature applications”. *Transactions of the Indian Institute of Metals* 65 (6) : 633–636.
10. Matteis P., G. Scavino, A. Castello, D. Firrao. 2014. „High temperature fatigue properties of a Si-Mo ductile cast iron”. *Procedia Materials Science* 3 : 2154–2159.
11. PN-EN 16079:2012 Odlewnictwo – Żeliwo z grafitem zwartym (wermikularnym).
12. Pytel A. 2012. „Żeliwo z grafitem wermikularnym – materiał konstrukcyjny na elementy pracujące w warunkach zmęczenia cieplnego”. Konferencja naukowa: Badania i rozwój nowoczesnej technologii tworzyw odlewniczych odpornych na zmęczenie cieplne. Zakopane, 12–14 czerwca 2012.
13. *ATAS Verifier 7. User guide, NovaCast Systems AB.*
14. PN-EN ISO 945-1:2009 Mikrostruktura żeliwa – Część 1: Klasyfikacja wydzieli grafitu na podstawie analizy wizualnej.
15. PN-H-04661:1975 Żeliwo szare sferoidalne i ciągliwe – Badania metalograficzne – Określanie mikrostruktury.
16. PN-EN ISO 6892-1:2009 Metallic materials – Tensile testing – Method of test at room temperature.

