

Wpływ niklu na strukturę i twardość żeliwa sferoidalnego w odlewach cienkościennych

The effect of nickel content on structure and hardness of ductile iron in thin-walled castings

Sabina Puzio^{1*}

¹Institut Odlewnictwa, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków, Polska
¹Foundry Research Institute, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków, Poland

*Corresponding author: sabina.puzio@iod.krakow.pl

Received: 13.09.2018. Accepted in revised form: 30.11.2018.

© 2018 Instytut Odlewnictwa. All rights reserved.

DOI: 10.7356/iod.2018.14

Streszczenie

Technologia otrzymywania żeliwa sferoidalnego powoduje wydzielenie się grafitu w postaci kulek. Kształt ten w najmniejszym stopniu oddziałuje na obniżenie właściwości mechanicznych żeliwa sferoidalnego. Jego wytrzymałość w głównej mierze zależy od osnowy, zatem od składu chemicznego, kinetyki krzepnięcia i technologii obróbki cieplnej. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań mikrotwardości i twardości, wyniki badań metalograficznych oraz analizy termicznej dla odlewów cienkościennych z żeliwa sferoidalnego o różnej zawartości niklu. Badania miały na celu określenie wpływu zawartości niklu na strukturę i właściwości żeliwa sferoidalnego w odlewach cienkościennych. W ramach badań założono uzyskanie żeliwa sferoidalnego zawierającego 0,001; 1; 10 oraz 24% Ni. Wykazano, że nikiel stabilizuje austenit. Przy zawartości niklu wynoszącej 24% osiągnięto całkowicie austenityczną osnowę, dla zawartości niklu wynoszącej 10% w osnowie tworzy się martenzyt, wskutek czego znacznie wzrasta twardość żeliwa. Dla niskich zawartości w żeliwie nikiel wykazuje działanie perlitotwórcze.

Słowa kluczowe: żeliwo sferoidalne, struktura, skład chemiczny, twardość, zawartość niklu, odlewy cienkościenne

Abstract

In the technology of ductile iron manufacture, graphite precipitates take the form of spheroids, and this shape has the least harmful effect on cast iron mechanical properties. The strength of ductile iron depends mainly on its matrix, and hence on the chemical composition, solidification kinetics and heat treatment technology. This article presents the results of micro-hardness and hardness measurements, and the results of metallographic examinations and thermal analysis carried out on thin-walled ductile iron castings with varying nickel content. The main aim of the research was to determine the effect of nickel content on structure and properties of ductile iron in thin-walled castings. To achieve the goal, ductile iron containing 0.001; 1.0; 10 and 24% Ni was manufactured. It has been shown that nickel stabilizes austenite. With the nickel content of 24%, a completely austenitic matrix was obtained, the addition of 10% Ni to the matrix produced martensite, considerably increasing the cast iron hardness. Low content of this additive had a pearlite-forming effect.

Keywords: ductile iron, structure, chemical composition, hardness, nickel content, thin-wall castings

1. Wstęp

Żeliwo sferoidalne to grupa stopów opisana w normie PN-EN 1563:2011 [1] o wytrzymałości na rozciąganie 400–900 MPa oraz dobrej plastyczności ($A_5 = 2-22\%$) oraz żeliwo ADI opisane w normie PN-EN 1564:2011

1. Introduction

The term ductile iron denotes a group of cast irons described in the norm PN-EN 1563:2011 [1] with the tensile strength of 400–900 MPa and also good plastic properties ($A_5 = 2-22\%$), and austempered ductile

[2] o wytrzymałości na rozciąganie 800–1400 MPa i wydłużeniu 1–10%. Ponadto w przemyśle wykorzystuje się również żeliwo stopowe, posiadające szczególne przeznaczenie, jak np. Ni-resist o osnowie austenitycznej do pracy w niskich temperaturach oraz w ośrodkach korozyjnych czy żeliwo krzemowe do pracy w wysokich temperaturach [4]. Żeliwo sferoidalne może z powodzeniem zastąpić staliwo, co jest obecnie stosowane w rozwiązaniach technicznych, jak np. w przemyśle samochodowym [3]. Żeliwo sferoidalne charakteryzuje się niewielkimi kosztami względny wytwarzania na jednostkę wytrzymałości. Skład chemiczny jest głównym czynnikiem, który umożliwia kontrolę kształtu wydzielań grafitu, a także ma wpływ na rodzaj osnowy metalowej i zachowanie się stopu podczas obróbki cieplnej. Pozwala to na uzyskiwanie wysokiej jakości żeliwa o założonych właściwościach mechanicznych [4].

Ważnym czynnikiem opisującym jakość żeliwa jest jego skłonność do przechłodzenia, czyli tendencja do krystalizacji w układzie metastabilnym żelazo–cementyt. Zależy ona od fizykochemicznego stanu ciekłego metalu podczas krzepnięcia i szybkości stygnięcia odlewu. Jest to bardzo ważny czynnik, który należy brać pod uwagę podczas produkcji odlewów cienkościennych, w których mamy do czynienia ze zwiększoną szybkością odprowadzania ciepła. Żeliwo białe lub połowiczne, charakteryzujące się występowaniem w strukturze eutektyki cementytowej, jest trudne do obróbki mechanicznej. Dodatek niklu poza tym, że zwiększa hartowność powoduje również zmniejszenie skłonności do zabielenia, dlatego jest korzystnym dodatkiem do produkcji odlewów cienkościennych z żeliwa sferoidalnego [5].

2. Metodyka badań

W piecu indukcyjnym z następujących materiałów wsadowych: wysokiej czystości surówki odlewniczej, złomu stalowego, Fe-Si, Fe-Mn oraz technicznie czystego niklu, wykonano cztery wytopy żeliwa sferoidalnego o zmiennym składzie chemicznym. Metal każdorazowo przegrzano do temperatury 1490°C, przetrzymano w tej temperaturze przez minutę, a następnie przeprowadzono zabieg modyfikacji i sferoidyzacji metodą dzwonową. Do zabiegu sferoidyzacji wykorzystano zaprawę Fe-Si-Mg. Do modyfikacji natomiast użyto modyfikator w ilości 0,5% w stosunku do masy ciekłego metalu. Specyfikację techniczną modyfikatora i sferoidyzatora zestawiono w tabeli 1. Metal odlano do klasycznych form wykonanych z masy bentonitowej, w których umieszczono termoelementy typu S (Pt-PtRh-10), celem wykonania analizy termicznej. Temperatura zalewania form wynosiła 1400°C. Za modele posłużyły wlewki odtwarzające płytki o wymiarach 5 × 175 × 50 mm. Ze środkowej części każdego z odlewów wycięto próbki do badań metalograficznych. Przygotowane zglądy, trawione nitałem, zostały wykorzystane do badań metalograficznych osnowy. Badania

iron described in the norm PN-EN 1564:2011 [2] with the tensile strength of 800–1400 MPa and elongation above 1–10%. For special applications, the industry also uses alloyed cast iron, such as Ni-resist with austenitic matrix for operation at low temperatures and in corrosive media or silicon cast iron for operation at high temperatures [4]. Ductile iron can successfully replace cast steel, and therefore it is currently used in various technical solutions, e.g. in the automotive industry [3]. The cost of ductile iron manufacture per unit of strength is relatively low. Chemical composition is the main factor that controls the shape of graphite precipitates, and also affects the type of metal matrix and alloy behaviour during heat treatment. This allows obtaining high-quality cast iron with the required mechanical properties [4].

An important factor determining the cast iron quality is its tendency to supercooling, i.e. the tendency to crystallize in a metastable iron-cementite system. It depends on the physico-chemical state of liquid metal during solidification and on the cooling rate of casting. The cast iron tendency to supercooling should be taken into account in the manufacture of thin-walled castings, which are characterized by an increased rate of heat dissipation. White or mottled cast iron, typically containing cementite eutectic in its structure, is difficult in machining. The addition of nickel not only improves the cast iron hardenability, but also reduces the sensitivity to chill formation, which makes this addition very beneficial in the manufacture of thin-walled ductile iron castings [5].

2. Research methodology

Four ductile iron melts with different chemical composition were made in the induction furnace from the following charge materials: high purity pig iron, steel scrap, Fe-Si, Fe-Mn and technically pure nickel. The melt was each time superheated to 1490°C, held at this temperature for one minute, and then subjected to the spheroidizing treatment and inoculation performed by the plunging bell method. The spheroidizer was magnesium master alloy (Fe-Si-Mg). The inoculant was added in an amount of 0.5% relative to the molten metal weight. Specification of inoculant and spheroidizer is presented in Table 1. The metal was cast into typical bentonite moulds with the S type thermocouple (Pt-PtRh-10) placed in these moulds for thermal analysis. The mould pouring temperature was 1400°C. Ingots representing 5 × 175 × 50 mm plates were used as models. Samples for metallographic examinations were cut out from the middle part of each casting. The ready nital-etched sections were used for metallographic studies of the matrix. Hardness tests were carried out by the Vickers method on metallographic sections using a HV-1000B

twardości przeprowadzone zostały metodą Vickersa na zglądach metalograficznych przy użyciu mikrotwardościomierza Norgpol HV-1000B oraz twarłościomierza HPO 250. Wynik twarłości określono poprzez pomiar przekątnych powstałego odcisku i odczytaniu twarłości z tablic, zgodnie z normą PN-EN ISO 6507-1:2007 [8].

microhardness tester and an HPO 250 hardness tester. Hardness was determined by measuring the length of the indentation diagonals and reading out the corresponding value from the table in accordance with the PN-EN ISO 6507-1:2007 standard [8].

Tabela 1. Skład chemiczny i funkcja materiałów użytych do badań [6,7]

Table 1. Role and chemical composition of materials used in research methodology [6,7]

Material/Material	Funkcja/Role	Si, % wag. / wt. %	Mg, % wag. / wt. %	Ca, % wag. / wt. %	REE, % wag. / wt. %	Al, % wag. / wt. %
Elmag 5800	Sferydyzator/ Spheroidizer	44-48	5,50-6,20	0,80-1,20	0,80-1,20	0,40-1,00
Foundrysil	Modyfikator/ Inoculant	73-78	–	0,75-1,25	–	0,75-1,25

3. Wyniki badań

Wyniki analizy składu chemicznego dla poszczególnych stopów zostały przedstawione w tabeli 2.

3. Test results

The results of the chemical composition analysis carried out for individual alloys are compared in Table 2.

Tabela 2. Wyniki analizy składu chemicznego

Table 2. The results of chemical analysis

Nr wytopu / Melt No.	C, % wag. / wt. %	Si, % wag. / wt. %	Mn, % wag. / wt. %	P, % wag. / wt. %	S, % wag. / wt. %	Mg, % wag. / wt. %	Ni, % wag. / wt. %	CE
1	3,64	2,93	0,39	0,03	0,01	0,040	0,03	4,50
2	3,47	2,76	0,34	0,03	0,01	0,042	0,96	4,29
3	3,05	2,31	1,07	0,02	0,01	0,035	10,63	4,18
4	2,55	2,15	0,85	0,02	0,01	0,030	23,50	4,09

Współczynnik CE dla żeliwa wysokonickowego obliczony został ze wzoru 1 [9].

$$CE = C + 0,33 \cdot Si + 0,047 \cdot Ni - (0,0055 \cdot Ni \cdot Si) \quad (1)$$

gdzie:

C, Si, Ni – zawartość w stopie odpowiednio węgla, krzemu i niklu, % wag.

Wyniki badań spektralnych potwierdziły, że wsad został dobrany prawidłowo, co pozwoliło na uzyskanie zawartości niklu w żelwie bardzo zbliżonych do założonych, tj. 0,01; 1; 10 oraz 24%.

Za pomocą pomiaru temperatury w formie podczas stygnięcia i krzepnięcia odlewów uzyskano krzywe, przedstawiające przebieg zmiany temperatury w zależności od czasu wpływającego od momentu zalania form. Krzywe przedstawiono na rysunku 1. Analizując poniższe wykresy, zauważyć można, że położenie tem-

For high-nickel cast iron, the value of CE was calculated from Equation 1 [9].

$$CE = C + 0.33 \cdot Si + 0.047 \cdot Ni - (0.0055 \cdot Ni \cdot Si) \quad (1)$$

where:

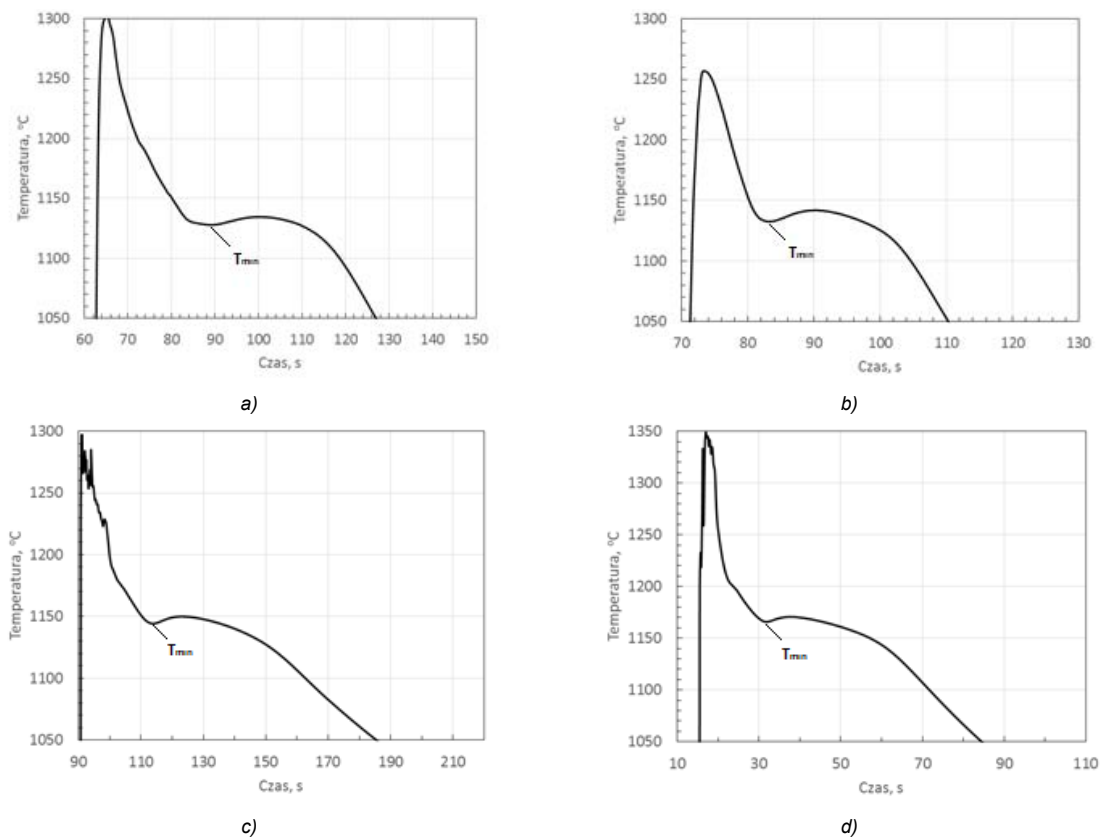
C, Si, Ni – content of carbon, silicon and nickel, respectively, in the alloy, wt. %

The results of spectral analysis confirmed the properly selected charge composition, which allowed obtaining the nickel content in cast iron very close to the required value, i.e. 0.01; 1.0; 10 and 24%.

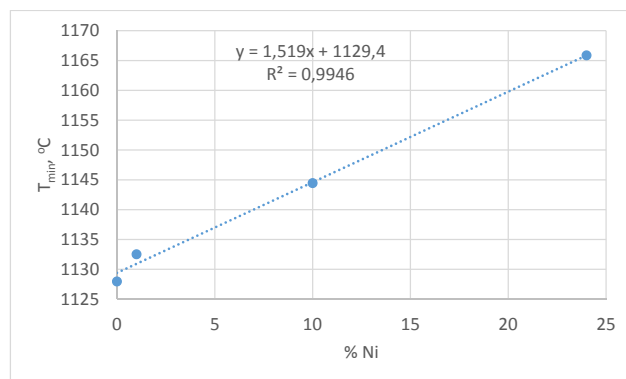
Based on the results of temperature measurements taken in the mould during cooling and solidification of castings, curves were plotted to depict the course of temperature changes as a function of time elapsed from the moment of mould pouring. The curves are shown in Figure 1. Studies of the graphs given below show that

peratury T_{min} na początku krystalizacji eutektyki grafitowej zmienia się w zależności od zawartości niklu w stopie. Zależność tą przedstawiono na wykresie na rysunku 2. Można zauważyć, że temperatura T_{min} rośnie wraz ze wzrostem zawartości niklu w żelwie. Analizując poniższy wykres, można również zauważyć, że jest to zależność niemalże liniowa, opisana równaniem statystycznym z wysokim współczynnikiem korelacji.

the location of the temperature T_{min} at the beginning of the crystallization process of graphite eutectic varies and depends on nickel content in the alloy. This dependence is graphically depicted in Figure 2, wherefrom it follows that the temperature T_{min} increases with the increasing content of nickel in cast iron. Closer analysis of the chart also shows that this is an almost linear relationship, described by the statistical equation with a high correlation coefficient.



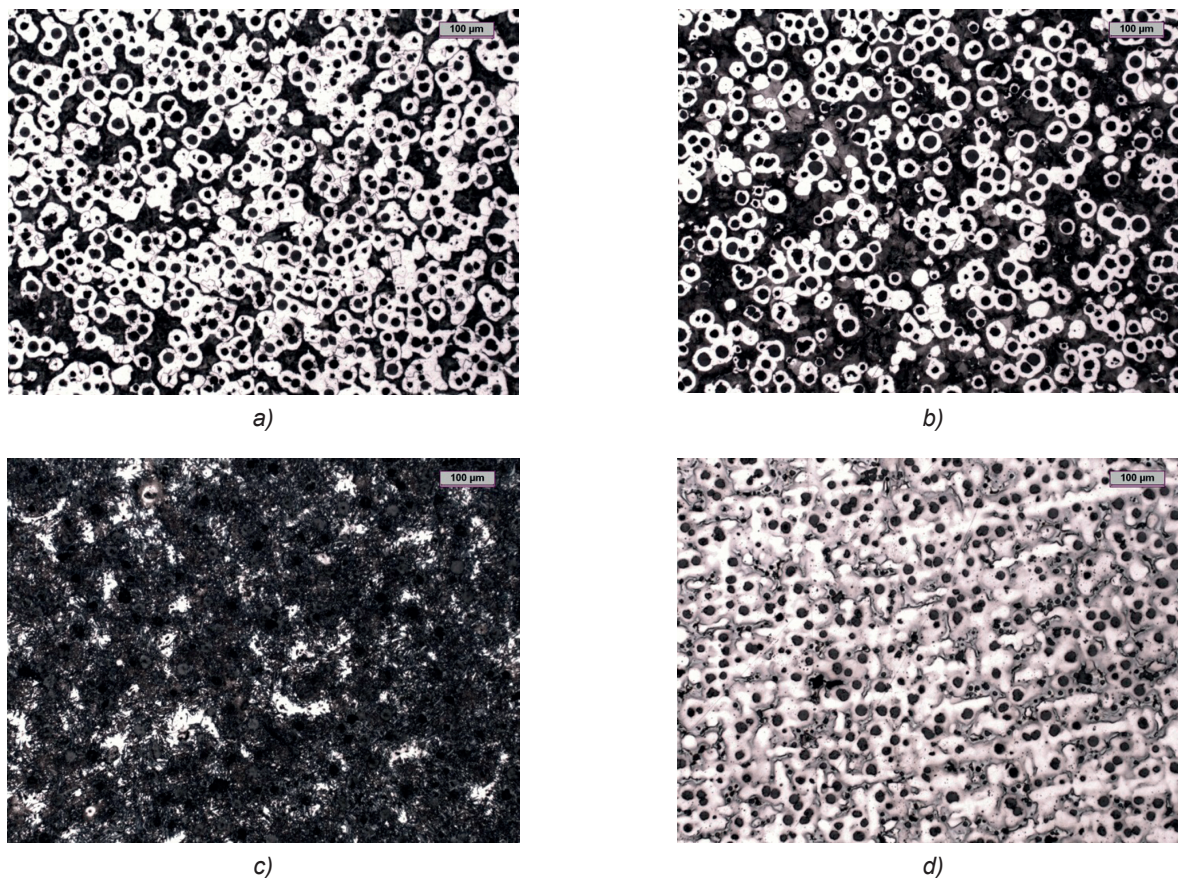
Rys. 1. Krzywe stygnięcia stopów dla wykonanych odlewów: a) wytop 1, b) wytop 2, c) wytop 3, d) wytop 4
 Fig. 1. Cooling curves of alloys cast: a) melt 1, b) melt 2, c) melt 3, d) melt 4



Rys. 2. Zależność minimalnej temperatury początku krystalizacji eutektyki grafitowej od zawartości niklu w stopie
 Fig. 2. Relationship between minimum temperature of the beginning of graphite eutectic crystallization and nickel content in alloy

Mikrostruktury badanych zglądów przedstawione zostały na [rysunku 3](#).

Microstructures of the examined metallographic sections are presented in [Figure 3](#).



Rys. 3. Mikrostruktura żeliwa, trawione nital, powiększenie 100×: a) wyjściowego, b) o zawartości niklu 1%, c) o zawartości niklu 10%, d) o zawartości 24% Ni

Fig. 3. Microstructure of cast iron, nital etching, 100×: a) base cast iron, b) cast iron with 1.0% Ni, c) cast iron with 10% Ni, d) cast iron with 24% Ni

Dla każdej mikrostruktury za pomocą programu Leica QWin wyznaczono liczbę kulek grafitu przypadającą na jednostkę powierzchni N_A , średnicę ekwiwalentną d_{sr} , zdefiniowaną wzorem 2, a także współczynnik kształtu S , zdefiniowany wzorem 3 [10]. Określono również procentowy udział składników osnowy.

$$d_{sr} = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}, \text{ mm} \quad (2)$$

$$S = \frac{4\pi A}{p^2} \quad (3)$$

gdzie:

A – pole powierzchni wydzieli grafitu,

p – obwód rzeczywisty wydzieli grafitu

Wyniki obliczeń zostały zestawione w [tabeli 3](#).

For each microstructure, the graphite nodule count per unit surface area N_A , the equivalent diameter d_{sr} defined by Equation 2, and the shape factor S defined by Equation 3 [10] were determined using a Leica QWin software. The percent content of matrix constituents was also determined.

$$d_{sr} = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}, \text{ mm} \quad (2)$$

$$S = \frac{4\pi A}{p^2} \quad (3)$$

where:

A – surface area of graphite precipitates,

p – real perimeter of graphite precipitates

The results of calculations are summarized in [Table 3](#).

Tabela 3. Wyniki badań metalograficznych
Table 3. The results of metallographic examinations

Numer próbki / Sample No.	N_A , 1/mm ²	d_{sr} , μm	S,	Udział grafitu, % / Graphite content, %	Udział składników osnowy, % / Content of matrix constituents, %
1	607,00	13,65	0,81	9,85	Feryt/Ferrite: 50–55%
	585,12	14,31	0,80	10,53	Perlit/Pearlite: 40%
2	555	13,16	0,81	8,65	Feryt/Ferrite: 32%
	596	12,20	0,83	8,16	Perlit/Pearlite: 60%
3	418	14,15	0,76	7,85	Martenzyt/Martensite: 70%
	423	14,05	0,76	7,58	Austenit/Austenite: 23%
4	802	9,55	0,75	7,20	Austenit/Austenite: 93%
	713	9,79	0,73	6,80	

Dla zawartości niklu w żelwie wynoszącej 24% uzyskano zupełnie austenityczną osnowę. Zawartość niklu w żelwie determinuje rodzaj jego osnowy. Przy niskich jego zawartościach, występuje osnowa perlityczna, przy wyższych austenityczna.

W tabeli 4 przedstawiono wyniki pomiarów twardości i mikrotwardości żeliwa sferoidalnego.

With the nickel content of 24%, a fully austenitic matrix was obtained. Nickel content in cast iron determines the type of cast iron matrix. Low content of this element produces a pearlitic matrix, while high content gives an austenitic matrix.

Table 4 presents the results of measurements of the hardness and microhardness of ductile iron.

Tabela 4. Wyniki pomiarów twardości i mikrotwardości żeliwa sferoidalnego
Table 4. The results of measurements of the hardness and microhardness of ductile iron

Numer próbki / Sample No.	$HV_{0,01}$ dla ferrytu / $HV_{0,01}$ for ferrite	$HV_{0,01}$ dla perlitu / $HV_{0,01}$ for pearlite	$HV_{0,01}$ dla martenzytu / $HV_{0,01}$ for martensite	$HV_{0,01}$ dla austenitu szczątkowego / $HV_{0,01}$ for residual austenite	$HV_{0,01}$ dla austenitu / $HV_{0,01}$ for austenite	HV_{30} / HV_{30}
1	229	301	–	–	–	225
2	204	383	–	–	–	238
3	–	–	589	412	–	409
4	–	–	–	–	161	135

4. Analiza wyników

Wyniki badań metalograficznych wykazały, że nikiel przy wysokiej zawartości w żelwie determinuje tworzenie się osnowy austenitycznej, a przy niższych zawartościach – osnowy perlitycznej. Dodatek niklu w ilości 1% spowodował wzrost udziału perlitu z 40% do 60%. Przy dodatku 10% niklu wytworzyła się osnowa martenzytowa z austenitem szczątkowym, co spowodowane było obniżeniem przez nikiel temperatury przemiany eutektoidalnej. Skutkiem obniżenia temperatury przemiany eutektoidalnej było pojawienie się w strukturze austenitu, jednak temperatura M_s pozostała na tyle wysoka, że skutkowało to transformacją części austenitu w martenzyt. W pełni stabilną strukturę

4. Discussion of results

From the results of metallographic examinations it follows that high nickel content in cast iron determines the development of an austenitic matrix, while lower content levels induce the formation of a pearlitic matrix. The addition of nickel in an amount of 1% increases pearlite content from 40% to 60%. With the addition of 10% Ni, a martensitic matrix with residual austenite is formed, and this is mainly due to the presence of nickel reducing the temperature of the eutectoid transformation. A consequence of the reduced temperature of the eutectoid transformation is the appearance of austenite in cast iron structure, but with the M_s temperature remaining at a high level, partial transformation of austenite into martensite

austenityczną uzyskano dla zawartości niklu w żeliwie wynoszącej 24%.

Liczba kulek grafitu przypadająca na jednostkę powierzchni do zawartości niklu wynoszącej 10% maleje, po czym gwałtownie wzrasta przy dodatku tego pierwiastka, wynoszącym 24%, przy czym średnica kulek jest mniejsza. Wartość współczynnika kształtu S zmniejsza się wraz ze wzrostem zawartości niklu w żeliwie.

Twardość żeliwa zwiększa się początkowo wraz ze wzrostem zawartości niklu, ze względu na zwiększony udział perlitu. Dla dodatku niklu wynoszącego 10% zaobserwowano duży przyrost twardości żeliwa z 238 na 409 HV, co związane jest z obecnością martenzytu o dużej twardości. Z kolei najbardziej miękkim składnikiem osnowy jest austenit stopowy, dlatego żeliwo zawierające 24% Ni, o osnowie całkowicie austenitycznej, ma twardość na poziomie zaledwie 135 HV.

5. Wnioski

Analizując wyniki badań, można wysunąć następujące wnioski:

1. W badanym zakresie nikiel zwiększa temperaturę minimalną początku krystalizacji eutektyki grafitowej i jest to zależność liniowa.
2. Nikiel stabilizuje austenit. Przy zawartości niklu wynoszącej 24% osiągnięto całkowicie austenityczną osnowę.
3. Dla niskich zawartości w żeliwie nikiel wykazuje działanie perlitotwórcze. Dla dodatku niklu w ilości 1% wzrasta udział perlitu z 40 do 60%.
4. Dla zawartości niklu wynoszącej 10% w osnowie tworzy się martenzyt, bainit i austenit szczątkowy, wskutek czego znacznie wzrasta twardość żeliwa.

Podziękowania

Badania wykonano w ramach pracy dyplomowej inżynierskiej pod tytułem: „Wpływ niklu na strukturę i właściwości żeliwa sferoidalnego w odlewach cienkościennych”, promotor: dr hab. inż. Marcin Górny, prof. AGH, 2016.

Literatura/References

1. PN-EN 1563:2011: Odlewnictwo – Żeliwo sferoidalne.
2. PN-EN 1564:2011: Odlewnictwo – Żeliwo sferoidalne ausferrytyczne.

occurs. A fully stable austenitic structure is obtained when the nickel content in cast iron amounts to 24%.

Nickel in an amount of up to 10% reduces the graphite nodule count per unit area. This parameter sharply raises with the addition of nickel raising to 24%, but at the cost of smaller nodule diameter. The value of the shape factor S decreases with the nickel content increasing in cast iron.

At the beginning, hardness of cast iron is increasing with the increasing nickel content, and this is due to the growing content of pearlite. For the nickel addition of 10%, a large increase in the hardness of cast iron from 238 to 409 HV has been observed, mainly due to the presence of martensite characterized by high hardness values. In turn, the most soft matrix constituent is alloyed austenite, and this is the reason why cast iron containing 24% Ni and a fully austenitic matrix has the hardness of only 135 HV.

5. Conclusions

Examining the results of the present studies, the following conclusions are drawn:

1. In the examined range of values, nickel raises the minimum temperature of the crystallization of graphite eutectic, and it is a linear relationship.
2. Nickel stabilizes austenite. With the nickel content of 24%, a fully austenitic matrix is obtained.
3. When present in cast iron in small amounts, nickel is a pearlite-forming element. The addition of 1% Ni makes pearlite content increase from 40 to 60%.
4. With the nickel content of 10%, martensite, bainite and residual austenite are formed in the matrix, resulting in a considerably higher hardness of cast iron.

Acknowledgements

The research was carried out as part of the engineer's thesis entitled: "The effect of nickel content on structure and properties of ductile iron in thin-walled castings". Supervisor: Marcin Górny, DSc, PhD, Eng., AGH Prof., 2016.

3. Jura S., Z. Jura. 2001. „Wpływ składu chemicznego i stopnia sferoidyzacji grafitu na własności mechaniczne żeliwa”. *Archives of Foundry Engineering* 1 (1) : 167–174.
4. Rio Tinto Iron & Titanium Inc. 2004. *The Sorelmetal Book of Ductile Iron*.
5. Fraś E. 2013. Żeliwo: Struktura i klasyfikacja. W *Poradnik Odlewnika. Odlewnictwo Współczesne. Tom I – Materiały*, red. Jerzy J. Sobczak, 83–104. Kraków: Wydawnictwo Stowarzyszenia Technicznego Odlewników Polskich.
6. Guzik E. 2013. Żeliwo z grafitem sferoidalnym i wermikularnym. W *Poradnik Odlewnika. Odlewnictwo Współczesne. Tom I – Materiały*, red. Jerzy J. Sobczak, 216–228. Kraków: Wydawnictwo Stowarzyszenia Technicznego Odlewników Polskich.
7. Elkem AS. 2006. *Product Data Sheet Magnesium Ferrosilicon Nodularisers*. Oslo: Foundry Products Division.
8. PN-EN ISO 6507-1:2007 Metale – Pomiar twardości sposobem Vickersa – Część 1: Metoda badań.
9. Fatahalla N., A. AbuEIEzz, M. Semeida. 2009. “C, Si and Ni as alloying elements to vary carbon equivalent of austenitic ductile cast iron: Microstructure and mechanical properties”. *Materials Science and Engineering: A* 504 (1–2) : 81–89.
10. Charoenvilaisiri S., D.M. Stefanescu, R. Ruxanda, T.S. Piwonka. 2002. “Thin Wall Compacted Graphite Iron Castings”. *AFS Transactions* 110 : 1113–1130.