

Alternatywna technologia otrzymywania ausferrytu w żeliwie sferoidalnym

Alternative technology of obtaining ausferrite in the matrix of spheroidal cast iron

Grzegorz Gumienny^{1*}, Barbara Kurowska¹

¹Politechnika Łódzka, Katedra Technologii Materiałowych i Systemów Produkcji, ul. Stefanowskiego 1/15, 90-924 Łódź, Polska

¹Lodz University of Technology, Department of Materials Engineering and Production Systems, ul. Stefanowskiego 1/15, 90-924 Łódź, Poland

*Corresponding author: grzegorz.gumienny@p.lodz.pl

Received: 13.12.2017. Accepted in revised form: 31.03.2018.

© 2018 Instytut Odlewnictwa. All rights reserved.

DOI: 10.7356/ioc.2018.02

Streszczenie

W pracy przedstawiono wybrane zagadnienia z zakresu możliwości otrzymania ausferrytu w żeliwie sferoidalnym bez stosowania obróbki cieplnej odlewów. Osnowa ausferrytyczna zapewnia, poza wysokimi właściwościami mechanicznymi, wysoką odporność na zużycie ścierne i adhezyjne. Proponowana technologia zakłada modyfikację składu chemicznego, w wyniku której możliwe jest otrzymanie osnowy ausferrytycznej, przy studzeniu odlewów w formie. Grafit sferoidalny otrzymano w technologii Inmold. Do oceny procesu krystalizacji oraz przemiany w stanie stałym zastosowano analizę termiczną i derywacyjną (ATD). Przedstawiono badania wpływu wybranych dodatków stopowych dodawanych w różnych proporcjach na mikrostrukturę osnowy żeliwa. Wykazano możliwość otrzymania ausferrytu w odlewach z żeliwa sferoidalnego bez konieczności stosowania obróbki cieplnej. Zbadano odporność żeliwa na zużycie ścierne i adhezyjne.

Słowa kluczowe: żeliwo sferoidalne, ausferryt, ADI, analiza termiczna i derywacyjna (ATD), zużycie ścierne

Abstract

This study presents selected issues regarding the process of obtaining ausferrite from spheroidal cast iron without the application of thermal treatment to the casts. An ausferritic matrix, as well as strong mechanical properties, also ensures high abrasion and adhesion wear resistance. The proposed technology assumes that a change the chemical composition will take place, as a result of which it is possible to obtain an ausferritic matrix when the casts are cooled in the mould. Spheroidal graphite was obtained using Inmold technology. For the evaluation of the process of crystallization and transformation in the as-cast state, a thermal and derivational analysis (ATD) was carried out. Investigations of the effect of selected alloy additions in various proportions on the microstructure of the cast iron matrix were presented. It was demonstrated that it is possible to obtain ausferrite in spheroidal iron casts without the application of thermal treatment. The abrasion and adhesion wear resistance of cast iron was examined.

Keywords: spheroidal cast iron, ausferrite, ADI, thermal and derivational analysis (ATD), abrasion wear

1. Wprowadzenie

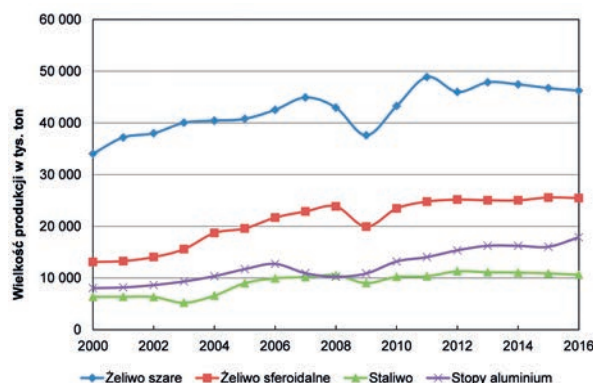
Żeliwo sferoidalne jest materiałem, którego potencjał na rynku wciąż wzrasta, pomimo faktu, że w 2015 roku wyprodukowano 25,6 mln ton odlewów z tego rodzaju tworzywa, tj. o 0,1 mln ton mniej niż w 2014 roku. Dane

1. Introduction

The market potential of spheroidal cast iron is a constantly increasing, despite the fact that in 2015, only 25.6 million tons of casts made of this material were produced (0.1 million tons less than in 2014). The data

przedstawione na [rysunku 1](#) wskazują tendencję wzrostową produkcji odlewów z żeliwa sferoidalnego, przy ciągłej tendencji spadkowej produkcji odlewów z żeliwa szarego. Wynika z tego, że inżynierowie coraz chętniej używają go jako materiału konstrukcyjnego.

shown in [Figure 1](#) points to an increasing tendency towards spheroidal cast iron products, with a sustained drop in the usage of grey cast iron products. This shows that engineers are choosing the former as a construction material more and more often.



Rys. 1. Tendencje w światowej produkcji odlewów w latach 2000–2016

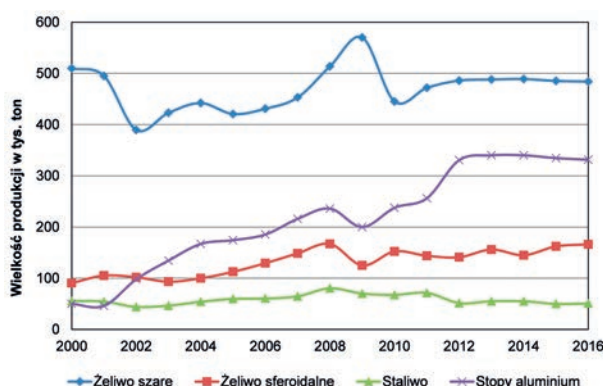
[opracowanie własne wg Modern Casting oraz danych statystycznych Instytutu Odlewnictwa]

Fig. 1. Tendencies of the global cast production in 2000–2016

[own compilation according to Modern Casting and statistical data of Foundry Research Institute]

Materiał ten wykorzystywany jest w niemal wszystkich gałęziach przemysłu, przy czym ponad 25% produkcji trafia do przemysłu motoryzacyjnego. Udział produkcji żeliwa sferoidalnego w ogólnej produkcji odlewów ze stopów żelaza jest traktowany jako wskaźnik nowoczesności przemysłu odlewniczego w danym kraju. W takich krajach, jak np. Francja, Japonia, USA czy Niemcy, stosunek produkcji odlewów z żeliwa sferoidalnego do ogólnej masy produkowanego żeliwa wynosi 45–50%. Dane na [rysunku 2](#) wskazują, że w Polsce wskaźnik ten jest nadal dużo niższy, jednak udział odlewów z żeliwa sferoidalnego w przemyśle krajowym wykazuje od kilku lat tendencję wzrostową, poza spadkiem na przełomie roku 2008 i 2009.

This material is used in nearly all industrial branches, although over 25% of spheroidal cast iron produced is used by the motor industry. The participation of spheroidal cast iron production in the total cast iron production is viewed as an indicator of the modernity of the casting industry in a given country. In countries such as France, Japan, the USA or Germany, the proportion of spheroidal cast iron out of the total mass of cast iron produced is 45–50%. The data in [Figure 2](#) shows that in Poland, this index is still much lower; however, the use of spheroidal iron casts in domestic industry has been increasing in recent years, with the exception of the drop at the end of 2008 and start of 2009.



Rys. 2. Tendencje w polskiej produkcji odlewów ze stopów żelaza w latach 2002–2016

[opracowanie własne wg Modern Casting oraz danych statystycznych Instytutu Odlewnictwa]

Fig. 2. Tendencies in the Polish spheroidal iron cast production in 2002–2016

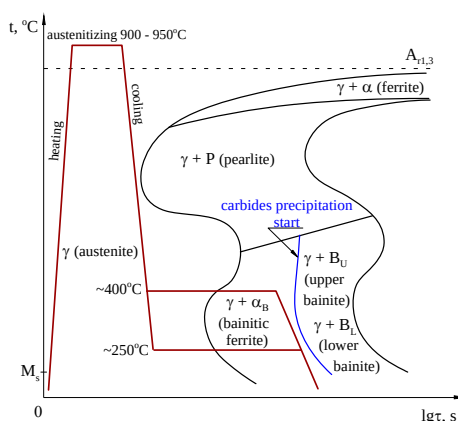
[own compilation according to Modern Casting and statistical data of Foundry Research institute]

Ujęte w normie PN-EN 1563:2012 żeliwo sferoidalne charakteryzuje się minimalną wytrzymałością na rozciąganie od 350 do 900 MPa, przy minimalnym wydłużeniu odpowiednio od 22 do 2%. Osnowa tego żeliwa zmienia się od ferrytycznej (gatunki EN-GJS-350-22, 400-18, 450-10) do perlitycznej (gatunek EN-GJS-700-2). Istnieje możliwość podwyższenia minimalnej wytrzymałości na rozciąganie do 900 MPa w wyniku obróbki cieplnej odlewów polegającej na ich hartowaniu i odpuszczaniu. Mikrostrukturę osnowy stanowi wówczas martenzyt odpuszczony, ewentualnie bainit.

W związku ze wzrastającymi wymaganiami rynku opracowywane są rodzaje żeliwa sferoidalnego o wyższych właściwościach. Przykładem takiego żeliwa może być żeliwo ADI (*Austempered Ductile Iron* – żeliwo sferoidalne hartowane z przemianą izotermiczną), znane od 1972 r. [1]. Osnowa tego rodzaju żeliwa składa się z mieszaniny wysokowęglowego austenitu oraz ferrytu, zwanej ausferrytem. Otrzymuje się ją w wyniku obróbki cieplnej odlewu polegającej na austenitzacji oraz hartowaniu z wytrzymaniem izotermicznym w zakresie temperatury około 250–400°C [2–5]. Schemat takiego procesu przedstawiono na rysunku 3.

Spheroidal cast iron included in the standard PN-EN 1563:2012 is characterized by a minimal tensile strength of 350 to 900 MPa, with a minimal elongation of 22 to 2% respectively. The matrix of this cast iron changes from ferritic (grades EN-GJS-350-22, 400-18, 450-10) to perlitic (grade EN-GJS-700-2). It is possible to increase the minimal tensile strength to 900 MPa by subjecting the casts to thermal treatment consisting of hardening and tempering. The matrix microstructure is then constituted by tempered martensite or, possibly, bainite.

Due to increasing market requirements, new types of spheroidal cast iron with better mechanical properties are being developed. One such example is ADI (Austempered Ductile Iron – spheroidal cast iron hardened with an isothermal transformation), which has been in use since 1972 [1]. The matrix of this type of cast iron consists of a mixture of high-carbon austenite and ferrite, known as ausferrite. It is obtained as a result of a thermal treatment performed on the casts, consisting of austenization and hardening with isothermal annealing in the temperature range of about 250–400°C [2–5]. A diagram of this process is presented in Figure 3.



Rys. 3. Schemat obróbki cieplnej odlewów z żeliwa zapewniającej otrzymanie ausferrytu

Fig. 3. Diagram of iron cast thermal treatment which produces ausferrite

Czas wytrzymania w temperaturze austenitzacji musi zapewnić całkowitą przemianę składników osnowy w austenit. Wynika stąd, że najkorzystniejszą mikrostrukturą osnowy żeliwa sferoidalnego do otrzymania ausferrytu jest perlit, ponieważ drogi dyfuzji atomów węgla są wtedy najkrótsze. Po całkowitej przemianie osnowy w austenit odlew wyjmuje się z pieca i umieszcza w ośrodku o temperaturze około 250–400°C (często są to kąpiele solne). Szybkie ostudzenie odlewu w zakresie pomiędzy temperaturą austenitzacji a temperaturą wytrzymania izotermicznego pozwala na ominięcie zakresu przemiany austenit → perlit. Umożliwia to otrzymanie przechłodzonego austenitu w zakresie temperatury przemiany bainitycznej i jego częściową przemianę w ferryt. Im wyższa temperatura przemiany izotermicznej, tym większy udział austenitu (do 40%)

The time of annealing at the temperature of austenization must ensure a total transformation of the matrix components into austenite. Therefore, the most advantageous microstructure of a spheroidal cast iron matrix for obtaining ausferrite is pearlite, as the paths of carbon atom diffusion are the shortest. After a total transformation of the matrix into austenite, the cast is removed from the furnace and placed in a medium, at a temperature of about 250–400°C (often salt baths). Rapid cooling of the cast between the austenization temperature and the isothermal annealing temperature makes it possible to skip the temperature range of the austenite → pearlite transformation. As a result, overcooled austenite is obtained in the temperature range of the bainitic transformation and is partially transformed into ferrite. The higher the isothermal transformation temperature, the

i niższe właściwości wytrzymałościowe otrzymanego stopu. Tak otrzymana mieszanina ferrytu i wysoko-węglowego austenitu nosi nazwę ausferrytu górnego. Obniżenie temperatury izotermicznego wytrzymania skutkuje zmniejszeniem udziału austenitu i wzrostem właściwości wytrzymałościowych. Płytki ferrytu przyjmują wówczas bardziej regularny kształt, a ausferryt taki przyjęto nazywać dolnym. Czas izotermicznego wytrzymania powinien być dobrany w taki sposób, aby uniemożliwić wydzielenie się węglików (początek ich wydzielania schematycznie przedstawia niebieska linia na [rys. 3](#)). Po prawidłowo przeprowadzonej obróbce cieplnej otrzymuje się odlew z żeliwa ADI. Przykładową mikrostrukturę takiego rodzaju żeliwa przedstawiono na [rysunku 4](#), natomiast gatunki wg PN-EN 1564:2012 w [tabeli 1](#).

higher the proportion of austenite (up to 40%) and the lower the strength properties of the obtained alloy. The mixture of ferrite and high-carbon austenite obtained in this way is called upper ausferrite. Lowering the isothermal annealing temperature results in a reduction in the proportion of austenite and an increase in strength properties. The ferrite plates assume a more regular shape, and ausferrite of this type is called lower ausferrite. The time of isothermal annealing should be selected in such a way that it is possible to prevent carbide precipitation (the beginning of this process is schematically shown by the blue line in [Fig. 3](#)). After a properly conducted thermal treatment, a cast made of ADI iron is obtained. An exemplary microstructure of this type of cast iron is presented in [Figure 4](#), and the grades according to PN-EN 1564:2012 are listed in [Table 1](#).



Rys. 4. Przykładowa mikrostruktura żeliwa ADI
Fig. 4. Exemplary microstructure of ADI cast iron

Tabela 1. Właściwości mechaniczne żeliwa ADI wg PN-EN 1564:2012
Table 1. Mechanical properties of ADI cast iron according to PN-EN 1564:2012

Oznaczenie materiału / Material denotation		Reprezentatywna grubość ściany / Representative wall thickness <i>t</i> mm	Umowna granica plastyczności / Proof stress <i>R</i> _{p0,2} MPa min.	Wytrzymałość na rozciąganie / Tensile strength <i>R</i> _m MPa min.	Wydłużenie/ Elongation <i>A</i> % min.	Twardość/ Hardness <i>HB</i>
Symbol/Symbol	Numer/ Number					
EN-GJS-800-10 EN-GJS-800-10-RT	5.3400	<i>t</i> ≤ 30	500	800	10	250–310
	5.3401	30 < <i>t</i> ≤ 60		750	6	
		60 < <i>t</i> ≤ 100		720	5	
EN-GJS-900-8	5.3402	<i>t</i> ≤ 30	600	900	8	280–340
		30 < <i>t</i> ≤ 60		850	5	
		60 < <i>t</i> ≤ 100		820	4	
EN-GJS-1050-6	5.3403	<i>t</i> ≤ 30	700	1050	6	320–380
		30 < <i>t</i> ≤ 60		1000	4	
		60 < <i>t</i> ≤ 100		970	3	
EN-GJS-1200-3	5.3404	<i>t</i> ≤ 30	850	1200	3	340–420
		30 < <i>t</i> ≤ 60		1170	2	
		60 < <i>t</i> ≤ 100		1140	1	
EN-GJS-1400-1	5.3405	<i>t</i> ≤ 30	1100	1400	1	380–480
		30 < <i>t</i> ≤ 60 60 < <i>t</i> ≤ 100		Do uzgodnienia między wytwórcą a zamawiającym / To be agreed between the producer and the purchaser		

Z danych przedstawionych w tabeli 1 wynika, że żeliwo ADI charakteryzuje się minimalną wytrzymałością na rozciąganie od 800 do 1400 MPa, przy wydłużeniu odpowiednio od 10 do 1%. Wartości te są właściwe dla odlewów o grubości ściany nieprzekraczającej 30 mm.

Norma PN-EN 1564:2012 przewiduje również dwa gatunki żeliwa odpornego na zużycie abrazyjne o podwyższonej twardości, które pokazano w tabeli 2.

It can be inferred from the data presented in Table 1 that ADI cast iron is characterized by a minimal tensile strength of 800 to 1400 MPa, with an elongation of 10 to 1% respectively. These values are correct for casts with a wall thickness of up to 30 mm.

The standard PN-EN 1564:2012 also includes two types of cast iron of increased hardness which are resistant to abrasion wear, which are listed in Table 2.

Tabela 2. Gatunki żeliwa ADI odporne na zużycie wg PN-EN 1564:2012
Table 2. Types of ADI cast iron resistant to wear according to PN-EN 1564:2012

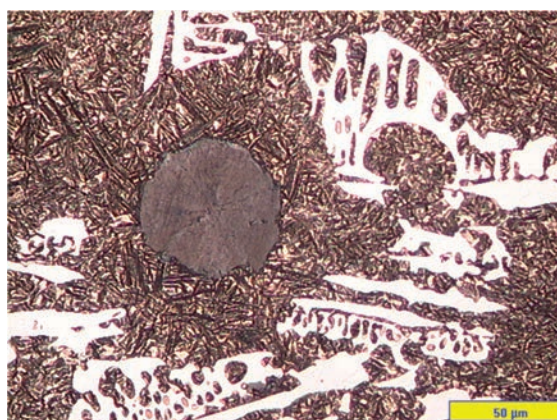
Oznaczenie/Denotation		Twardość Brinella/ Brinell hardness HBW min.	Inne właściwości (tylko informacyjne) / Other properties (for information only)		
Symbol/Symbol	Numer/ Number		$R_{p0,2}$ MPa	R_m MPa	A %
EN-GJS-HB400	5.3406	400	1100	1400	1
EN-GJS-HB450	5.3407	450	1300	1600	–

Z danych przedstawionych w tabeli 2 wynika, że istnieje możliwość podwyższenia minimalnej wytrzymałości na rozciąganie żeliwa ADI do 1600 MPa, jednakże charakteryzuje się wtedy ono znaczną kruchością.

Doskonałe właściwości żeliwa ADI skłaniają naukowców od wielu lat do opracowywania jego nowych odmian. Najbardziej znaną jest żeliwo CADi (Carbide Austempered Ductile Iron – żeliwo sferoidalne z węglnikami hartowane z przemianą izotermiczną), produkowane od 1991 roku. Jego pierwszym użytkowym zastosowaniem były elementy maszyny rolniczej [6]. Materiał ten charakteryzuje się podwyższoną, w stosunku do żeliwa ADI, odpornością na zużycie ściernie w wyniku występowania w jego mikrostrukturze węglików. Jego mikrostrukturę pokazano na rysunku 5.

It can be inferred from the data presented in Table 2 that it is possible to increase the minimal tensile strength of ADI cast iron to 1600 MPa; however, it is then characterized by significant brittleness.

For many years, the excellent properties of ADI cast iron have encouraged scientists to develop new types. The most popular of these is CADi (Carbide Austempered Ductile Iron – spheroidal cast iron with carbides hardened with an isothermal transformation), produced since 1991, the first practical application of which was in the components of an agricultural machine [6]. This material is characterized by elevated abrasion wear resistance relative to ADI cast iron, owing to the presence of carbides in its microstructure, as shown in Figure 5.



Rys. 5. Mikrostruktura żeliwa CADi (Carbide Austempered Ductile Iron): grafit kulkowy, ausferyt, węgliki [7]
Fig. 5. Microstructure of CADi (Carbide Austempered Ductile Iron): nodular graphite, ausferrite, carbides [7]

Poza tym istnieją także, praktycznie nieznane w Polsce, odmiany żeliwa ADI, takie jak [7]:

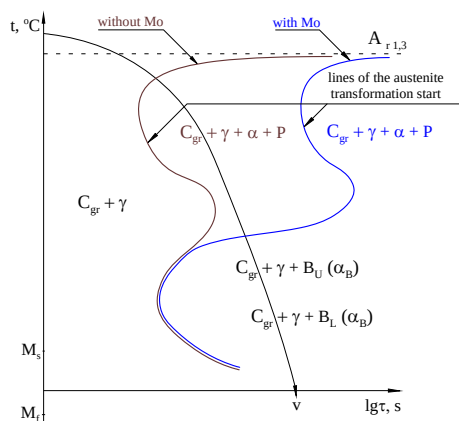
Also, there are other types of ADI cast iron which are almost unknown in Poland, such as [7]:

- FADI (*Ferritic – Ausferritic Austempered Ductile Iron*) – żeliwo sferoidalne z ferrytem przedeutektoidalnym hartowane izotermicznie),
- LC ADI (*Low Carbon Austempered Ductile Iron*) – niskowęglowe żeliwo sferoidalne hartowane izotermicznie,
- MADi (*Machinable Austempered Ductile Iron*) – żeliwo sferoidalne hartowane izotermicznie obrabialne mechanicznie po obróbce cieplnej,
- MarADI (*Martensitic Austempered Ductile Iron*) – żeliwo sferoidalne z odpuszczonym martenzytem hartowane izotermicznie.
- FADI (*Ferritic – Ausferritic Austempered Ductile Iron*) – sferoidal cast iron with hypereutectoid ferrite, isothermally hardened),
- LC ADI (*Low Carbon Austempered Ductile Iron*) – low-carbon spheroidal cast iron, isothermally hardened,
- MADi (*Machinable Austempered Ductile Iron*) – spheroidal cast iron, isothermally hardened and mechanically treated after thermal processing,
- MarADI (*Martensitic Austempered Ductile Iron*) – spheroidal cast iron with tempered martensite, isothermally hardened.

Produkcja żeliwa ADI nastręcza jednakże problemy, takie jak:

The production of ADI cast iron is, however, problematic, due to the following:

- konieczność stosowania obróbki cieplnej odlewów,
- kąpiele solne stosowane do izotermicznego hartowania żeliwa są szkodliwe dla środowiska. Ze względu na trudności w utylizacji tego rodzaju mediów hartowniczych należy dążyć do wytwarzania odlewów z żeliwa o takiej mikrostrukturze jak żeliwo ADI w sposób bardziej przyjazny środowisku,
- otrzymywanie niestopowego żeliwa ADI tylko w odlewach o grubości ściany do około 8 mm. Powyżej tej wartości konieczne jest wprowadzenie dodatków stopowych zwiększających trwałość austenitu [8].
- It is necessary to subject the casts to thermal treatment,
- The salt baths used for the isothermal hardening of cast iron are harmful for the environment. Due to the problems associated with this type of hardening media, it is advisable to aim to produce casts made of iron of a similar microstructure to that of ADI, in a more environment-friendly manner,
- The non-alloy ADI cast iron is obtained only in casts with a wall thickness of up to about 8 mm. Above that value, it is necessary to introduce alloy additions to increase the austenite's durability [8].



Rys. 6. Schemat wpływu Mo na przebieg krzywych początku przemiany austenitu na wykresie CTP żeliwa sferoidalnego
Fig. 6. Schematically shown effect of Mo on the course of the curves of the austenite transformation beginning in the CTP spheroidal cast iron diagram

Istnieje jednakże alternatywny sposób otrzymywania ausferrytu w osnowie żeliwa poprzez modyfikację jego składu chemicznego. Badania prowadzone od 2009 r. w Katedrze Technologii Materiałowych i Systemów Pro-

There is, however, an alternative way to obtain ausferrite in a cast iron matrix, i.e. through a modification of its chemical composition. Research conducted since 2009 at the Department of Materials Engineering and

dukcji Politechniki Łódzkiej wykazały możliwość otrzymania ausferrytycznej osnowy żeliwa sferoidalnego przy studzeniu odlewów w formie w wyniku wspólnego wprowadzenia molibdenu oraz niklu lub miedzi. Możliwe jest to w wyniku charakterystycznego oddziaływania Mo na kinetykę rozpadu austenitu. Schemat tego oddziaływania przedstawiono na [rysunku 6](#).

Z danych przedstawionych na [rysunku 6](#) wynika, że molibden istotnie zwiększa trwałość austenitu w zakresie przemiany perlitycznej, natomiast nie ma większego wpływu na jego trwałość w zakresie przemiany bainitycznej. W związku z tym przy studzeniu odlewu z prędkością „v” w żeliwie bez dodatku Mo austenit ulegnie przemianie w perlit, natomiast w żeliwie zawierającym Mo – w ausferryt. W celu całkowitego wyeliminowania z osnowy wydzieleni ferrytu bądź perlitu wprowadza się do żeliwa wspólnie z molibdenem nikiel lub miedź. W celu regulowania udziału powierzchniowego węglików można również wprowadzać niewielkie ilości chromu.

2. Metoda badań

Żeliwo wytapiano w piecu elektrycznym indukcyjnym Elkon PI30 o pojemności tygla 30 kg. Jako wsadu używano surówki specjalnej o obniżonym stężeniu siarki i fosforu. Do regulowania stężenia Si i Mn do pieca wprowadzano żelazokrzem oraz żelazomangan. Jako dodatki stopowe stosowano technicznie czyste Mo, Ni, Cu oraz Cr. Grafit kulkowy w żeliwie uzyskiwano w technologii Inmold, z wykorzystaniem zaprawy magnezowej Lamet® 5504 firmy Elkem o składzie chemicznym przedstawionym w [tabeli 3](#).

Production Systems of Lodz University of Technology has demonstrated the possibility of obtaining an ausferritic matrix of spheroidal cast iron by cooling the casts in the mould, as a result of simultaneous introduction of molybdenum and nickel or copper. This is possible due to the characteristic impact of Mo on the kinetics of austenite decomposition. A diagram of this impact has been presented in [Figure 6](#).

It can be inferred from the data presented in [Figure 6](#) that molybdenum significantly increases the durability of austenite during perlitic transformation, whereas it has no considerable effect on its durability during bainitic transformation. Therefore, when the cast is cooled at the velocity „v” in cast iron without Mo addition, the austenite will undergo a transformation into pearlite, whereas in cast iron containing Mo – into ausferrite. In order to completely eliminate the ferrite precipitations from the matrix, nickel or copper are introduced into the cast iron alongside molybdenum. To regulate the carbides' surface fraction, small amounts of chromium can also be introduced.

2. Test methodology

Cast iron was melted in an electric induction furnace Elkon PI30 with the crucible capacity of 30 kg. Special pig iron with a lowered concentration of sulphur and phosphorus was used as the charge. In order to regulate the Si and Mn concentration, ferrosilicon and ferromanganese were introduced into the furnace. Technically purified Mo, Ni, Cu and Cr were used as the alloy additions. Nodular graphite in the cast iron was obtained using Inmold technology, with the application of the manganese master alloy Lamet® 5504 by Elkem, of the chemical composition presented in [Table 3](#).

Tabela 3. Skład chemiczny zaprawy sferoidyzująco-modyfikującej
Table 3. Chemical composition of the spheroidizing and modifying master alloy

Skład chemiczny, % wag. / Chemical composition, % wt.					
Si	Mg	Ca	La	Al	Fe
44–48	5–6	0,4–0,6	0,25–0,40	0,8–1,2	reszta/residue

Na [rysunku 7](#) przedstawiono schemat układu wlewowego wraz z odlewem próbnym w kształcie próby schodkowej o grubości ściany: 3, 6, 12, 24 mm.

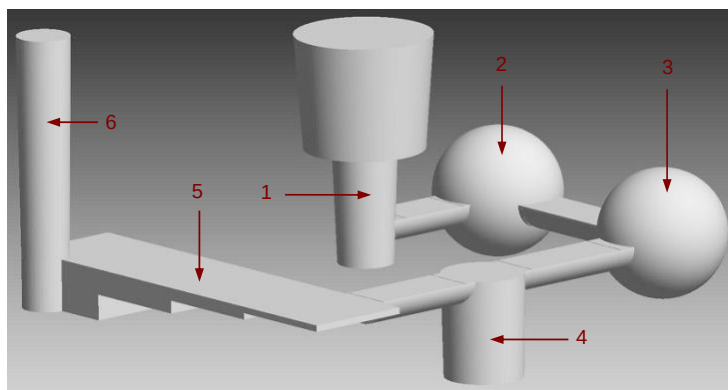
Zaprawę sferoidyzująco-modyfikującą umieszczano w komorze reakcyjnej (2), znajdującej się w układzie wlewowym za wlewem głównym (1). Za komorą reakcyjną znajdowała się komora mieszania (3), która umożliwiała dokładne rozpuszczenie się zaprawy i zapewniała duży uzysk magnezu. Komora reakcyjna i mieszania miały kształt kuli, najkorzystniejszy ze względu na uzysk magnezu i kształt grafitu [9]. Za komorą mieszania umieszczono komorę kontrolną (4).

[Figure 7](#) shows a plan of the gating system together with a step-shaped test cast, with wall thicknesses of: 3, 6, 12, 24 mm.

The spheroidizing and modifying master alloy was placed in the reaction chamber (2), located in the gating system behind the pouring gate (1). Behind the reaction chamber, a mixing chamber was located (3), which enabled a thorough dissolution of the master alloy and ensured a high yield of magnesium. The reaction and mixing chambers were spherical in shape, which is the most advantageous with respect to the yield of magnesium and the shape of graphite [9]. Behind the mix-

W jej środku cieplnym znajdował się termoelement PtRh10-Pt w osłonce z rurki kwarcowej (6), służący do pomiaru temperatury stygnącego i krystalizującego żeliwa. Termoelement połączony był przewodem kompensacyjnym z przetwornikiem U/f, a ten z komputerem. Umożliwiło to rejestrację krzywych analizy termicznej i derywacyjnej (ATD). Następnie żeliwo wypełniało wnękę (5) w kształcie schodka odwzorowującą odlew próbny o grubości ściany: 3, 6, 12 i 24 mm. Kształt odlewu umożliwił zbadanie wpływu grubości ścianki na mikrostrukturę żeliwa.

ing chamber, a control chamber was placed (4). In its heating centre, a thermocouple PtRh10-Pt in a quartz tube shield was located (6) and used to measure the temperature of the cooling and crystallizing cast iron. The thermocouple was connected to a U/f converter with a compensating lead, and the converter was connected to a computer. This made it possible to record the curves of the thermal and derivational analysis (ATD). Next, the cast iron filled the cavity (5) in the shape of a step, which represented the test cast with wall thicknesses of: 3, 6, 12 and 24 mm. The shape of the cast made it possible to examine the effect of the wall thickness on the cast iron's microstructure.



Rys. 7. Schemat rozmieszczenia elementów w formie: 1 – wlew główny, 2 – komora reakcyjna, 3 – komora mieszania, 4 – komora kontrolna, 5 – odlew próbny w kształcie schodka, 6 – przelew

Fig. 7. Schematic of the component distribution in the mould: 1 – pouring gate, 2 – reaction chamber, 3 – mixing chamber, 4 – control chamber, 5 – step-shaped test cast, 6 – overflow

Mikrostrukturę żeliwa badano na zglądach trawionych nitaliem przy powiększeniu $\times 500$ na mikroskopie metalograficznym Eclipse MA200 firmy Nikon.

Twardość żeliwa badano uniwersalnym twardościomierzem HPO-2500 dla warunków 2,5/187,5/30.

Badania trybologiczne wykonano na stanowisku doświadczalnym, którego schemat pokazano na [rysunku 8](#).

Wymiary próbek do badań odporności na zużycie ściernie i adhezyjne żeliwa pokazano na [rysunku 9](#).

Warunki przeprowadzenia prób były następujące:

- obciążenie próbki na papier ścierny i przeciwpróbkę stalową: $F = 98,0665 \text{ N}$,
- powierzchnia ścierna próbki: $S = 268,8 \text{ mm}^2$,
- nacisk jednostkowy próbki:

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{98,0665 \text{ N}}{268,8 \text{ mm}^2} = 0,36 \text{ MPa} \quad (1)$$

- prędkość obrotowa: $\omega = 75 \text{ obr./min}$.

The microstructure of the cast iron was examined on microsections etched with nital with the magnification of $\times 500$ on a metallographic microscope Eclipse MA200 by Nikon.

The cast iron's hardness was tested on a universal hardness tester HPO-2500 for the conditions 2.5/187.5/30.

The tribological examinations were performed on a test bench schematically presented in [Figure 8](#).

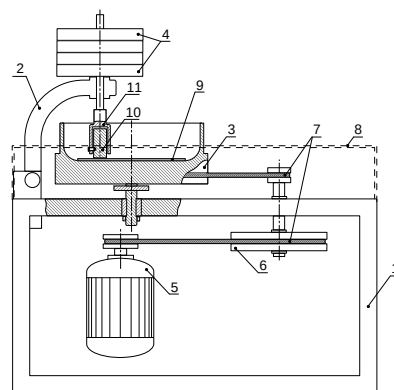
The dimensions of the samples used for the tests of the abrasion and adhesion wear resistance of cast iron are presented in [Figure 9](#).

The following test conditions were applied:

- sample load onto abrasive paper and a steel counterspecimen: $F = 98.0665 \text{ N}$,
- sample abrasion surface: $S = 268.8 \text{ mm}^2$,
- sample unit pressure:

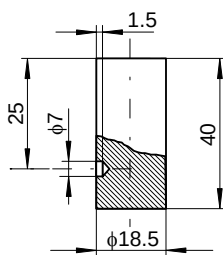
$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{98.0665 \text{ N}}{268.8 \text{ mm}^2} = 0.36 \text{ MPa} \quad (1)$$

- rotational speed: $\omega = 75 \text{ rpm}$.



Rys. 8. Schemat stanowiska do badań zużycia ściernego i adhezyjnego: 1 – obudowa, 2 – dźwignia ruchoma, 3 – misa obrotowa, 4 – obciążenie, 5 – silnik, 6 – koło zamachowe, 7 – pasy napędowe, 8 – pokrywa, 9 – papier ścierny lub przeciwpróbka, 10 – próbka, 11 – uchwyt próbki

Fig. 8. Schematic of the bench for testing the abrasion and adhesion wear: 1 – casing, 2 – movable lever, 3 – revolving pan, 4 – load, 5 – engine, 6 – flywheel, 7 – driving belts, 8 – cover, 9 – abrasive paper or counterspecimen, 10 – sample, 11 – sample holder



Rys. 9. Wymiary próbki do badań odporności na zużycie ściernie i adhezyjne

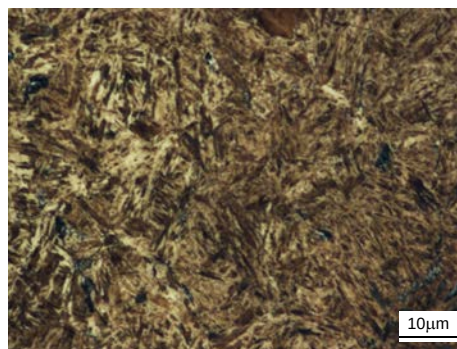
Fig. 9. Dimensions of the sample for abrasion and adhesion wear resistance tests

Do badań odporności żeliwa na zużycie ściernie stosowano papier ścierny o ziarnistości 40.

Do badań odporności żeliwa na zużycie adhezyjne wykorzystano przeciwpróbkę w postaci tarczy o średnicy $\phi 100$ mm i grubości 10 mm wykonane ze stali niestopowej do ulepszania cieplnego C55 poddanej hartowaniu i niskiemu odpuszczaniu. Jej mikrostrukturę przedstawiono na rysunku 10.

Abrasive paper with a granularity of 40 was used to test the cast iron's resistance to abrasion wear.

The adhesion wear resistance tests involved the application of a counterspecimen in the form of a disk, $\phi 100$ mm in diameter and 10 mm thick, made of non-alloy steel for thermal toughening C55, subjected to hardening and low tempering. Its microstructure is shown in Figure 10.



Rys. 10. Mikrostruktura przeciwpróbki po hartowaniu i niskim odpuszczaniu: martenzyt niskoodpuszczony, austenit szczątkowy, wtrącenia niemetalowe

Fig. 10. Microstructure of the counterspecimen after hardening and low tempering: low-tempered martensite, residual austenite, non-metallic inclusions

Odporność na zużycie adhezyjne badano w warunkach tarcia suchego oraz przy smarowaniu olejem ESSO Spartan EP 150.

Żeliwo ADI wykorzystane do badań odporności na zużycie ścierne i adhezyjne poddane było wytrzymałości izotermicznemu w temperaturze 400°C, w związku z czym jego podstawę stanowił ausferyt górny.

Odporność na zużycie ścierne i adhezyjne mierzono ubytkiem masy próbki na elektronicznej wadze pomiarowej typu „Sartorius CP 224S-OCE” z dokładnością 0,0001 g (błąd pomiarowy $\pm 0,0003$ g).

Adhesion wear resistance was examined under dry friction conditions and after lubrication with ESSO Spartan EP 150 oil.

The ADI cast iron used for the abrasion and adhesion wear resistance tests underwent isothermal annealing at 400°C, so its matrix was constituted by upper ausferrite.

The resistance to abrasion and adhesion wear was measured as mass loss of the sample, using Sartorius CP 224S-OCE electronic scales with an accuracy of 0.0001 g (measuring error ± 0.0003 g).

3. Wyniki badań

Zakres składu chemicznego badanego żeliwa pokazano w tabeli 4.

3. Test results

The scope of the chemical composition of the examined cast iron is shown in Table 4.

Tabela 4. Skład chemiczny badanego żeliwa
Table 4. Chemical composition of the examined cast iron

Skład chemiczny, % wag. / Chemical composition, % wt.						
C	Si	Mn	Mo	Cu	Ni	Cr
3,27–3,91	2,13–2,87	0,05–0,35	1,41–2,13	0,02–1,74	0,02–2,57	0,01–0,51

Średnie stężenie P i S wynosiło odpowiednio 0,04% i 0,01%. Stężenie Mg w odlawach próbnych zawierało się w zakresie 0,05–0,08%.

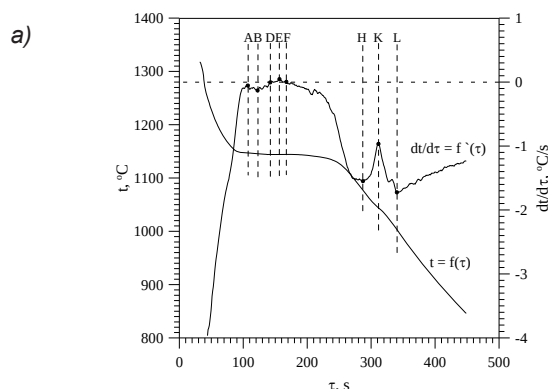
W każdym badanym żeliwie występował wspólnie molibden z niklem bądź z miedzią. Chrom wprowadzano do wybranych wytopów z żeliwa zawierającego Cu, głównie w celu regulowania udziału powierzchniowego węglików.

Krzywe ATD żeliwa sferoidalnego ausferytycznego zawierającego około 2% Mo oraz 1% Ni przedstawiono na rysunku 11(a,b).

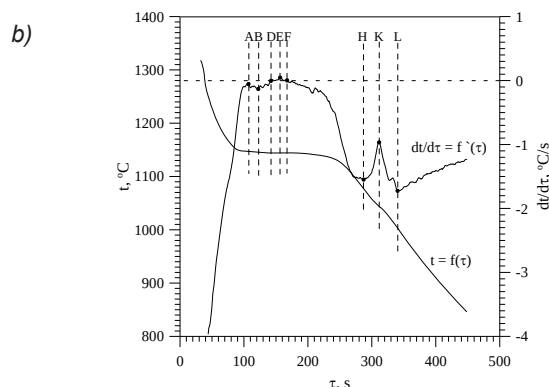
The mean concentration of P and S was 0.04% and 0.01% respectively. The concentration of Mg in the test casts was ranged from 0.05–0.08%.

In each examined cast iron sample, molybdenum alongside nickel or copper was present. Chromium was introduced into selected melts of cast iron containing Cu, mainly in order to regulate the surface fraction of carbides.

The ATD curves of ausferritic spheroidal cast iron containing about 2% Mo and 1% Ni are presented in Figure 11(a,b).



Punkt/Point	τ , s	t , °C	$dt/d\tau$, °C/s
A	107	1147	-0,05
B	122	1145	0,13
D	142	1144	—
E	157	1144	0,05
F	167	1144	—
H	287	1077	-1,55
K	311	1044	-0,97
L	340	1003	-1,72



α_B – zakres przemiany austenit → ferryt / range of the austenite → ferrite transformation,

α_{Bs} – temperatura początku przemiany austenit → ferryt / temperature of the beginning of the austenite → ferrite transformation,

α_{Bf} – temperatura końca przemiany austenit → ferryt / temperature of the end of the austenite → ferrite transformation

Rys. 11(a,b). Krzywe ATD żeliwa sferoidalnego ausferrytycznego zawierającego około 2% Mo i 1% Ni

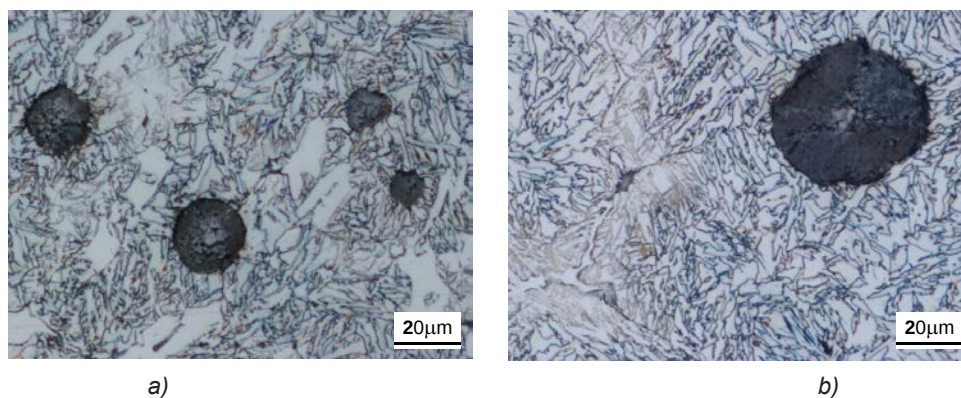
Fig. 11(a,b). ATD curves for ausferritic spheroidal cast iron containing about 2% Mo and 1% Ni

Z rysunku 11a wynika, że na krzywej derywacyjnej $dt/d\tau = f'(\tau)$ występują trzy efekty cieplne. Krystalizacja rozpoczyna się od utworzenia zarodków austenitu i ich następnym wzroście, co jest widoczne w postaci efektu cieplnego AB. Następnie, w zakresie temperatury 1145–1077°C, krystalizuje eutektyka austenit + grafit sferoidalny (efekt cieplny BDEFH). Węglik tworzą się pod koniec procesu krystalizacji na skutek wzbogacenia ostatnich porcji ciekłego żeliwa w molibden. Na krzywej krystalizacji jest to widoczne w postaci efektu cieplnego HKL. Żeliwo kończy krystalizację w temperaturze 1003°C. Na rysunku 11b widoczny jest efekt cieplny od przemiany w stan stały. Zachodzi on w temperaturze około 570–340°C. Pochodzi od przemiany austenitu w ferryt.

Na rysunku 12(a,b) przedstawiono mikrostrukturę żeliwa sferoidalnego ausferrytycznego zawierającego Mo i Ni w odlewie o grubości ściany: a) 3 mm, b) 24 mm.

It can be inferred from Figure 11a that there are three thermal effects on the derivation curve $dt/d\tau = f'(\tau)$. Crystallization begins with the creation of austenite nuclei and their growth, which is evident from the thermal effect AB. Next, in the temperature range of 1145–1077°C, crystallization of the austenite + spheroidal graphite eutectic (thermal effect BDEFH) can be observed. The carbides are formed towards the end of the crystallization process, as a result of the last remnants of liquid cast iron being enriched with molybdenum. It is possible to see this on the crystallization curve in the form of the thermal effect HKL. Cast iron completes its crystallization at 1003°C. Figure 11b shows the visible thermal effect of the transformation in the solid state. This occurs at about 570–340°C and originates from the transformation of austenite into ferrite.

Figure 12(a,b) shows the microstructure of the ausferritic spheroidal cast iron containing Mo and Ni in the cast with wall thicknesses of: a) 3 mm, b) 24 mm.



Rys. 12(a,b). Mikrostruktura żeliwa sferoidalnego ausferrytycznego zawierającego około 2% Mo i 1% Ni: grafit kulkowy, ausferryt, węgliki

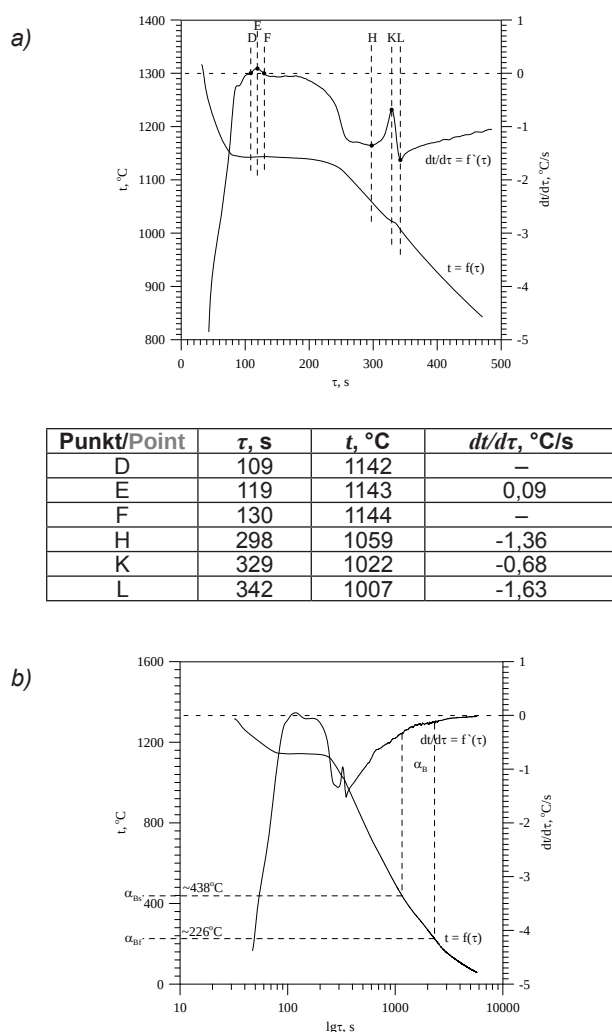
Fig. 12(a,b). Microstructure of ausferritic spheroidal cast iron containing about 2% Mo and 1% Ni: nodular graphite, ausferrite, carbides

Z rysunku 12(a,b) wynika, że wspólne wprowadzenie do żeliwa dodatku molibdenu i niklu umożliwiło otrzymanie w osnowie tego materiału ausferrytu bez konieczności stosowania obróbki cieplnej odlewów. W odlewach cienkościennych (rys. 12a) występuje większy udział powierzchniowy węglików w porównaniu do odlewów grubościennych (rys. 12b). Udział powierzchniowy węglików można regulować stężeniem molibdenu i niklu. Otrzymana mikrostruktura jest konsekwencją procesu krystalizacji i przemiany w stanie stałym pokazanych na rysunku 11(a,b).

Rysunek 13(a,b) przedstawia krzywe ATD żeliwa sferoidalnego ausferrytycznego zawierającego około 1,5% Mo, 1,5% Cu oraz 0,5% Cr.

It can be inferred from Figure 12(a,b) that introducing molybdenum in combination with nickel made it possible to obtain ausferrite in the matrix of this material, without the necessity of thermal treatment. In the thin-walled casts (Fig. 12a), the surface fraction of carbides is higher than that in the thick-walled casts (Fig. 12b). The surface fraction of carbides can be regulated with the concentration of molybdenum and nickel. The obtained microstructure is a consequence of the crystallization process and the transformation in the solid state, shown in Figure 11(a,b).

Figure 13(a,b) presents the ATD curves of ausferritic spheroidal cast iron containing about 1.5% Mo, 1.5% Cu and 0.5% Cr.



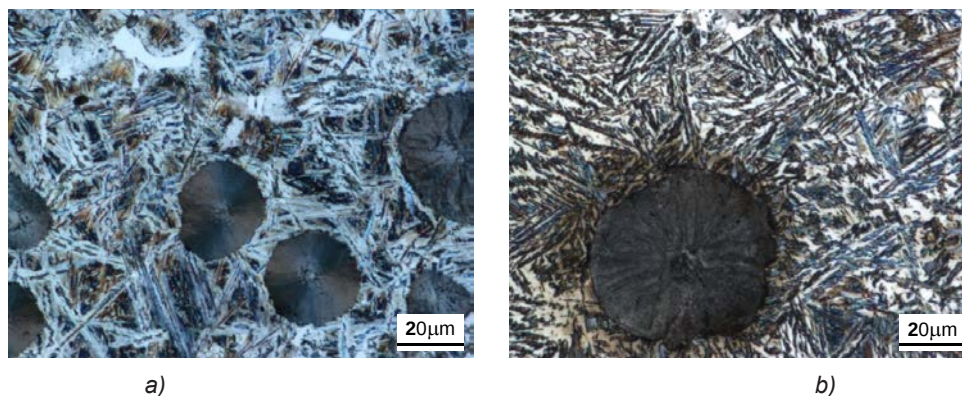
Rys. 13(a,b). Krzywe ATD żeliwa sferoidalnego ausferrytycznego zawierającego około 1,5% Mo, 1,5% Cu i 0,5% Cr
Fig. 13(a,b). ATD curves of ausferritic spheroidal cast iron containing about 1.5% Mo, 1.5% Cu and 0.5% Cr

Z rysunku 13a wynika, że na krzywej derywacyjnej brak jest efektu cieplnego od krystalizacji fazy pierwotnej. W związku z tym żeliwo rozpoczyna krystalizację od przemiany cieczy w eutektykę grafitową globularną (efekt cieplny DEFH). Podobnie, jak w przypadku żeliwa z dodatkiem Ni, ostatnie porcje cieczy krystalizują

It can be inferred from Figure 13a that there is no thermal effect from the primary phase crystallization to be observed on the derivation curve. The cast iron begins its crystallization with a transformation of the liquid into globular graphite eutectic (thermal effect DEFH). Similarly to the case of the cast iron with the Ni addition,

ją według układu metastabilnego, tworząc węgliki po granicach ziaren eutektycznych (efekt cieplny HKL). Temperatura końca krystalizacji tego rodzaju żeliwa jest nieznacznie niższa w porównaniu do żeliwa zawierającego Mo oraz Ni. Na [rysunku 13b](#) widoczny jest niewielki efekt cieplny od przemiany w stanie stałym. Zachodzi on w zakresie temperatury około 438–226°C, a więc znacznie niższej niż w przypadku żeliwa zawierającego nikiel ([rys. 11b](#)).

Na [rysunku 14\(a,b\)](#) przedstawiono mikrostrukturę żeliwa sferoidalnego ausferrytycznego zawierającego Mo, Cu oraz Cr w odlewie o grubości ściany: a) 3 mm, b) 24 mm.



Rys. 14(a,b). Mikrostruktura żeliwa sferoidalnego ausferrytycznego zawierającego około 1,5% Mo, 1,5% Cu i 0,5% Cr: grafit kulkowy, ausferryt, węgliki

Fig. 14(a,b). Microstructure of ausferritic spheroidal cast iron containing about 1.5% Mo, 1.5% Cu and 0.5% Cr: nodular graphite, ausferrite, carbides

Z [rysunku 14\(a,b\)](#) wynika, że dodatek Mo, Cu i Cr umożliwił otrzymanie ausferrytu w osnowie żeliwa sferoidalnego bez konieczności stosowania obróbki cieplnej odlewu. Morfologia płytek ferrytu jest odmienna w porównaniu z żeliwem z dodatkiem niklu ([rys. 12a,b](#)). Spowodowane jest to najprawdopodobniej wyraźnie niższą temperaturą przemiany $\gamma \rightarrow \alpha_B$.

Badaniom odporności na zużycie ścierne i adhezyjne poddano następujące rodzaje żeliwa sferoidalnego:

- ADI,
- z ausferrytem górnym,
- z ausferrytem górnym i węglkami (o udziale powierzchniowym 5 i 12%),
- z ausferrytem górnym, dolnym i węglkami.

Ostatnie trzy z wymienionych rodzajów żeliwa otrzymywano bez stosowania obróbki cieplnej odlewów.

W [tabeli 5](#) przedstawiono twardość badanych rodzajów żeliwa.

the last remnants of liquid crystallize according to the metastable system, forming carbides along the eutectic grain boundaries (thermal effect HKL). The temperature of at which this type of cast iron crystallizes completely is much lower than that of cast iron containing Mo and Ni. [Figure 13b](#) shows a small thermal effect from the transformation in the solid state. It occurs in the temperature range of 438–226°C, which is much lower than that of cast iron containing nickel ([Fig. 11b](#)).

[Figure 14\(a,b\)](#) shows the microstructure of the ausferritic spheroidal cast iron containing Mo, Cu and Cr in casts with wall thicknesses of: a) 3 mm, b) 24 mm.

It can be inferred from [Figure 14\(a,b\)](#) that the addition of Mo, Cu and Cr made it possible to obtain ausferrite in the matrix of spheroidal cast iron without the application of thermal treatment of the cast. The morphology of the ferrite plates is different from that of the cast iron with added nickel ([Fig. 12a,b](#)). This is probably caused by the significantly lower temperature of the transformation $\gamma \rightarrow \alpha_B$.

Abrasion and adhesion wear resistance tests were performed on the following types of spheroidal cast iron:

- ADI,
- with upper ausferrite,
- with upper ausferrite and carbides (percentage of 5 and 12%),
- with upper ausferrite, lower ausferrite and carbides.

The last three mentioned cast iron types were obtained without the application of thermal treatment of the casts.

[Table 5](#) shows the hardness of the examined types of spheroidal cast iron.

Tabela 5. Twardość badanych rodzajów żeliwa sferoidalnego
Table 5. Hardness of the examined spheroidal cast iron types

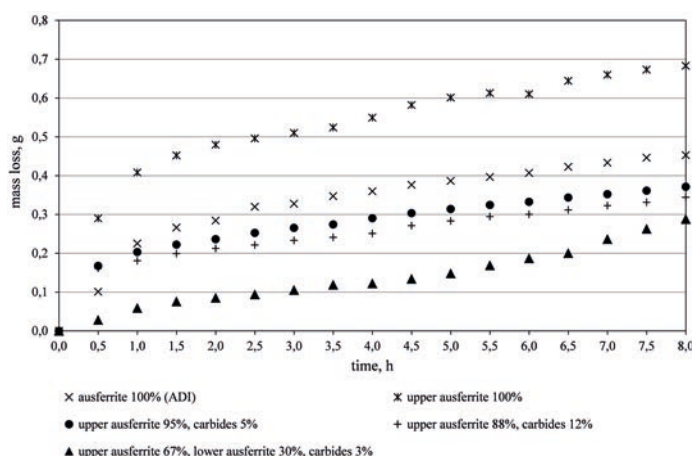
Lp./No.	Rodzaj osnowy żeliwa oraz udział powierzchniowy składników / Type of cast iron matrix and surface fraction of components	Twardość HB / Hardness HB
1	ausferyt 100% (ADI) / ausferrite 100% (ADI)	255
2	ausferyt górny 100% / upper ausferrite 100%	272
3	ausferyt górny 95%, węgliki 5% / upper ausferrite 95%, carbides 5%	293
4	ausferyt górny 88%, węgliki 12% / upper ausferrite 88%, carbides 12%	411
5	ausferyt górny 67%, ausferyt dolny 30%, węgliki 3% / upper ausferrite 67%, lower ausferrite 30%, carbides 3%	477

Z tabeli 5 wynika, że najniższą twardością charakteryzuje się żeliwo ADI. Węgliki w żeliwie ausferytycznym istotnie podnoszą jego twardość aż do 411 jednostek HB. Najwyższą twardość wykazywało żeliwo, w osnowie którego znajdowała się mieszanina ausferrytu górnego i dolnego z niewielkim udziałem węglików.

Rysunek 15 przedstawia wpływ rodzaju osnowy żeliwa sferoidalnego na jego odporność na zużycie ścierne.

It can be inferred from Table 5 that the lowest hardness is demonstrated by the ADI cast iron. The carbides in the ausferritic cast iron significantly raise its hardness, to 411 HB units. The highest hardness was exhibited by the cast iron with a matrix containing a mixture of upper and lower ausferrite with a small percentage of carbides.

Figure 15 presents the effect of the type of matrix in spheroidal cast iron on its abrasion wear resistance.



Rys. 15. Wpływ rodzaju osnowy żeliwa sferoidalnego na jego odporność na zużycie ścierne
Fig. 15. Effect of the type of matrix in spheroidal cast iron on its abrasion wear resistance

Z rysunku 15 wynika, że charakter zużycia badanych rodzajów żeliwa jest zbliżony. Cechuje się on zwiększonym ubytkiem masy w początkowym okresie trwania próby. Wyjątek stanowi żeliwo sferoidalne z węglkami i ausferytem górnym oraz dolnym, które wykazało najmniejszy ubytek masy ze wszystkich rodzajów badanego żeliwa, wynoszący 0,288 g po 8 h badania. Jest on niemal dwukrotnie mniejszy w porównaniu z żeliwem ADI, którego ubytek masy po 8 h próby wyniósł 0,453 g.

Na rysunku 16 pokazano wpływ rodzaju osnowy żeliwa sferoidalnego na jego odporność na zużycie adhezyjne przy współpracy z tarczą hartowaną ze stali C55 w warunkach tarcia suchego.

Z rysunku 16 wynika, że najwyższą odporność na zużycie w badanych warunkach tarcia suchego wykazuje żeliwo sferoidalne o osnowie metalowej składającej się

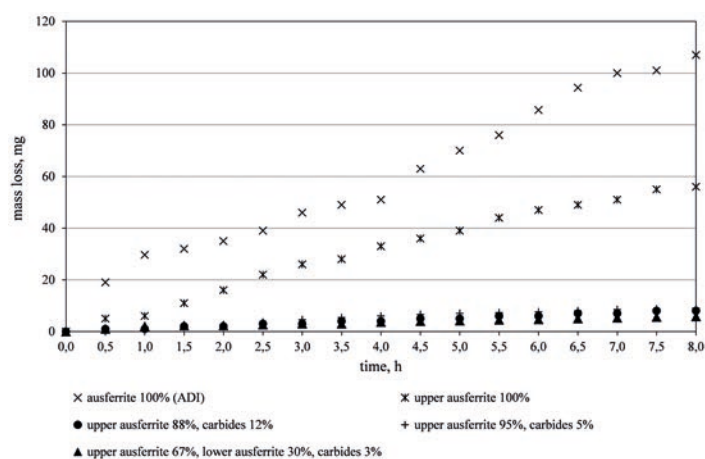
It can be inferred from Figure 15 that the wear resistance properties of the examined types of cast iron are similar, exhibiting an increased mass loss in the initial period of the test duration. The exception is the spheroidal cast iron with carbides and upper and lower ausferrite, which demonstrated the lowest mass loss of all the examined types of cast iron, which was 0.288 g after 8 test hrs. This is almost 50% less than that of the ADI cast iron, the mass loss of which, after 8 test hrs, was 0.453 g.

Figure 16 shows the effect of the type of spheroidal cast iron matrix on its adhesion wear resistance in combination with a hardened disk made of steel C55 in conditions of dry friction.

It can be inferred from Figure 16 that the highest wear resistance under the examined conditions of dry friction

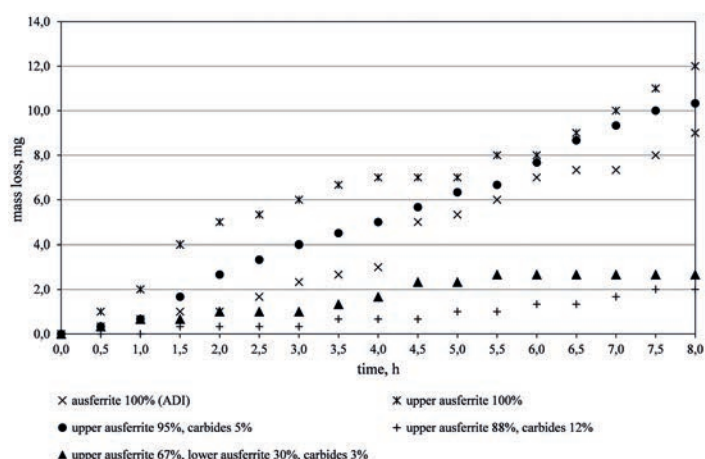
z mieszaniny ausferrytu górnego, dolnego i węglików. Ubytek masy po 8 h tarcia wyniósł 5,8 mg i był ponad osiemnastokrotnie mniejszy w porównaniu z żeliwem ADI. Zbliżoną odporność na zużycie adhezyjne w warunkach tarcia suchego wykazało żeliwo z ausferytem górnym i węglnikami. Żeliwo zawierające 5% węglików wykazało ubytek masy równy 9,2 mg, natomiast żeliwo z 12% udziałem węglików – 8 mg. Żeliwo ADI wykazało najmniejszą odporność na zużycie w badanych warunkach, ubytek masy próbki po 8 h próby wyniósł 107 mg. Żeliwo sferoidalne o osnowie ausferrytu górnego wykazało około dwukrotnie mniejsze zużycie w porównaniu z żeliwem ADI. Jego ubytek masy wyniósł 56 mg po zakończeniu próby.

was exhibited by spheroidal cast with a metal matrix consisting of a mixture of upper and lower ausferrite, as well as carbides. The mass loss after 8 hrs of friction was 5.8 mg, which was more than eighteen times lower than that of ADI cast iron. Similar adhesion wear resistance in conditions of dry friction was demonstrated by cast iron with upper ausferrite and carbides. The cast iron containing 5% carbides showed a mass loss of 9.2 mg, whereas the cast iron with 12% carbides – 8 mg. The ADI cast iron exhibited the lowest wear resistance under the examined conditions, for which the mass loss of the sample after 8 test hrs was 107 mg. The wear of the spheroidal cast iron with an upper ausferrite matrix was around half that of ADI cast iron. Its mass loss was 56 mg at the end of the test.



Rys. 16. Wpływ rodzaju osnowy żeliwa sferoidalnego na jego odporność na zużycie adhezyjne przy współpracy z tarczą hartowaną ze stali C55 w warunkach tarcia suchego

Fig. 16. Effect of the type of matrix in spheroidal cast iron on its adhesion wear resistance in combination with a hardened disk made of steel C55 in the conditions of dry friction



Rys. 17. Wpływ rodzaju osnowy żeliwa sferoidalnego na jego odporność na zużycie adhezyjne przy współpracy z tarczą hartowaną ze stali C55 w warunkach smarowania olejem

Fig. 17. Effect of the type of spheroidal cast iron matrix on its adhesion wear resistance in cooperation with a hardened disk made of steel C55 with oil lubrication

Wpływ rodzaju osnowy żeliwa sferoidalnego na jego odporność na zużycie adhezyjne przy współpracy z tarczą hartowaną ze stali C55 w warunkach smarowania olejem przedstawiono na [rysunku 17](#).

Z [rysunku 17](#) wynika, że maksymalny ubytek masy wszystkich badanych rodzajów żeliwa nie przekracza 12 mg. Najwyższą odporność na zużycie adhezyjne w warunkach smarowania olejem wykazało żeliwo ausferrytyczne o udziale powierzchniowym węglików ok. 12%. Ubytek masy próbki po ośmiu godzinach próby wyniósł 2,0 mg. Wysoką odporność na zużycie wykazało także żeliwo o osnowie złożonej z ausferrytu górnego i dolnego z węglnikami (ubytek masy wyniósł 2,6 mg). Pozostałe rodzaje żeliwa wykazały większy ubytek masy. Wyniósł on od 9 mg dla żeliwa ADI do 12 mg dla żeliwa z ausferrytem górnym i węglnikami w ilości około 5%.

4. Wnioski

Dane przedstawione w pracy pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- na krzywej derywacyjnej żeliwa sferoidalnego ausferrytycznego występuje efekt cieplny od przemiany w stanie stałym,
- wspólne wprowadzenie do żeliwa sferoidalnego dodatku molibdenu oraz niklu bądź miedzi umożliwia otrzymanie mikrostruktury ausferrytycznej bez konieczności stosowania obróbki cieplnej odlewów,
- żeliwo ausferrytyczne otrzymywane bez obróbki cieplnej odlewów charakteryzuje się porównywalną lub większą odpornością na zużycie ścierne i adhezyjne od żeliwa ADI,
- wytwarzanie odlewów z żeliwa sferoidalnego ausferrytycznego w wyniku modyfikacji jego składu chemicznego należy uznać za alternatywny i bardziej przyjazny środowisku w porównaniu do technologii, gdzie konieczne jest przeprowadzenie obróbki cieplnej.

The effect of the type of spheroidal cast iron matrix on its adhesion wear resistance in combination with a hardened disk made of steel C55 with oil lubrication is presented in [Figure 17](#).

[Figure 17](#) shows that the maximum mass loss of all the examined types of cast iron does not exceed 12 mg. The highest adhesion wear resistance with oil lubrication was exhibited by ausferritic cast iron with a carbide surface fraction of about 12%. The mass loss of this sample after 8 test hours was 2.0 mg. High wear resistance was also demonstrated by the cast iron with a matrix composed of upper and lower ausferrite with carbides (mass loss of 2.6 mg). The remaining types of cast iron showed increased mass loss, which ranged from 9 mg for ADI cast iron to 12 mg for cast iron with upper ausferrite and carbides, equivalent to about 5%.

4. Conclusions

The data presented in the study make it possible to draw the following conclusions:

- On the derivation curve of ausferritic spheroidal cast iron, the thermal effect from the transformation is visible in the solid state,
- A simultaneous introduction of molybdenum and nickel or copper into spheroidal cast iron makes it possible to obtain an ausferritic microstructure without applying thermal treatment to the casts,
- Ausferritic cast iron obtained without thermal treatment performed on the casts is characterized by an abrasion and adhesion wear resistance which is comparable to or higher than that of the ADI cast iron,
- Producing casts from ausferritic spheroidal cast iron, through a modification of its chemical composition, should be treated as a more environment-friendly alternative to technology which necessitates the application of thermal treatment.

Literatura/References

1. Keough J.R. 2011. *Austempered Ductile Iron (ADI) – A green alternative*. Pobrane z: <http://www.appliedprocess.com/Custom/Document/GetFile/ab6da2d6-8675-437a-8c82-f32361edf768> [dostęp: 19.11.2017].
2. Guzik E. 2001. *Procesy uszlachetniania żeliwa – wybrane zagadnienia*. Monografia Nr 1M, Katowice: PAN Oddział Katowice, Komisja Odlewnictwa.
3. Bayati H., R. Elliot. 1999. „The concept of an austempered heat treatment processing window”. *International Journal of Cast Metals Research* 11 (5) : 413–417.

4. Daber S., K.S. Ravishankar, P.P. Rao. 2008. „Influence of austenitising temperature on the formation of strain Induced Martensite in Austempered Ductile Iron”. *Journal of Materials Science* 43 (14) : 4929–4937.
5. Larumbe L., E.H. Delgado, M. Alvarez-Vera, P. Pérez Villanueva. 2017. „Forming process using Austempered Ductile Iron (ADI) in an automotive Pitman arm”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 91 (1–4) : 569–575. DOI 10.1007/s00170-016-9771-1.
6. Keough J.R., K.L. Hayrynen. 2000. *Carbide Austempered Ductile Iron (CADi)*. Pobrane z: <http://www.appliedprocess.com/Custom/Document/GetFile/88bc0352-3233-4486-bcf6-136ede30774a> [dostęp: 19.11.2017].
7. Kowalski A., A. Pytel. 2006. „Nowoczesne odmiany żeliwa o strukturze ausferrytycznej”. *Archiwum Odlewnictwa* 6 (18) : 83–88.
8. Pietrowski S. 1997. „Żeliwo sferoidalne o strukturze ferrytu bainitycznego z austenitem lub bainitycznej”. *Archiwum Nauki o Materiałach* 18 (4) : 253–273.
9. Pietrowski S. 2010. „The influence of reaction chamber shape on cast iron spheroidization process In-mold”. *Archives of Foundry Engineering* 10 (1) : 115–122.

