

## Ocena stopnia lejności staliwa aluminiowego

### Assessment of aluminium steel casting fluidity

Krzysztof Jaśkowiec<sup>1</sup>, Waldemar Uhl<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instytut Odlewnictwa, Zakład Stopów Żelaza, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków

<sup>1</sup>Foundry Research Institute, Department of Ferrous Alloys, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków

E-mail: krzysztof.jaskowiec@iod.krakow.pl

#### Streszczenie

W pracy przedstawiono metodykę i wyniki badań lejności staliwa aluminiowego uzyskane w próbie prętowej. Wyniki te porównano z lejnością staliwa chromowo-niklowo-miedziowego badanego w tych samych warunkach. Przedstawiono także przebieg prowadzonych wytopów. Oprócz badań dylatometrycznych wykonano rejestrację krzywej krystalizacji i krzepnięcia, wyznaczając temperaturę likwidus i solidus. Przedstawiono także zdjęcia otrzymanej mikrostruktury badanego staliwa.

**Słowa kluczowe:** Fe-Al, lejność, stopy na osnowie faz międzymetalicznych, zgar, próba prętowa, krzywa krystalizacji i stygnięcia, badanie dylatometryczne

#### Abstract

This text presents the methodology and results of testing aluminium steel casting fluidity obtained in the bar test. These results have been compared with the fluidity of chrome-nickel-copper steel casting tested under the same conditions. The course of performed fusions has also been presented. In addition to dilatometric testing also crystallisation and cooling recording has been performed with determination of the liquidus and solidus temperatures. Photographs of the resulting micro-structure of the tested steel castings are also presented.

**Key words:** Fe-Al, fluidity, intermetallic phase base alloys, dross, bar test, crystallisation and cooling curve, dilatometric test

#### 1. Wstęp

Stop na osnowie Fe-Al posiada liczne zalety, jako przykład można podać odporność na utlenianie, działanie związków siarki czy obniżoną gęstość [1]. Istnieją jednak pewne ograniczenia niepozwalające na wdrożenie tego stopu na szerszą skalę. Lejność i niska plastyczność to jedne z istotniejszych wyzwań, które dotyczą stopów odlewniczych na osnowie Fe-Al [2]. Na lejność staliwa wpływa: lepkość, napięcie powierzchniowe, kształt kryształów i wtrąceń niemetalicznych, błona gazowa, materiał formy itp. Szczególnie istotnymi czynnikami wpływającymi na lejność są: temperatura oraz skład chemiczny. Często zmiana temperatury nawet o 30°C może wywołać znaczną zmianę lejności danego tworzywa.

#### 1. Introduction

The Fe-Al base alloy has many positive characteristics, e.g. resistance to oxidation, reactions with sulphuric compounds or lower density [1]. There are, however, certain limitations prohibiting wider implementation of this alloy. Fluidity and low plasticity are some of the main challenges with regard to Fe-Al base cast alloys [2]. The following factors impact on the fluidity of steel casting: viscosity, surface tension, shape of crystals and non-metallic inclusions, gas film, mould material, etc. Temperature and chemical composition are especially important for fluidity. Frequently, even the 30°C change of temperature may bring about a significant change to the fluidity of a material.

Dla stopu zawierającego Al-21,3% wag.; Mo-0,43% wag.; Zr-0,1% wag.; C-0,03% wag.; B-0,004% wag., który był badany przez W. Szkliniarza i A. Kościelną [3] lejułość zmieniała się z temperaturą tak, jak to przedstawiono w tabeli 1 (wyniki te uzyskano, stosując spiralną próbę lejułości).

For an alloy containing Al-21.3 wt.%; Mo-0.43 wt.%; Zr-0.1 wt.%; C-0.03 wt.%; B-0.004 wt.%, which had been tested by W. Szkliniarz and A. Kościelna [3] the fluidity changed with temperature as presented in Table 1 (The results were obtained with use of a spiral fluidity test).

Tabela 1. Wpływ temperatury zalewania na lejułość  
Table 1. Impact of pouring temperature on fluidity

Temperatura zalewania, °C / Pouring temperature, °C	Średnia lejułość, mm / Average fluidity, mm
1500	460
1550	570
1600	730

Można zauważyć, że wzrost temperatury o 50°C powoduje wzrost lejułości o około 24% przy zmianie temperatury odlewania z 1500°C do 1550°C. W przypadku podniesienia temperatury z 1550°C do 1600°C wzrost lejułości wyniósł 28%. Autorzy, jak i inne źródła, zwracają uwagę na słabą lejułość stopów żelaza o wysokiej zawartości aluminium [3,4].

Wpływ konkretnego pierwiastka stopowego musi być rozpatrywany dla danego stopu żelaza w sposób indywidualny. Ten sam pierwiastek w danym gatunku staliwa zwiększa lejułość, a w innym może ją obniżać. W przypadku staliwa na bazie Fe-Al można domniemywać, że jak dla większości staliw, węgiel poprawia lejułość [5,6].

W żeliwie o dużej zawartości aluminium powstają węgliki  $Al_3C_4$ . Węgliki te w kontakcie z wilgocią zawartą w powietrzu powodują rozpad tego żeliwa. Konieczne staje się stosowanie dodatkowych zabiegów, które ograniczają ten niekorzystny proces lub spowodują wydzielenie węgla w postaci grafitu, względnie bardziej stabilnych węglików. Węgiel, oprócz poprawy lejułości, wpływa pozytywnie na udarność, jak i twardość [2,7]. Badania realizowane przez C.T. Liu i in. [8] wskazują, że dodatek boru wpływa bardzo korzystnie na udarność oraz wydłużenie stopów na osnowie Fe-Al. Dodanie Cr, Zr, Mo, B powoduje podniesienie wytrzymałości i odporności na pełzanie [9].

Elementy wykonane z badanego stopu pracują zazwyczaj w podwyższonej temperaturze, dlatego patenty i prace badawcze często dotyczą komór spalania silnika spalinowego, w których omawiany stop może być na przykład stosowany jako siedzisko zaworu lub elementy wtryskiwacza paliwa. Prowadzone są także próby wykonania tarcz oraz klocków hamulcowych. Zawory ssące i wydechowe, katalizatory oraz kolektory wydechowe są również szczególnie często wskazywane jako elementy docelowe dla tego tworzywa [10]. Elementy pieców, rury oraz zawory, które podczas swojej pracy

It can be seen that a temperature increase of 50°C results in a fluidity increase of ca. 24% with a change of casting temperature from 1500°C to 1550°C. In the case of increasing the temperature from 1550°C to 1600°C, the increase of fluidity amounted to 28%. The authors and other sources point to poor fluidity of iron alloys with a high aluminium content [3,4].

The influence of a specific element in the alloy must be considered individually for a given alloy. The same element in one steel casting type increases its fluidity while it can lower the castability in another. In the case of Fe-Al base steel casting it could be assumed that, like for most steel castings, carbon improves the fluidity [5,6].

In the high aluminium content cast iron there appear  $Al_3C_4$  carbides. These carbides, in contact with atmospheric humidity, result in the degradation of this cast iron. Additional processes need to be employed which limit this negative process or will cause the release of carbon in the form of graphite or possibly other more stable carbides. Carbon, in addition to improving the fluidity, has a positive effect on impact resilience and hardness [2,7]. Research performed by C.T. Liu *et al.* [8] indicate that the addition of boron is highly advantageous for the impact strength and elongation properties of Fe-Al base alloys. Adding Cr, Zr, Mo, B results in increased strength and resistance to creeping [9].

Elements made of the alloy under consideration are usually utilised at increased temperatures and thus the patents and research are frequently related to the combustion chambers in engines where the alloy may be used e.g. as the valve seat or fuel injector elements. Tests are also performed to produce brake discs and pads. Intake and exhaust valves, catalyst converters and exhaust collectors are also often indicated as target elements for this material [10]. Elements of boilers, pipes and valves exposed to aggressive environments during operation are made of this alloy.

narażone są na działanie agresywnego środowiska, wykonano z tego stopu.

Stopy na osnowie faz  $Ti_3Al$ ,  $TiAl$ ,  $NiAl$ ,  $FeAl$ ,  $Fe_3Al$  są wykorzystywane do produkcji elementów silnika odrzutowego, części konstrukcyjnych, zębatek itp. Pod względem ekonomicznym szczególnie wyróżniają się tu stopy na osnowie fazy  $FeAl$ ,  $Fe_3Al$  [11, 12]. Jednak w przypadku topienia w atmosferze powietrza w piecu indukcyjnym znane są informacje o dość dużym zgarze sięgającym do 8% wag. silnie uzależnionym od zawartości aluminium [13].

Jak już wspomniano, w stopach żelaza z aluminium występuje uporządkowany roztwór wtórny na osnowie fazy  $FeAl$  lub  $Fe_3Al$ , który charakteryzuje się odpowiednio siecią B2 lub  $DO_3$ . W przypadku zwiększania temperatury może dojść do powstania nieuporządkowanego roztworu stałego  $\alpha(A2)$  [14, 15].

## 2. Prowadzenie wytopu oraz metodyka badań

Do zimnego pieca wprowadzano materiały wsadowe. Starano się rozmieścić wsad w sposób umożliwiający optymalne topienie wysokotopliwych składników z wsadem aluminium, umieszczając na dnie żelazo armco, na które wprowadzono dodatki stopowe, takie jak: Cr, Zr i Ni. Aluminium dodano w końcowej fazie załadunku jednostki topialnej. W dwóch wytopach zastosowano izolujący żużel наносzony na ciekły metal, który składał się głównie z tlenku wapnia, uprzednio wygrzanego w temperaturze  $150^\circ C$  (w trzecim wytopie nie zastosowano CaO). Kapiel przegrzano do temperatury  $1620^\circ C$ , po czym ściągnięto żużel. Po ustabilizowaniu temperatury na poziomie  $1580^\circ C$ , dodawano Nb, Sb oraz resztę B.

Tabela 2. Skład chemiczny badanego stopu, % wag.

Table 2. Chemical composition of the tested alloy, wt. %

C	Si	Al	Cr	Ni	Sb	Nb	Zr	B	Fe
<0,038	<0,30	13,10–14,30	1,65	0,35	0,08–0,20	0,11	0,05–0,10	0,05	reszta/ bal.

Wykonano trzy wytopy staliwa o zawartości aluminium na poziomie 11,5–14,3% wag., przy całkowitej masie wsadu równej 35 kg dla każdego wytopu. Skład chemiczny odlewów przedstawiono w tabeli 2. Do zalewania form zastosowano każdą przechylną. Przed spustem metalu do formy zalano kokilę miedzianą celem otrzymania próbki do badania składu chemicznego. Każdy z prowadzonych wytopów pozwolił na otrzymanie trzech form próby lejukości o masie 6 kg każda (rys. 1). Formy po wystygnięciu były wybijane, a następnie oznaczano lejukość. Próbę lejukości wykonano w oparciu o normę BN-4051-12:1966 „Badania technologiczne staliwa. Próba lejukości” [16] i publika-

Alloys based on  $Ti_3Al$ ,  $TiAl$ ,  $NiAl$ ,  $FeAl$ ,  $Fe_3Al$  phases are used to build jet engine elements, structural parts, cogs, etc. In this group,  $FeAl$ ,  $Fe_3Al$  base alloys [11, 12] are especially interesting for economical reasons. However, in the case of melting in ambient air in induction furnace, information is known to be found on significant amounts of dross – as high as 8 wt. % and strongly connected with the aluminium content [13].

As already mentioned, in the iron and aluminium alloys there is an orderly secondary solution based on  $FeAl$  or  $Fe_3Al$  phase which is characterised by B2 or  $DO_3$  structures respectively. In the case of increasing the temperature an unordered  $\alpha(A2)$  solid solution may arise [14, 15].

## 2. Fusion process and research methodology

Charge materials were placed in the cold furnace. All possible care was given to distribute the charge material in a manner enabling optimum melt of high fusing ingredients with the aluminium charge by placing armco iron at the bottom, on which the following alloying additives were put: Cr, Zr and Ni. The aluminium was added at the final stage of loading the melting unit. In two of the fusions isolating slag was applied on the liquid metal consisting mostly of calcium oxide that had been preheated at the temperature of  $150^\circ C$  (CaO was not applied in the third fusion). The bath had been overheated to  $1620^\circ C$  and then slag was removed. After stabilizing the temperature at  $1580^\circ C$ , Nb, Sb and the remaining B were added.

Three fusions of steel casting were performed, with aluminium content at the level of 11.5–14.3 wt. % with the total weight of 35 kg for each fusion. The chemical composition of the casts is presented in Table 2. Tilt vat was used for pouring into the moulds. Before the discharge of the metal into the mould, a copper mould was filled to obtain a sample for testing the chemical composition. Each fusion allowed the obtention of three fluidity test casts, each weighing 6 kg (Fig. 1). After cooling, the moulds were removed and then fluidity was determined. The fluidity test was performed as per BN-4051-12:1966 standard “Technology research of steel casting. Fluidity test” [16] and publications [17, 18]

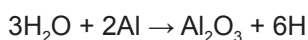
cje [17, 18], przy czym zalanie pręta o danej średnicy na wysokość 200 mm było traktowane jako całkowite wypełnienie wnęki. Formy ceramiczne podgrzewano do temperatury 700°C i przed samym zalaniem wyjmowano z pieca. Dla zapewnienia powtarzalności wyników formę obsypywano piaskiem.



Rys. 1. Forma oraz odlew wykorzystywany do oznaczania lejności  
Fig. 1. Mould and cast used to determine fluidity

Naniesienie wygrzanego CaO powinno w pewnej mierze zabezpieczyć metal przed kontaktem ciekłego staliwa z otoczeniem. Zauważono jednak, że po około 5 minutach warstwa CaO ulegała zanikowi. Braki warstwy osłaniającej metal były uzupełniane. Po zakończeniu wylotu i wystygnięciu pieca na ściankach tygła stwierdzono stosunkowo grubą warstwę białego nalotu.

Powodem stosowania tlenku wapnia była próba ograniczenia charakterystycznej dla tego typu tworzywa reakcji z wilgocią z powietrza zgodnie z poniższym wzorem. Zjawisko to jest powodem powstania kruchości wodorowej, wpływa także negatywnie na plastyczność w temperaturze otoczenia.

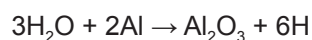


Pomiar temperatury zalewania wykonywano za pomocą pirometru dwubarwowego Optris CT, na strudze metalu podczas zalewania formy. Lejność wyznaczono dla dwóch temperatur zalewania 1500°C i 1525°C. Zrealizowano także pomiar krzywej krystalizacji i stygnięcia (rys. 2), za pomocą rejestratora wielokanałowego MrAC 15 oraz czujnika temperatury typu B. Rejestracja odbywała się z częstotliwością 1 Hz. Badania dylatometryczne przeprowadzono w dylatometrze DIL 402C/4/G firmy NETZSCH, przeznaczonym do pomiarów rozszerzalności cieplnej metali i stopów, materiałów ceramicznych (włącznie z materiałami typu odlewniczych mas formierskich). Badania przeprowadzono w atmosferze ochronnej argonu z szybkością nagrzewania 5 K/min w zakresie od temperatury otoczenia do 1000°C.

while casting the bar of the provided diameter to the height of 200 mm was treated as thorough filling of the cavity. Ceramic moulds were heated to the temperature of 700°C and were taken out of the oven right before the discharge. To ensure test repeatability the mould was showered with sand.

Application of hot CaO should have protected, to some degree, the metal against contact of liquid steel casting with the surroundings. It was noticed, however, that after ca. 5 min the CaO layer would disappear. The metal protecting layer was supplemented. After fusion completion and furnace cooling a relatively thick layer of white tarnish was found on the crucible.

The reason behind calcium oxygen application was an attempt at limiting the reaction, characteristic for this material, with atmospheric moisture as per the formula below. The phenomenon causes hydrogen embrittlement and has a negative impact on plasticity in an ambient temperature.



The temperature at discharge was measured with Optris CT bicolour pyrometer at the metal stream during mould casting. Fluidity was determined for two discharge temperatures: 1500°C and 1525°C. Likewise, measurement of crystallization and cooling was performed (Fig. 2) with the MrAC 15 multi-channel recorder and type B temperature sensor. Recording was performed with the frequency of 1 Hz. Dilatometric testing was performed in the DIL 402C/4/G by NETZSCH, designed for measurement of thermal expansion of ceramic materials, metals and alloys (including such materials as moulding mass). The testing was performed in shielding argon atmosphere and with 5 K/min heating speed within temperature range between ambient and up to 1000°C.

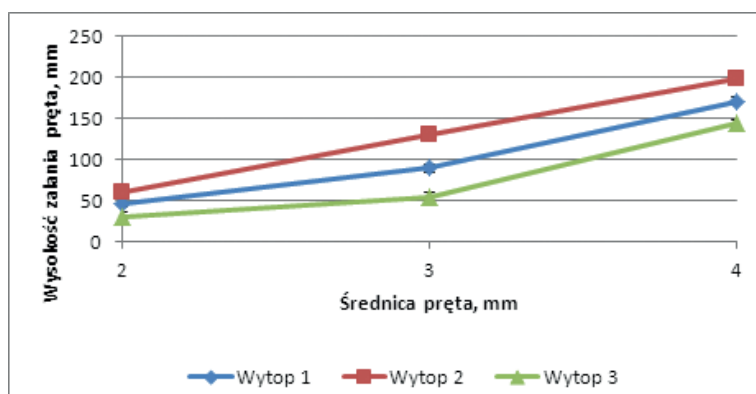


### 3. Analiza wyników badań

Zależność wysokości zalania prętów od ich średnicy przedstawiono na rysunku 2. Dwie krzywe odnoszą się do pomiaru lejności uzyskanego po zalaniu form z temperatury 1500°C (Wytop 1) oraz 1525°C (Wytop 2) badanym staliwem o wysokiej zawartości aluminium. Krzywa lejności oznaczona jako „Wytop 3” została przedstawiona w celach porównawczych i dotyczy staliwa chromowo-niklowo-miedziowego, którego skład chemiczny został przedstawiony w tabeli 3. Temperatura tego staliwa w czasie zalewania wynosiła 1490°C. Lejność w stosowanej próbie jest parametrem charakteryzowanym przez wysokość wypełnienia pionowych prętów o różnych średnicach.

### 3. Analysis of test results

The correlation between the bar height and diameter is presented in Figure 2. Two curves regard fluidity measurement results obtained after mould filling at the temperatures of 1500°C (Fusion 1) and 1525°C (Fusion 2) with the tested, high aluminium content, steel casting. The fluidity curve marked as “Fusion 3” is presented for comparison and regards chrome-nickel-copper cast steel; its chemical composition is presented in Table 3. Temperature of this steel casting at discharge was 1490°C. Fluidity in the tested sample is a parameter characterised by the height of filling vertical bars of different diameters.



Rys. 2. Wykres zależności wysokości zalanych prętów od ich średnicy

Fig. 2. Graph showing correlation between bar height and diameter

Tabela 3. Skład stopu chromowo-niklowo-miedziowego, % wag.

Table 3. Composition of the chrome-nickel-copper steel, wt. %

C	Si	Cr	Ni	Cu	Nb	Mo	Fe
<0,07	<0,1	15,0–17,5	3,0–5,0	3,0–5,0	1,0–1,5	<0,5	reszta/bal.

Dla warunków, w których realizowano eksperyment, wszystkie pręty o średnicy powyżej 4 mm zostały wypełnione całkowicie. Przyczyną wypełnienia tych wnęk była wysoka temperatura wygrzania stosowanych form ceramicznych. Porównując wyznaczone krzywe, można zauważyć, że krzywa opowiadająca lejności staliwa aluminium przegrzanego do temperatury 1525°C jest linią niemalże prostą. Pozwala to na stwierdzenie, że mamy do czynienia z cieczą zbliżoną do cieczy newtonowskiej, która charakteryzuje się niezależnością lepkości dynamicznej od prędkości ścinania. Lejność po podniesieniu temperatury o 25°C zwiększyła się średnio o 21% dla badanego stopu.

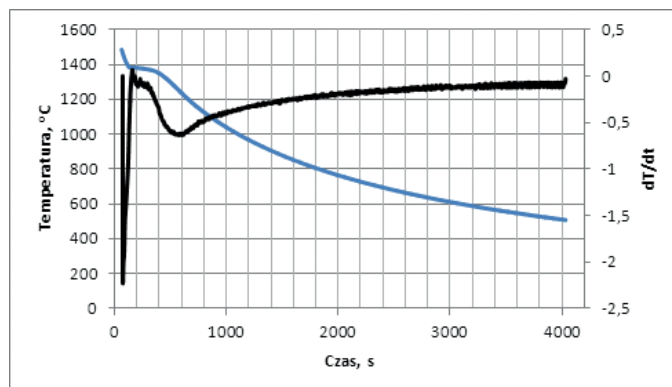
W przypadku badań staliwa na osnowie Fe-Al, prowadzonych w Instytucie Odlewnictwa, zarejestrowana krzywa krystalizacji i stygnięcia (rys. 3) pozwoliła na określenie temperatury solidus oraz likwidus, która odpowiednio wynosi 1382°C i 1452°C. Możemy dzięki

For the conditions of this experiment, all bars with a diameter greater than 4 mm were fully filled. Full filling of those cavities resulted from the high temperature of preheating for the ceramic moulds. When comparing the curves, it is noticeable that the curve line for the aluminium steel casting overheated to 1525°C is almost straight. It allows stating that we are dealing with liquid close to the Newtonian characterised by the independence of dynamic viscosity from the shear rate. On average, after a temperature increase of 25°C the fluidity of the tested alloy increased by 21% for the tested alloy.

In the case of testing Fe-Al base steel casting performed at the Foundry Research Institute, the recorded crystallisation and cooling curve (Fig. 3) allowed determination of solidus and liquidus temperatures as 1382°C and 1452°C respectively. Thus, we can determine the metal overheating value which was 50°C and

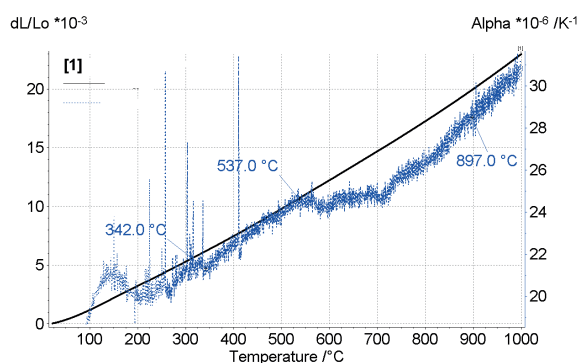
temu wyznaczyć wartość przegrzania metalu, która wyniosła odpowiednio 50°C i 75°C dla form zalewanych z temperatury 1500°C i 1525°C. Na zarejestrowanej krzywej krystalizacji i stygnięcia nie zauważono żadnych efektów cieplnych związanych z przemianami fazowymi w roztworze stałym. Wydaje się, że przy zawartości Al na poziomie 11,5–14,3% wag. powinny być zauważalne efekty cieplne wynikające z układu Fe-Al. Szczególnie dotyczy to przemiany fazowej A2 → B2 występującej dla szerokiego przedziału zawartości aluminium.

75°C respectively for moulds filled at the temperatures of 1500°C and 1525°C. On the recorded crystallisation and cooling curve, no thermal effects connected with the phase transition in the solid solution were noticed. It seems that with the Al content at the level of 11.5–14.3 wt.%, there should be some noticeable thermal effects stemming from the Fe-Al system. It is especially valid for the A2 → B2 phase transition occurring for the wide range of aluminium content.



Rys. 3. Krzywa krystalizacji i stygnięcia oraz krzywa różniczkowa  $dT/dt = f(t)$

Fig. 3. Crystallisation / cooling curve and differential curve  $dT/dt = f(t)$



Rys. 4. Wyniki badań dylatometrycznych

Fig. 4. Results of dilatometric testing

Jednym z czynników mogących wpłynąć na brak rejestracji oznak przemian, wynikających z układu równowagowego, jest dynamiczny charakter prowadzonej rejestracji. Zastosowanie bardziej precyzyjnej aparatury badawczej (badań dylatometrycznych) pozwoliło na detekcję zmian związanych z tymi przemianami [19]. Wykres z krzywą dylatometryczną przedstawiony na rysunku 4 pozwala stwierdzić, że w temperaturze 537°C dochodzi do wyraźnej zmiany rozszerzalności cieplnej badanej próbki, co należy łączyć z przemianą fazową  $Fe_3Al \rightarrow FeAl$ . W temperaturze 897°C, jak i w temperaturze 342°C, zmiany te nie są już tak intensywne, jednak zakres temperaturowy odpowiada przemianie struktury B2 na  $\alpha(A2)$  w przypadku temperatury 897°C. W niskiej

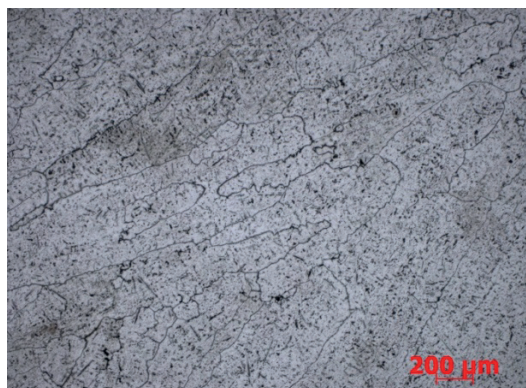
One of the factors that might have impacted on the lack of recorded transformation signs, stemming from the equilibrium system, is the dynamic character of the recording. Application of more precise research apparatus (dilatometric testing) allowed detection of changes connected with these transformations [19]. The graph with the dilatometric curve presented in Figure 4 allows the statement that at the temperature of 537°C there is clearly a change of thermal expansion of the tested sample which should be connected with  $Fe_3Al \rightarrow FeAl$  phase change. Both at the temperatures of 897°C and 342°C, the changes are not that intensive, however, the temperature range corresponds to the structure transformation from B2 to  $\alpha(A2)$  in the case of 897°C.

temperaturze występują obszary dwufazowe, takie jak:  $\alpha(A2) + D0_3$  lub  $\alpha(A2) + B2$ . Przemiany fazowe zachodzące w tym obszarze mogą skutkować zmianą zauważoną na [rysunku 4](#) w temperaturze 342°C.

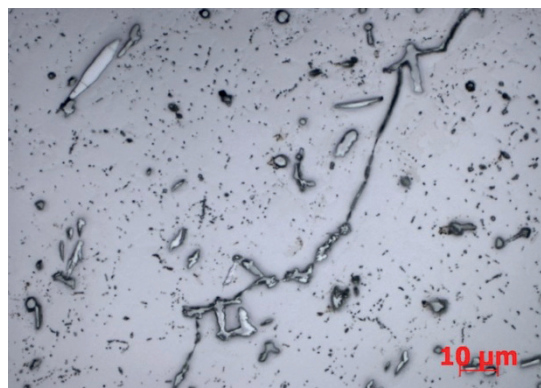
Po wybitciu z form ceramicznych odlewów widoczne były pęknięcia w miejscu połączenia z układem zasilającym – pękanie na gorąco [14]. Pęknięcia ujawniły się w 70% odlewów (obserwacja okiem nieuzbrojonym) wykonanych podczas badań lejności. Przełomy charakteryzowały się wyraźną warstewką tlenkową oraz nielicznymi błyszczącymi przełomami.

At low temperatures two phase areas appear:  $\alpha(A2) + D0_3$  or  $\alpha(A2) + B2$ . The phase changes occurring in this area may result in the change noticed in [Figure 4](#) at the temperature of 342°C.

After removal of the casts from ceramic moulds there were visible cracks at the point of connection to the supply system – hot cracking [14]. Cracks were noticed in 70% of casts (observed with the naked eye) made during the fluidity test. The crack edges were characterised by a clear oxide film and a few shiny cracks.



a)



b)

Rys. 5. Mikrostruktura otrzymanego staliwa na bazie Fe-Al: a) pow. 100×, b) pow. 1000×

Fig. 5. Microstructure of the obtained Fe-Al base cast steel: a) 100× magnification, b) 1000× magnification

Na [rysunku 5](#) przedstawiono przykładową mikrostrukturę stopu (zgląd nietrawiony). Widoczna jest struktura dendrytyczna z wydzieleniami faz międzymetalicznych oraz wydzielenia faz niżej topliwych na granicach ziaren.

In [Figure 5](#) an example of the alloy micro-structure has been presented (rough specimen). A dendrite structure is visible with separation of intermetallic phases and low melting phases at the grain outlines.

#### 4. Wnioski

1. Dla staliwa przegrzanego o 75°C wykres zależności długości zalanych prętów od ich średnicy jest bliski krzywej płynięcia cieczy newtonowskiej.
2. Mimo wielu informacji o złej lejności, zastosowanie formy wygrzanej w temperaturze 700°C pozwoliło na zalanie całkowite wszystkich prętów o średnicy powyżej  $\phi$  5 mm, co nie odbiega od wyników staliwa chromowo-niklowo-miedziowego.
3. Odlewy wykonane z omawianego stopu pękały na gorąco.
4. Analiza krzywej krystalizacji i stygnięcia okazała się niewystarczającą do zaobserwowania przemian fazowych zachodzących w roztworze stałym badanego staliwa aluminium w temperaturze powyżej 500°C. Badania dylatometryczne prowadzone w stabilnych warunkach dały pozytywny efekt.

#### 4. Conclusions

1. For cast steel overheated by 75°C the obtained bar diameter / height curve is close to the curve for the Newtonian fluid flow.
2. Despite abundant information on poor fluidity, the use of mould preheated at the temperature of 700°C allowed pouring all bars with a diameter greater than  $\phi$  5 mm which is not much different from the results for chrome-nickel-copper steel casting.
3. Casts made of the alloy discussed here exhibited hot cracking.
4. Analysis of the crystallisation and cooling curve turned out to be insufficient to observe phase transitions occurring in the solid solution of the tested aluminium steel casting at the temperature above 500°C. Dilatometric testing performed under stable conditions showed a positive result.

5. Na podstawie krzywej krystalizacji i stygnięcia oraz badań dylatometrycznych określono temperaturę solidus – 1382°C, likwidus – 1452°C oraz temperatury przemian fazowych (342°C, 537°C, 897°C) badanego staliwa.
5. On the basis of the crystallisation and cooling curve as well as dilatometric testing of the solidus – 1382°C and the liquidus – 1452°C as well as phase change (342°C, 537°C, 897°C), specified temperatures were determined for the steel casting.

## Podziękowania

Artykuł powstał w oparciu o wyniki badań prowadzonych w 2013 r. w ramach pracy statutowej Instytutu Odlewnictwa „Próby zastosowania nowoczesnych stopów typu Fe-Al-Cr o osnowie faz międzymetalicznych” (zlec. 3024/00), finansowanej przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

## Podziękowania

This article is based on the results of research conducted in 2013 in the framework of the statutory project in the Foundry Research Institute “Attempts to apply Fe-Al-Cr type modern alloys with the intermetallic phases of the matrix” (No. 3024/00), financed by the Ministry of Science and Higher Education.

## Literatura/References

1. Sikka V.K., Wilkening D., Liebetrau J. (1998). Melting and casting of FeAl-based cast alloy. *Mater. Sci. Eng.*, A258(1–2), 229–235.
2. Jaśkowiec K., Uhl W. (2012). Stopy na bazie Fe-Al – aspekt technologiczny. *Prace Instytutu Odlewnictwa / Transactions of the Foundry Research Institute*, 52(4), 113–126; 127–298.
3. Szkliniarz W., Kościelna A. (2008). Problemy towarzyszące wytwarzaniu stopów na osnowie FeAl. *Inżynieria Materiałowa*, 29(2), 72–77.
4. Huang Y.D., Yang W.Y., Suna Z.Q., Froyen L. (2004). Preparation and mechanical properties of large-ingot Fe3Al-based alloys. *J. Mater. Process. Technol.*, 146(2), 175–180.
5. Kopyciński D., Gilewski R. (2012). Ocena odporności na utlenianie żeliwa wysokoalumiowego. *Ochrona przed Korozją*, 55(11), 511–513.
6. Sobczak N., Pirowski Z., Purgert R.M. (2012). *Castability of HAYNES 282 alloy*. Workshop “Advanced Ultrasupercritical Coal-fired Power Plants”, EVN Forum Maria Enzerdorf Vienna, Austria, 19–20 September 2012.
7. Fraś W., Kopyciński D. (2007). Mikrostruktura i właściwości wysokoalumiowych stopów Fe-C-Al z dodatkiem tytanu, niobu, chromu i boru. *Mater. Engin.*, 28(5), 835–839.
8. Liu C.T., George E.P., Maziasz P.J. (1998). Recent advances in B2 iron aluminide alloys: deformation, fracture and alloy design. *Mater. Sci. Eng.*, A258(1–2), 84–98.
9. Deevi S.C., Sikka V.K. (1996). Nickel and iron aluminides: an overview on properties, processing, and applications. *Intermetallics*, 4(5), 357–375.
10. Jaśkowiec K., Uhl W. (2013). Zagadnienie odlewania elementów ze stopu na bazie Fe-Al pracujących w podwyższonych temperaturach. *Motrol*, 15(1), 59–62.
11. Risanti D., Deges J., Falat L. (2005). Dependence of the brittle-to-ductile transition temperature (BDTT) on the Al content of Fe-Al alloys. *Intermetallics*, 13(12), 1337–1342.
12. Shibata K., Zhu S.M., Guan X.S., Hayashi S., Iwasaki K. (2002). A trial to apply Fe-Al intermetallic alloys to brake rotors. *Int. J. Appl. Mech. Eng.*, 7(spec. is.), 277–282.
13. Krzeszewski R. (1996). *Instrukcja otrzymywania nowych czterech gatunków szarego żeliwa aluminiowego o zawartości od 9 do 21% Al w piecu indukcyjnym*. Kraków: Instytut Odlewnictwa.
14. Sundmana B., Ohnumab I., Dupinc N., Kattnerd U.R. (2009). An assessment of the entire Al-Fe system including D03 ordering. *Acta Mater.*, 57(10), 2896–2908.
15. Bystrzycki J., Varin R.A., Bojar Z. (1996). Postępy w badaniach stopów na bazie uporządkowanych faz międzymetalicznych z udziałem aluminium. *Inżynieria Materiałowa*, (5), 137–149.
16. BN-4051-12:1966 „Badania technologiczne staliwa. Próba lejności”.
17. *Poradnik inżyniera – odlewnictwo*. Tom I, Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
18. Borowiecki B. (1998). Krzywe płynięcia ciekłego żeliwa. *Solidification of Metals and Alloys*, (37), 25–30.
19. Gazda A., Warmuzek M., Wierzchowski W. (2004). Analysis of the structural changes occurring during melting and solidification of some selected cast aluminium alloys with application of the differential scanning calorimetry (DSC). *Odlewnictwo – Nauka i Praktyka*, 6(3), 17–27.