

## Zagadnienie odlewania elementów ze stopu na bazie Fe-Al pracujących w podwyższonych temperaturach

Krzysztof Jaśkowiec, Waldemar Uhl

Instytut Odlewnictwa w Krakowie, Zakład Stopów Żelaza,  
ul Zakopiańska 73, 30-418 Kraków  
krzysztof.jaskowiec@iod.krakow.pl, waldemar.uhl@iod.krakow.pl

**Streszczenie.** Stopy na bazie Fe-Al wykazują cechy predysponujące je do zastosowań w podwyższonych temperaturach. Elementy pieców, rury oraz zawory, które podczas swojej pracy narażone są na działanie agresywnego środowiska, bywają wykonywane z tego tworzywa. Pojawiają się także próby wykorzystania stopu na bazie Fe-Al-Cr na elementy grzejne. Jednak zastosowanie tego materiału wiąże się z wieloma trudnościami. Część z nich została opisana w poniższej publikacji, przedstawiono kilka uwag oraz opis wytopu staliwa na bazie Fe-Al przeprowadzonego w Instytucie Odlewnictwa.

**Słowa kluczowe:** staliwo wysokoaluminowe, Fe-Al, uzysk aluminium, zawory silnika, agresywne środowisko, zastosowanie

### WPROWADZENIE

Stopy na osnowie faz międzymetalicznych FeAl i Fe<sub>3</sub>Al należą do grupy materiałów, które biorąc pod uwagę czynniki ekonomiczne mogą znaleźć szerokie zastosowanie w rozwiązaniach komercyjnych. Tworzywo to posiada bardzo dobrą odporność na utlenianie, siarkowanie, nawęglanie czy działanie soli w wysokich temperaturach, a ponadto dodatek kilku – kilkunastu procent Al obniża gęstość stopu. Wysoką granicę plastyczności tego tworzywa, do temperatury 550° C jest kolejną cechą, która może wzbudzić zainteresowanie. Badanie stopów na osnowie faz międzymetalicznych rozpoczęto na początku ubiegłego wieku, jednak w przypadku omawianych stopów na bazie Fe-Al dotychczas nie rozwiązano kilku istotnych zagadnień. Podstawowym problemem jest skłonność do pęknięcia w temperaturze otoczenia. Badania prowadzone w różnych ośrodkach naukowych wykazały, że plastyczność można zwiększyć poprzez dodatek boru, węgla i innych dodatków. Jednak parametr ten wciąż ogranicza zastosowanie tego materiału w wielu dziedzinach przemysłu. Udarność dla elementów odlewanych w stanie surowym mieści się w przedziale od 2J do 5J, natomiast przeróbka cieplno-

-plastyczna pozwala osiągnąć wynik 20J (dla stopów 2 lub 3 składnikowych) [1, 2, 3, 4, 5].

Stopy na bazie Fe-Al stosowane jako materiał odlewniczy stwarzają pewne kłopoty. Dotyczy to szczególnie lejułości oraz pęknięć odlewów na gorąco. Jednak problemy te można zmniejszyć lub zlikwidować poprzez odpowiednie prowadzenie procesu metalurgicznego. Ponadto, formy powinny być suszone lub wykonane z odpowiedniego materiału, gdyż wilgoć w formie, jak i w powietrzu wpływa niekorzystnie na właściwości odlewanych materiałów. W literaturze można odnaleźć rozwiązania pozwalające na bezpieczne topienie i uzyskanie dobrej efektywności procesu. Jednym z tych rozwiązań jest ułożenie materiału wsadowego w odpowiedni sposób, wykorzystując właściwości pola magnetycznego tworzonego przez cewkę pieca indukcyjnego. W przypadku produkcji przemysłowej istnieją dwa podstawowe problemy dotyczące topienia stopów Fe-Al [6, 7, 8]:

1. Złe rozmieszczenie wsadu powoduje, że uzyskanie odpowiedniej ilości ciekłego metalu może być utrudnione.
2. W warunkach przemysłowych dodawanie dużej ilości aluminium do stopionego metalu może być niemożliwe, gdyż nie można dopuścić do przegrzania kąpeli ze względu na powstanie negatywnych efektów, takich jak:
  - nadmierne utlenianie,
  - powstanie żużla,
  - straty energii.

Pierwszy problem można rozwiązać poprzez szkolenie personelu. W przypadku drugiego zagadnienia można zastosować metodę Exo-Melt™ [6].

Topienie opisywanego stopu w próżni sprawia, że większość problemów, takich jak: porowatość, wydłużenie, niska wytrzymałość mechaniczna w wysokiej temperaturze ulega poprawie. Literatura sugeruje, zwłaszcza przy dużej zawartości aluminium, stosowanie atmosfery argonu lub próżni. Jednak użycie pieca próżniowego lub atmosfery ochronnej powoduje podniesienie kosztów. W przypadku stopu o zawartości Al w przedziale 9–16% wag. naniesie-

nie warstwy ochronnej – osłaniającej lustro metalu – daje dobre rezultaty. Następuje wówczas znaczne zmniejszenie porowatości oraz mikropęknięć. Warstwa ochronna to zazwyczaj mieszanina chlorków i fluorków. Przykładem związku możliwego do zastosowania na warstwę ochronną jest kriolit. Należy jednak zwrócić szczególną uwagę na możliwość reagowania warstwy ochronnej z materiałem tygla, zagrożenia wynikającego ze stosowania związków niebezpiecznych dla zdrowia ludzkiego oraz pogorszenia warunków ekologicznych [9, 10, 11].

Prostą metodą ograniczenia porowatości oraz innych wad jest stosowanie:

1. suchego wsadu,
2. stosowanie dużych kawałków aluminium w celu ograniczenia powierzchni kontaktu [6].

W przedstawionym przykładzie otrzymywania odlewów wykonanych ze stopu z wysoką zawartością aluminium, prowadzonym w Zakładzie Stopów Żelaza Instytutu Odlewnictwa w Krakowie, zastosowano żużel ochronny oraz zminimalizowano czas od stopienia do zalania formy poprzez bezpośrednie zalanie formy zaraz po stopieniu się wsadu i jego przegrzaniu.

#### REALIZACJA WYTOPÓW STALIWA NA BAZIE FE-AL

W czasie prac realizowanych w Instytucie Odlewnictwa brano pod uwagę konieczność zastosowania metod pozwalających na uzyskanie końcowego efektu, jakim był zestaw w pełni funkcjonalnych łopatek pracujących w wysokich temperaturach.

**Tabela 1.** Skład chemiczny stopu na odlewy łopatek  
**Table 1.** The chemistry composition of the vanes

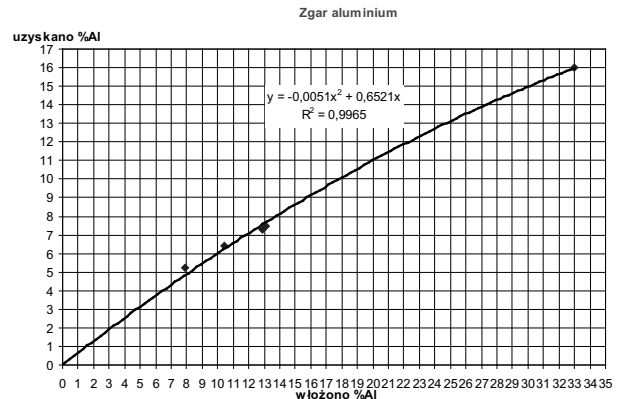
C	Cr	Mo	Zr	Al	Fe
%, wag.					
0,3	5,06	1,87	0,18	8,40	reszta

Wstępne wytopy zostały przeprowadzone dla określenia zgaru aluminium i cyrkonu w interesującym nas stopie oraz w celu pobrania próbek do badań właściwości fizykochemicznych stopu o założonym składzie chemicznym. Określenie parametrów fizykochemicznych było niezbędne do wykonania symulacji komputerowej procesów zalewania i krzepnięcia.

**Tabela 2.** Zakładany skład chemiczny wytopów próbnych  
**Table 2.** The hypothesis chemistry composition of the sample cast iron

C	Cr	Mo	Zr	Al	Fe
%, wag.					
0,3	5,10	1,90	0,2	X	reszta

Dodatek aluminium (X) do prób był zróżnicowany i wynosił odpowiednio: 8, 10, 12 i 33 %wag. Wytopy rozpoczęto od stopienia materiału wsadowego będącego bazą stopu, zmianie ulegała zawartość aluminium, które było dodawane zgodnie z informacjami zawartymi powyżej.



**Rys. 1.** Wykres zgaru wprowadzonego aluminium

**Fig. 1.** Graph yield aluminum

Wykres ten umożliwił właściwy dobór ilości dodatku aluminium do wytopu, celem uzyskania określonej zawartości tego pierwiastka dla ustalonego w tym przypadku procesu topienia. Zrealizowano także pomiar zawartości tlenu i gazu dla wybranych wytopów. Wyniki pomiaru tych gazów przedstawiono w tabeli 3.

**Tabela 3.** Zawartość gazów w stopie

**Table 3.** The content of the gases in castings

Wytopy w których zrealizowano pomiar gazu	Zawartość pierwiastka w % wag.,	
	tlon	azot
00/4	0,050	0,0020
01/4	0,033	0,0030

Badanie wytrzymałości na rozciąganie w temperaturze otoczenia, przeprowadzone w certyfikowanym laboratorium badawczym Instytutu Odlewnictwa i wynosiła: 184 MPa.

#### TECHNOLOGIA FORMY

Określono rodzaj materiałów na formy, do których ma być odlewany przedmiotowy stop dla otrzymania odlewów o możliwie najlepszej jakości.

Zastosowano cztery rodzaje mas formierskich:

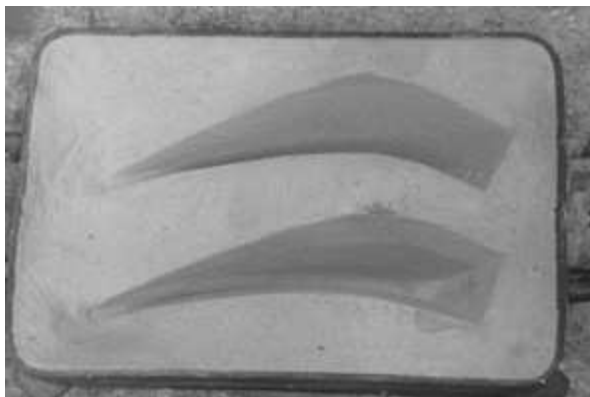
- bentonitowa,
- furanowo-formaldehidowa,
- na szkle wodnym,
- żywiczna.

Przeprowadzone próby topienia i zalewania do form wykonanych z powyżej wymienionych mas umożliwiły właściwy dobór technologii formy.

Zdecydowano, że formy podstawowe wykonane będą z masy z wykorzystaniem żywicy Eco 2000. Na wybór masy formierskiej duży wpływ miała przeprowadzona symulacja komputerowa, która wykazała konieczność zastosowania formy z tzw. fałszywką (rys. 2).

#### WYKONANIE ODLEWU

Do zimnego pieca wprowadzono podstawowe materiały wsadowe, wstępnie wygrzane, izolujący żużel nanoszony na



**Rys. 2.** Falszywka odlewnicza  
**Fig. 2.** Casting mould

ciekły metal składał się z mieszaniny wyprażonych: piasku kwarcowego i wapna. Kąpiel podgrzano do temperatury 1620° C, ściągnięto żużel i dodano aluminium. Dodanie Al do kąpeli spowodowało obniżenie temperatury. Po ustabilizowaniu temperatury na poziomie 1580° C dodano Fe-Zr.

Metal spuszczano bezpośrednio do przygotowanych wcześniej form umieszczonych na wózku widłowym.

Przed spustem metalu do formy zalano kokilę miedzianą celem otrzymania próbki do badania składu chemicznego oraz formę umożliwiającą określenie przebiegu krzywych stygnięcia. Pomiar prowadzono przy pomocy wielokanałowego rejestratora MrAC -15 z czujnikiem termoparowym typu B.

Z jednego wytopu zalewano jedną formę, z której uzyskiwano dwa odlewy łopatek. Wykonano pięć wytopów przedmiotowego stopu, z których uzyskano sześć odlewów łopatek przeznaczonych do eksploatacji, dwa do badań laboratoryjnych oraz dwa odlewy uznano za wadliwe.

Zalana forma odlewnicza po wystygnięciu była wybijana, a następnie odcinane były układy wlewowe i nadlewy. Na rysunku 3 przedstawiono odlew wraz z układem wlewowym i nadlewem.

Odlewy były poddawane badaniom jakościowym, tj. wizualnej ocenie zewnętrznej powierzchni oraz w przypadku pozytywnej oceny, badaniom rentgenowskim. Prawidłowo wykonane odlewy podano badaniom rentgenowskim, po wcześniejszym ich szlifowaniu.



**Rys. 3.** Odlew wraz z układem wlewowym i nadlewem po oczyszczeniu z masy  
**Fig. 3.** Casting with rise and feeding system after cleaning

**Fig. 3.** Casting with rise and feeding system after cleaning

Odlewy łopatek przekazano do badań eksploatacyjnych.

## MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA STOPÓW NA BAZIE STOPU FE-AL

Intensywne badania doprowadziły do pojawienia się coraz to nowych patentów oraz prób zastosowania stopów na osnowie faz FeAl i Fe<sub>3</sub>Al w przemyśle samochodowym. Elementy wykonane z badanego stopu pracują zazwyczaj w podwyższonych temperaturach. Dlatego patenty często dotyczą komór spalania, gdzie 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 [12, 13, 14, 15, 16].



**Rys. 4.** Element wtryskiwacza paliwa wykonane na bazie stopu Fe-Al [12]

**Rys 4.** Fuel injector component made with Fe-Al alloy [12]

Stopy na osnowie faz Ti<sub>3</sub>Al, TiAl, NiAl, FeAl, Fe<sub>3</sub>Al są wykorzystywane do produkcji elementów silnika odrzutowego, części konstrukcyjnych, zębatek (rysunek 5) itp. Jednak pod względem ekonomicznym szczególnie wyróżniają się tu stopy na osnowie fazy FeAl, Fe<sub>3</sub>Al [17].



**Rys. 5.** Części helikoptera wykonane na bazie stopu Fe-Al [17]  
**Fig. 5.** Helicopter components made with Fe-Al alloy [17]

Badania rozpoczęte w latach 30 XX wieku prowadzone z różną intensywnością doprowadziły do rozwoju technologii wytwarzania elementów na bazie Fe-Al. Odlewanie, przeróbka cieplno-plastyczna oraz metalurgia proszków są wykorzystywane do produkcji półwyrobów. Aktualnie szczególnie dynamicznie rozwija się technologia metalurgii proszków. Często wykonuje się również warstwy ochronne, wykorzystując bardzo dobrą odporność na działanie agre-

sywnego środowiska, które mogą być realizowane poprzez walcowanie blach [18, 19, 20, 21, 22].

#### WNIOSKI

1. Analiza składu chemicznego wytopów prowadzonych w Instytucie Odlewnictwa w Krakowie, potwierdza słuszność zastosowanej technologii wytapiania (skład chemiczny zgodny z założonym).
2. Zawartość gazów w stopie była na stosunkowo niskim poziomie, jak na wytop realizowany na powietrzu dla tego typu stopów.
3. Temperatura końca krzepnięcia wynosiła ok. 1450°C co potwierdza możliwość zastosowania tego tworzywa.
4. Wytrzymałość na rozciąganie w temperaturze otoczenia, dla próbki nie poddanej obróbce cieplnej, osiągnęła wartość 184 MPa.

#### LITERATURA

1. **Deevi S.C., Sikka V.K. 1996.** Nickel and iron aluminides: an overview on properties, processing, and applications. *Intermetallics*, 4,
2. **Zhu S.M., Shibata K., Guan X.S. 2002.** Effect of Carbon Addition on Tribological Properties of Fe-Al Alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, Volume 33A,
3. **Shivkumar Khaple, Baligid R.G., Sankar M. 2010.** Effect of Melting Process and Aluminium Content on the Microstructure and Mechanical Properties of Fe-Al Alloys. *ISIJ International*, Vol. 50, No. 10.
4. **Z. Pirowski, J. Olszyński, A. Gwizdź. 2011.** Increasing the erosive wear resistance of selected iron alloys by mechanical strain hardening of structure. *TEKA*, vol. XI; Lublin.
5. **Pang L., Kumar K.S. 2000.** On the impact toughness of Fe-40Al-based B2 aluminides. *Intermetallics*, 8.
6. **Sikka V.K., Wilkening D., Liebetrau J. 1998.** Melting and casting of FeAl-based cast alloy. *Materials Science and Engineering*, Vol. A258.
7. **S.P. Chakraborty, I.G. Sharma, D.K. Bose. 1998.** A study on the preparation of iron aluminium based intermetallic alloy by aluminothermic smelting technique; *Journal of Alloys and Compounds* 280.
8. **Stępień K., Kupka M. 2008.** Effect of hydrogen on room-temperature hardness of B2 FeAl alloys. *Scripta Materialia*, 59.
9. **Radhakrishna A., Baligid R.G., Sarma D.S. 2001.** Effect of carbon on structure and properties of FeAl based intermetallic alloy. *Scripta Materialia*, 45.
10. **Falal L., Schneider A., Sauthoff G. 2005.** Mechanical properties of Fe-Al-M-C (M = Ti, V, Nb, Ta) alloys with strengthening carbides and Laves phase. *Intermetallics*, 13.
11. **Risanti D., Deges J., Falal L. 2005.** Dependence of the brittle-to-ductile transition temperature (BDTT) on the Al content of Fe-Al alloys. *Intermetallics* 13.
12. Valve sheet for engine, EP 1669557 A1
13. Iron aluminide fuel injector component, US 6489043 B1
14. **Shibata K., Zhu S.M., Guan X.S., Hayashi S., Iwasaki K. 2002.** A trial to apply Fe-Al intermetallic alloys to brake rotors; *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 7, Spec. is.
15. **P. J. Blau, H. M. Meyer III. 2003.** Characteristics of wear particles produced during friction tests of conventional and unconventional disc brake materials; *Wear* 255.
16. **L. Gardyński. 2005.** Selected aspects of wear of the Caterpillar drive parts; *TEKA*, Vol. V, Lublin.
17. **Zbigniew Turek. 2006.** Aeronautics related RTD activities in Poland; 19-21 June 2006, Vienna.
18. **Szkliniarz W., Hadasik E., Kościelna A. 2004.** Metal casting and rolling problems in FeAl based alloy. *Metal*.
19. **Liu C.T., George E.P., Maziasz P.J. 1998.** Recent advances in B2 iron aluminide alloys: deformation, fracture and alloy design. *Materials Science and Engineering*, A258.
20. **D.G. Morris, M. A. Munoz-Morris. 2005.** *Intermetallics: past, present and future*; *Rev. Metal*, Vol. Extr. Madrid.
21. **N.S. Stoloff. 1998.** Iron aluminides: present status and future prospects; *Materials Science and Engineering* A258.
22. **Z. Pirowski, 2011.** Application of Nickel Superalloys On Castings For Conventional Energy Equipment Items. "TEKA", vol. XIC.

#### THE ISSUE OF CAST PARTS WORKING AT HIGH TEMPERATURE OF AN FE-AL BASE ALLOYS

**Summary.** Fe-Al alloy can be useful at high temperature. Components furnace, pipes and valves, that working at aggressive environment, can make of this alloy. High resistive Fe-Al alloy it reason developing heating elements on this material. Other application is described in this paper as well as casting vanes process for this class of alloys. The influence environment, alloy elements, melting process and other problems on properties is also reviewed. **Key words:** Iron aluminides, Fe-Al, yield aluminium, valve engine, aggressive environment, application.