

Badania nad technologią odlewania ablacyjnego stopów aluminium

Research on ablation casting technology for aluminium alloys

Piotr Dudek¹, Aleksander Fajkiel¹, Tomasz Reguła¹, Jacek Bochenek²

¹*Instytut Odlewnictwa, Zakład Stopów Metali Nieżelaznych, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków*

²*PUH Jacek Bochenek, Przykopy 18, 30-612 Kraków*

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

²*PUH Jacek Bochenek, Przykopy 18, 30-612 Kraków*

E-mail: piotr.dudek@iod.krakow.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono wstępne wyniki badań nad technologią odlewania ablacyjnego. W ramach pracy opracowano założenia do budowy doświadczalnego stanowiska do zmodyfikowanej technologii odlewania ablacyjnego. Wykonano stanowisko, na którym przeprowadzono badania destrukcji formy piaskowej strumieniem wody pod wysokim ciśnieniem. Wpływ szybkiego chłodzenia odlewu podczas krzepnięcia na jego strukturę określono na podstawie badań rentgenograficznych i metalograficznych.

Słowa kluczowe: *odlewanie ablacyjne, stopy aluminium, mikrostruktura*

Abstract

The article presents preliminary results of research on ablation casting technology. The guidelines for the design of equipment to carry out the process are described. Based on the above mentioned instructions a test stand was developed and built. Many tests were performed concerning the influence of the water jet directed at a sand mould on its removal tendency. The effect of the cooling rate of tested cast parts on its microstructure were studied based on metallographic and radiographic tests.

Key words: *ablation casting, aluminum alloys, microstructure*

1. Wprowadzenie

Technologia odlewania do form piaskowych intensywnie chłodzonych wodą podczas krzepnięcia odlewu i destrukcji formy po jego zakrzepnięciu nosi nazwę odlewania ablacyjnego. Jest to technologia stosunkowo nowa i obecnie w Polsce nie stosowana.

Proces odlewania ablacyjnego (ang. *ablation casting* lub *ablation process*), którego termin zaczerpnięto prawdopodobnie z łacińskiego słowa *ablutio* – co oznacza mycie, obmycie, kąpiel, oczyszczenie – dotyczy wykonywania odlewów, głównie ze stopów aluminium i magnezu w formach jednorazowych. W procesie

1. Introduction

The technology of casting into sand moulds, which are intensively cooled with water during the process of solidification and the destruction of the casting mould after solidification, is called ablation casting. It is a technology which is relatively new and at present not used in Poland.

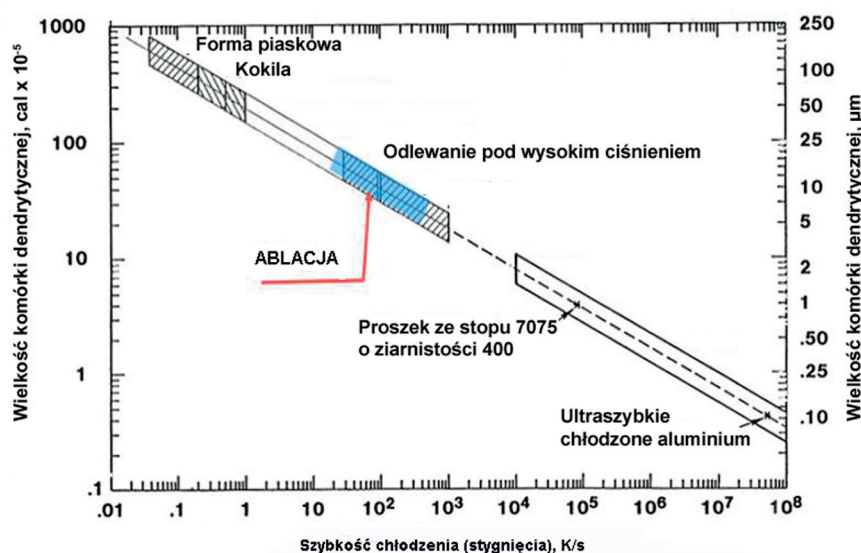
The process of ablation casting whose name was probably coined from a Latin word *ablutio* – which means washing, ablation, bath, cleaning – regards castings, mainly made of aluminium and magnesium alloys in expendable moulds. The process uses sand moulds

wykorzystywane są formy piaskowe z wodorozpuszczalnymi spoiwami. Ciekły stop wlewany jest do formy odlewniczej i w czasie gdy pozostaje on jeszcze w stanie ciekłym, forma z pewnej odległości jest obmywana strumieniami medium chłodzącego (np. wody). Forma sukcesywnie podlega destrukcji, umożliwiając bezpośredni kontakt wody z powierzchnią odlewu, eliminując tym samym szczelinę powietrzną – występującą praktycznie we wszystkich innych tradycyjnych sposobach odlewania – ograniczającą przepływ ciepła na zewnątrz. Duży gradient temperatury w przekroju odlewu sprzyja eliminacji porowatości skurczowej – szczególnie w dużych przekrojach. Krzepnięcie zachodzi w warunkach bezprecedensowo dużych gradientów temperatury i prędkości, w rezultacie czego powstaje mikrostruktura z ekstremalnie rozdrobnionymi fazami krzepnącymi w ostatniej kolejności. Według danych literaturowych mechaniczne właściwości odlewu są równe lub przewyższają poziom analogicznych charakterystyk uzyskiwanych przy stosowaniu techniki odlewania pod wysokim ciśnieniem [1].

Technologia odlewania ablacyjnego predestynowana jest głównie do wykonywania odlewów o zróżnicowanej grubości ścianki i skomplikowanych kształtach w formach piaskowych, w których odlewy krzepną stosunkowo wolno, co skutkuje niekorzystnym rozrostem ziaren. W celu poprawy właściwości mechanicznych przez uzyskanie drobnoziarnistej struktury w odlewie stosuje się szybkie, ablacyjne chłodzenie formy bezpośrednio po zalaniu ciekłym metalem wraz z jej destrukcją (rozpadem) – rysunek 1.

with water-soluble binders. Liquid alloy is poured into a casting mould and when it is still in the liquid state, from a certain distance the mould is washed with jets of a cooling medium (e.g. water). The mould is destroyed successively, allowing direct contact between water and the surface of the casting, at the same time eliminating the air gap – which occurs practically in all other traditional methods of casting – which limits the flow of heat outside the casting. A big gradient of temperature in the cross-section of a casting facilitates the elimination of shrinkage porosity – especially in big cross-sections. Solidification occurs under conditions of unprecedentedly high temperature and speed gradients, as a result of which a microstructure is created with extremely fragmented phases which solidify last. According to data from the field literature, mechanical properties of a casting are equal to or higher than the level of analogous characteristics obtained with the use of high pressure die casting [1].

The technology of ablation casting is mainly predestined for making castings, with differentiated wall thickness and complicated shapes, in sand moulds, in which castings solidify relatively slowly, which results in an unfavourable growth of grains. In order to improve mechanical properties by obtaining a fine-grain structure ablation cooling of the casting mould is applied directly after pouring in liquid metal together with the destruction of the mould – Figure 1.



Rys. 1. Zależność pomiędzy wielkością komórki dendrytycznej a szybkością chłodzenia (stygnięcia) w stopach aluminium wykonywanych z zastosowaniem różnych technologii odlewania [1]

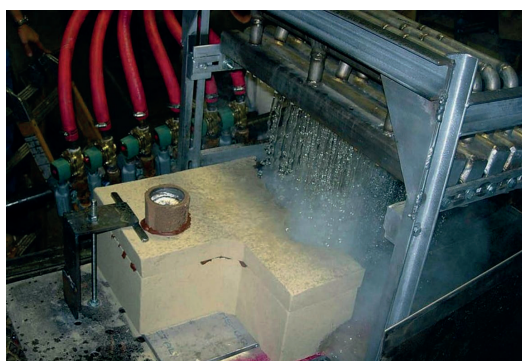
Fig. 1. The relations between the size of a dendritic cell and the speed of cooling in aluminium alloys made with the use of different casting technologies [1]

Metoda ta została opatentowana przez firmę Alotech w 2006 roku. Znanie m.in. z publikacji [1–4] i z opisu patentowego [5] urządzenie do usuwania formierskiej masy piaskowej za pomocą strumienia wody pod wysokim ciśnieniem składa się z przesuwanego w płaszczyźnie poziomej stołu roboczego i zespołu nieruchomych dysz natryskowych umieszczonych w konstrukcji bramowej. Forma piaskowa przygotowana do zalania ciekłym metalem znajduje się na taśmociągu poza zespołem dysz natryskowych. Po zalaniu jej ciekłym metalem jest ona przesuwana w płaszczyźnie poziomej pod zespół dysz natryskowych, gdzie pod wysokim ciśnieniem wody ulega rozbiciu, a odlew jest szybko chłodzony. Rozbita masa formierska jest zbierana na taśmociągu, woda powraca do zbiornika, a oczyszczony i schłodzony odlew jest wysuwany poza zespół dysz natryskowych. Na rysunku 2 przedstawiono realizację procesu odlewania ablacyjnego w opisanym urządzeniu.

Za prekursorów technologii odlewania ablacyjnego uważa się Chiny [6]. Do odtworzenia uchwytów różnego rodzaju naczyń wykonanych najczęściej z brązu, stosowano formy gliniane, w których umieszczano liny. Po ich wypaleniu powstały popiół usuwano, a gotową formę zalewano metalem (rys. 3). Tą techniką produkowano naczynia za panowania dynastii Shang (od ok. 1600 p.n.e. do 1046 p.n.e.).

This method was patented by Alotech in 2006. The equipment for removing moulding sand with a water jet, known, in addition to, from publications [1–4] and the patent description [5] consists of horizontally sliding working table and a set of static spraying nozzles placed in a gate-like construction. A sand mould prepared to be poured with liquid metal is placed on a belt conveyor outside the set of spraying nozzles. After pouring the mould with liquid metal the mould is moved horizontally under the set of spraying nozzles where under high pressure of water the mould is destroyed and the casting is quickly cooled. The moulding sand is collected on the belt conveyor, water returns to a tank, and the washed and cooled casting is moved outside the set of spraying nozzles. In Figure 2 is presented the execution of the process of ablation casting with the use of the described equipment.

China is thought to have been the forerunner in ablation casting [6]. To recreate different types of handles for vessels made mostly of bronze, clay moulds were used in which ropes were placed. After burning the moulds ashes were removed and the ready-made mould was poured with metal (Fig. 3). This technique was utilised to produce vessels during the reign of the Shang Dynasty (from approx. 1600 B.C. to 1046 B.C.).



Rys. 2. Realizacja procesu odlewania ablacyjnego [4]
Fig. 2. The execution of the process of ablation casting [4]

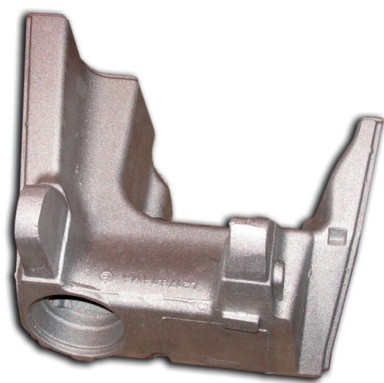


Rys. 3. Przykłady stosowania ablacji w starożytnych Chinach [6]
Fig. 3. Examples of ablation in ancient China [6]

Obecnie technologia ta jest głównie rozwijana w Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej zarówno przez ośrodki naukowe (AFS – *American Foundry Society*, *Armament Research Development & Engineering Centre*, CISA – *Casting Industry Suppliers Association*), jak i firmy motoryzacyjne skupione w konsorcjum USCAR (*United States Council For Automotive Research*) – Ford, Chrysler i General Motors [7].

W 2008 roku wyróżnienie w konkursie na odlew roku, zorganizowanym przez AFS, uzyskał odlew wspornika ramy motocykla wykonany z zastosowaniem technologii odlewania ablacyjnego [8] (rys. 4).

Innym przykładem zastosowania tej technologii jest element mocujący silnika zaburtowego do pawęży łodzi motorowej, przedstawiony na rysunku 5. Odlew powstał we współpracy firm Alotech i Mercury Marine [9].



Rys. 4. Tylni wspornik do motocykla ze stopu aluminium A356 (Al-Si7) wykonany z zastosowaniem technologii odlewania ablacyjnego [8]

Fig. 4. A rear support for a motorcycle made of aluminium A356 alloy (Al-Si7) manufactured with the use of ablation casting [8]

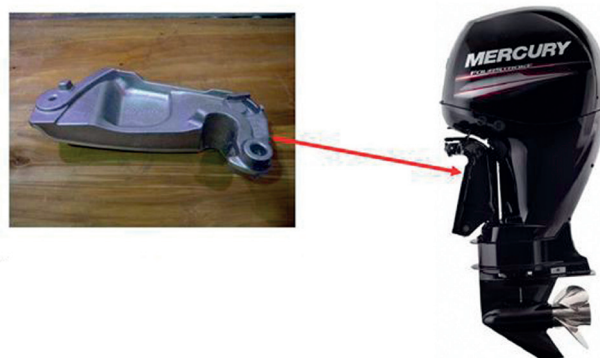
2. Przebieg badań

W Instytucie Odlewnictwa przeprowadzono wstępne prace nad zmodyfikowaną technologią odlewania ablacyjnego. Opracowano założenia do konstrukcji doświadczalnego stanowiska do destrukcji formy piaskowej strumieniem wody pod wysokim ciśnieniem, wykonano doświadczalne stanowisko badawcze, przeprowadzono próby odlewania z wykorzystaniem ablacji oraz badania otrzymanych z wykorzystaniem tej technologii odlewów ze stopu aluminium. Znany z danych literaturowych i patentów proces znacznie zmodyfikowano. Istota procesu (destrukcja formy w wyniku działania strumienia wody z jednoczesnym chłodzeniem odlewu) pozostała niezmienna, natomiast sposób rozwiązania zagadnienia został znacznie zmodyfikowany. Szkic stanowiska do destrukcji formy piaskowej i chłodzenia odlewu przedstawiono na rysunku 6.

At present this technology is mostly developed in the United States of America both by research centres (AFS – *American Foundry Society*, *Armament Research Development & Engineering Centre*, CISA – *Casting Industry Suppliers Association*), and automotive companies of USCAR (*United States Council For Automotive Research*) – Ford, Chrysler and General Motors [7].

In 2008, in a contest organised by AFS, a support for a motorcycle frame made with the use of ablation casting technology received an award of distinction [8] (Fig. 4).

Another example of the use of this technology is an element fixing an outboard engine with a transom of a motorboat, which is presented in Fig. 5. The casting was created by the cooperation between Alotech and Mercury Marine [9].

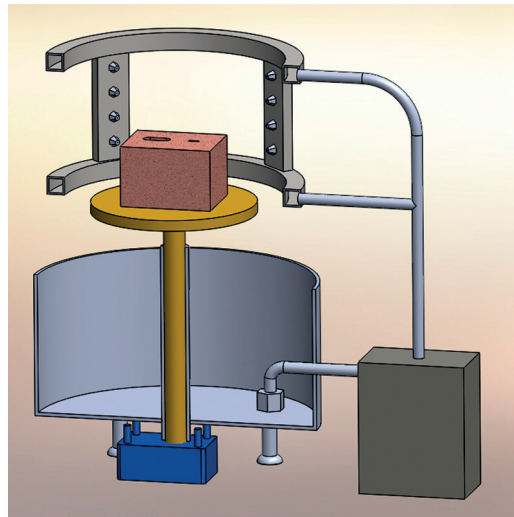


Rys. 5. Odlew pawęży wykonany z zastosowaniem technologii odlewania ablacyjnego [9]

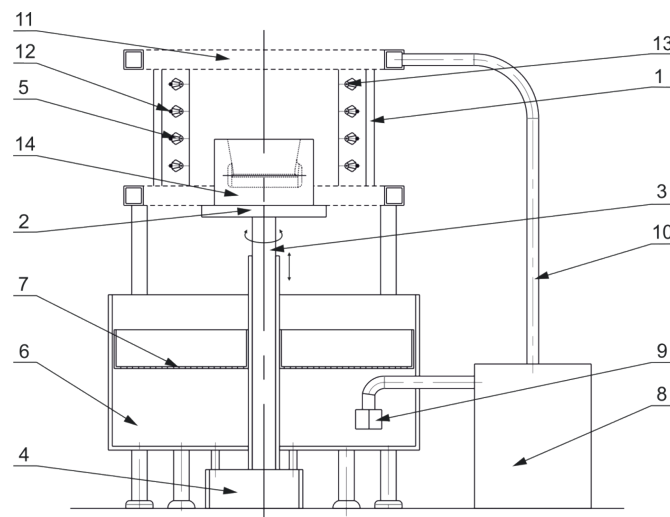
Fig. 5. A casting of a transom manufactured with the use of ablation casting [9]

2. The course of the research

In the Foundry Research Institute initial works to modify the ablation casting technology were made. Developed were assumptions for the construction of an experimental stand for the destruction of the sand mould with water jets under high pressure, an experimental research stand was prepared, casting attempts with the use of ablation as well as examinations of the obtained castings of aluminium alloy were made. The process known from the field literature and patents was significantly modified. The essence of the process (the destruction of the mould as a result of the operation of water jets with simultaneous cooling of the casting) remained unchanged, whereas the solution for the idea was considerably modified. The draft of a stand for the destruction of the sand mould and cooling the casting is presented in Figure 6.



Rys. 6. Schemat urządzenia do ablacyjnego usuwania masy formierskiej i kierunkowego chłodzenia odlewu
Fig. 6. A schematic of the equipment for ablation removing moulding sand and directional cooling of the casting



Rys. 7. Zasada działania urządzenia do destrukcji formy i kontrolowanego chłodzenia odlewu
Fig. 7. The principle of operation of the equipment for destroying casting moulds and controlled cooling of the casting

Sposób działania urządzenia do usuwania masy formierskiej z odlewu i jego chłodzenia według opracowanych założeń jest następujący (oznaczenia wg rysunku 7):

Formę piaskową (14) ustawia się na stole roboczym (2) wysuniętym poza obręb komory (1). Po zalaniu formy (14), z kontrolowaną prędkością ruchu obrotowego i pionowego stołu roboczego (2) wprowadza się ją do komory (1). Stół roboczy (2), obniżając się, wprowadza formę (14) w strefę działania dysz (5). Następuje rozbicie formy i chłodzenie odlewu oraz jego kierunkowe krzepnięcie. Zawiesina masy formierskiej w wodzie spływa do zbiornika (6), w którym na sicie (7) osadza się masa formierska z rozbitej formy (14), a woda pompą (8) przez filtr (9) przekazywana jest listwą rozpraszającą (11) do dysz (5). Po rozbiciu formy (14) stół roboczy (2) wysuwa się poza obręb komory (1) i wyjmuje się gotowy

The operation of the equipment for removing moulding sand from the casting and its cooling according to developed assumptions is as follows (markings according to Figure 7):

A sand mould (14) is placed on a working table (2) which is pulled outside the outline of the chamber (1). After pouring the mould (14), with a controlled speed of circular and vertical motion of the working table, the mould is introduced into the chamber (1). The working table (2) which is lowering introduces the mould (14) into the area of nozzles' operation (5). The destruction of the mould and cooling of the casting, as well as directional solidification occur. Suspension of moulding sand in water is drained to the tank (6), in which moulding sand from the destroyed mould (14) precipitates on the sieve (7) and water through the pump (8) and the filter (9) flows to nozzles (5) through the distribution

odlew. Integralną częścią urządzenia jest pompa wysokociśnieniowa firmy BOSCH umożliwiająca uzyskanie przepływu cieczy 6,5 l/min przy maksymalnym ciśnieniu 12 MPa.

Na podstawie ogólnych założeń wykonano urządzenie do ablacyjnego usuwania masy formierskiej i kierunkowego chłodzenia odlewu (rys. 8).

Urządzenie powstało we współpracy z prywatną firmą, która jest także jego wykonawcą.

Urządzenie do destrukcji formy piaskowej oraz kontrolowanego, kierunkowego chłodzenia odlewu zostało zgłoszone do Urzędu Patentowego RP i otrzymało numer P.404518.

line (11). After destroying the mould (14) the working table (2) pulls outside the outline of the chamber (1) and a ready-made casting is collected. The integral part of the equipment is the high-pressure pump manufactured by BOSCH which enables to achieve the flow of liquid 6.5 l/min at maximum pressure 12 MPa.

On the basis of general assumptions the equipment for ablation removing moulding sand and directional cooling of the casting was made (Fig. 8).

The equipment was created in cooperation with a private company which is also its producer.

The equipment for the destruction of the sand mould and controlled, directional cooling of the casting was filed to the Patent Office of the Republic of Poland and was assigned the number P.404518.



a)



b)

Rys. 8. Urządzenie do ablacyjnego usuwania masy formierskiej i kontrolowanego chłodzenia odlewu:

a) widok ogólny, b) ruchomy stół roboczy

Fig. 8. The equipment for ablation removing sand mould and controlled cooling of the casting:

a) general view, b) movable working table

Konstrukcja urządzenia pozwala na równoczesny ruch obrotowy i ruch w płaszczyźnie pionowej, co zapewnia równoczesne usuwanie formy za pomocą strumienia wody podawanej z dysz oraz kontrolowane kierunkowe chłodzenie odlewu. Ponadto ruch obrotowy stołu roboczego sprzyja dokładnemu wypłukaniu masy formierskiej ze wszystkich fragmentów zakrzepłego odlewu.

W celu określenia skuteczności działania urządzenia przeprowadzono serię badań. W pierwszej kolejności wykonano próby rozbicia formy piaskowej bez metalu. Założone parametry wydatku cieczy oraz prędkości obrotowej i w kierunku pionowym (ruch stołka w dół) okazały się wystarczającymi dla rozbicia formy, co przedstawiono na rysunku 9.

Następnie przystąpiono do prób zalewania formy stopem AlSi7Mg. W badaniach zastosowano następujące parametry:

- temperatura zalewania – $700 \pm 10^\circ\text{C}$,
- liczba obrotów – 20 obr/min,
- posuw pionowy – 30 cm/min,
- ciśnienie wody – 12 MPa.

The design of the equipment allows simultaneous circular and vertical motion which, at the same time, allows destroying the mould with water jets from nozzles and controlled directional cooling of the casting. Moreover, circular motion of the working table facilitates detailed destruction of moulding sand from all sections of the solid casting.

In order to determine the efficiency of equipment's operation a series of examinations was conducted. First, attempts were made to break the mould without metal. The assumed parameters of liquid output and the rotational and vertical speed (the motion of the table downwards) proved to have been sufficient to break the mould, which is presented in Figure 9.

Next, attempts were made to pour the mould with AlSi7Mg alloy. During the research the following parameters were used:

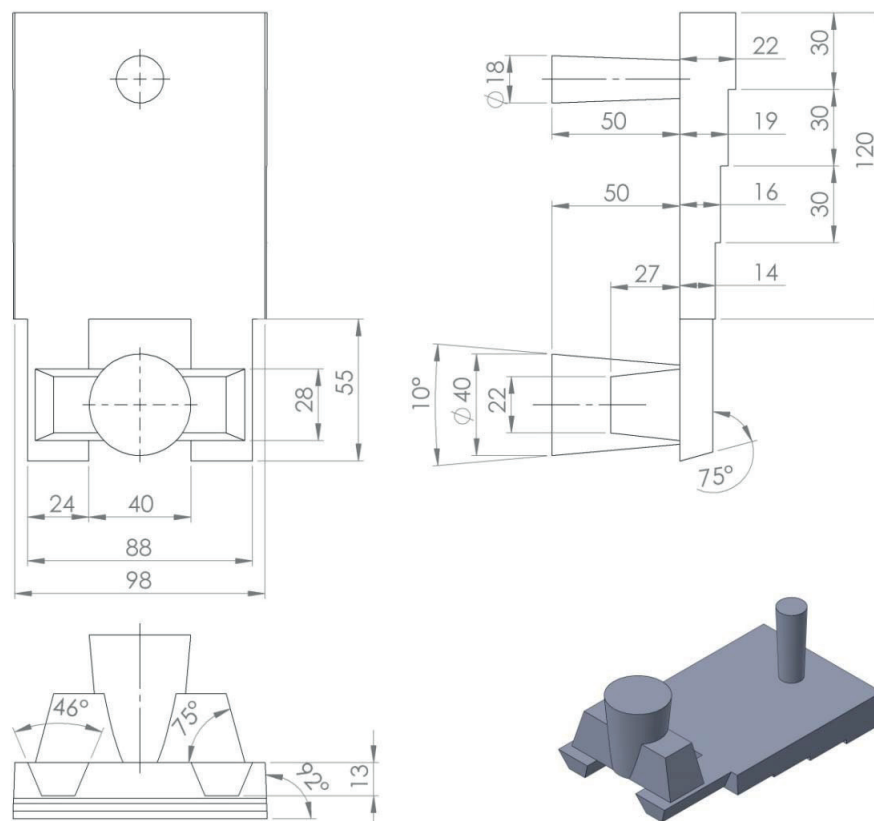
- pouring temperature – $700 \pm 10^\circ\text{C}$,
- rates – 20 rpm,
- vertical feed – 30 cm/min,
- water pressure – 12 MPa.



Rys. 9. Forma piaskowa rozbita w wyniku działania strumienia wody
Fig. 9. A sand mould broke as a result of the operation of water jets

Ze względu na łatwość i szybkość wykonania formy, do badań wybrano odlew schodkowy z klasycznym, mocno rozbudowanym układem wlewowym i jednym przelewem do odlewania w układzie poziomym, który przedstawiono na rysunkach 10 i 11. W większości odlewów zaobserwowano obiegnięcia przy przelewie, natomiast – po badaniu RTG – stwierdzono liczne rzadziny w postaci porowatości pochodzenia skurczowego i gazowego. W przypadku zbyt szybkiej destrukcji formy wystąpiły również znaczne odkształcenia (wypaczenie) odlewu (rys. 12).

Due to ease and speed of preparing the mould, a stepped casting was chosen with a traditional, highly complex gating system and one overflow for horizontal casting, which is presented in Figures 10 and 11. In the majority of castings shrinkage depressions were observed near the overflow, while – after the RTG examination – a lot of microshrinkages in the form of shrinkage and gas porosity. In case of excessive destruction of the mould significant deformations also occurred (warpage) of the casting (Fig. 12).

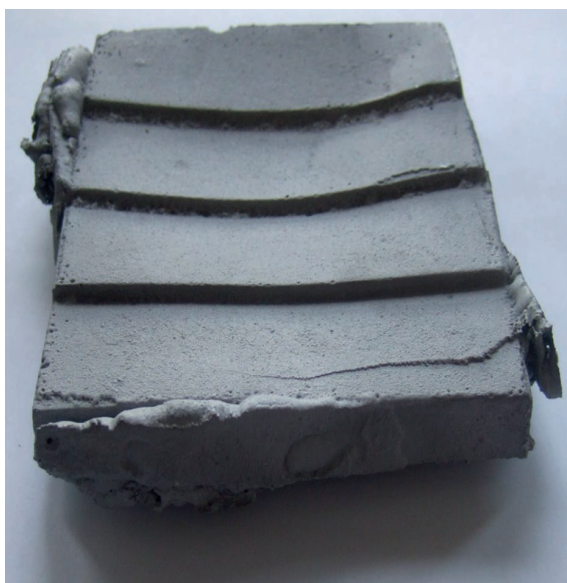


Rys. 10. Widok i wymiary odlewu eksperymentalnego
Fig. 10. The view and dimensions of the experimental casting

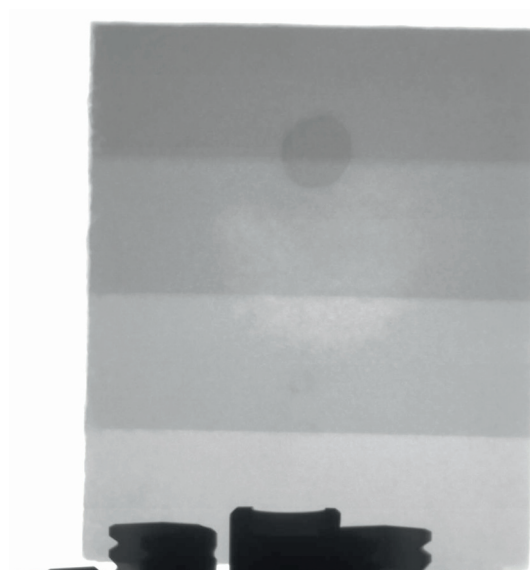


Rys. 11. Odlew wykonany z zastosowaniem technologii odlewania ablacyjnego

Fig. 11. A casting made with the use of ablation technique casting



a)



b)

Rys. 12. Odlew odkształcony w wyniku zbyt dużej szybkości chłodzenia a) oraz obraz RTG odlewu z widocznymi wadami porowatości b)

Fig. 12. A casting deformed as a result of too high speed of cooling a) and a radiograph of the casting with visible porosity defects b)

Odkształcenie odlewu wynika prawdopodobnie nie tylko z małej sztywności formy, ale i z ograniczonego oddziaływania strumienia wody na efekt chłodzenia środkowej części dość szerokiego odlewu. Świadczy to także o niewłaściwym położeniu odlewu w formie dla tej technologii odlewania. W odlewie powstają również duże naprężenia cieplne, a na powierzchni odlewów zaobserwowano znaczne obciążenia (rys. 12).

Z przedstawionych rezultatów wstępnych badań wynika, że dla tej technologii należy bardzo starannie dobrać kształt odlewu i konstrukcję układu wlewowego i zasilającego. W tym celu pomocnym narzędziem jest symulacja komputerowa procesu zalewania i krzepnięcia, jednakże celem obecnego etapu prac nie było opracowanie kompleksowej technologii odlewania ablacyjnego. Z tego powodu do dalszych badań wybrano inny kształt odlewu, o zróżnicowanej grubości ścianki (zmodyfikowana próba schodkowa), ale także

The deformation of the casting probably results not only from low rigidity of the mould but also from limited impact of water jets on the cooling effect of the middle part of a relatively wide casting. It also shows the incorrect positioning of the casting in the mould for this casting technology. In the casting there occur high heat tensions and on the surface of castings considerable shrinkage depressions were observed (Fig. 12).

From the presented preliminary research results it can be seen that for this technology the shape of the casting and design of the gating system should be carefully selected. To this end, a helpful tool is computer simulation of pouring and solidification, however the aim of the present stage of works was not to develop a comprehensive technology for ablation casting. Due to this fact for further research a different shape was selected with a differentiated wall thickness (modified stepped test), also with altered gating system. Such

o zmienionym układzie wlewowym. Taki wybór kształtu odlewu – oprócz priorytetowych badań destrukcji formy piaskowej – miał na celu określenie ewentualnych zmian w mikrostrukturze odlewów wykonywanych w formie piaskowej intensywnie chłodzonych wodą podczas krzepnięcia.

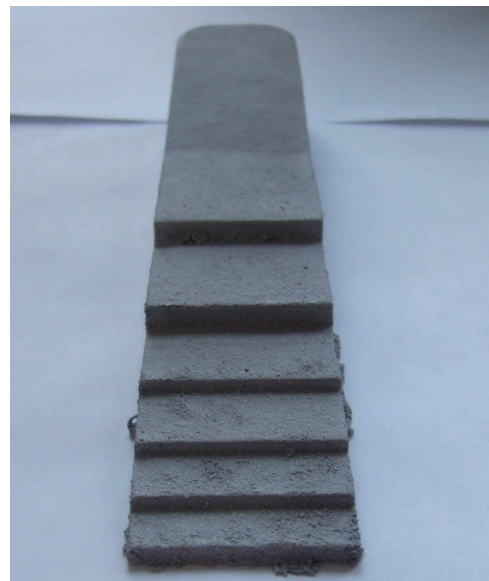
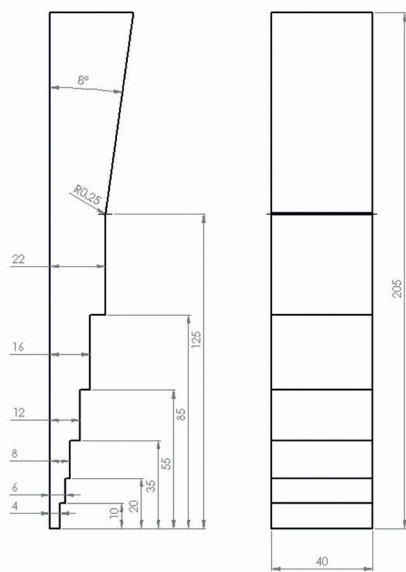
W badaniach zastosowano identyczne parametry jak w przypadku pierwszej próby. Kształt odlewu przedstawiono na rysunku 13.

Otrzymane odlewy poddano badaniom RTG w celu wykrycia nieciągłości strukturalnych. Wyniki przedstawiono na rysunku 14.

a choice of the shape of the casting – besides the destruction of the sand mould – was aimed at determining possible changes in the microstructure of castings made in a sand mould intensively cooled with water during the phase of solidification.

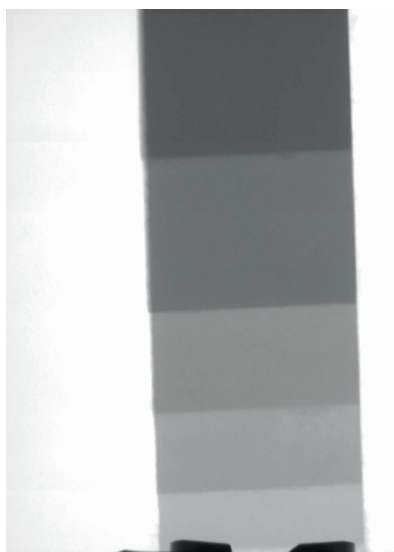
For the purposes of the research identical parameters were applied as in the case of the first attempt. The shape of the casting is presented in Figure 13.

The obtained castings underwent X-ray examinations in order to detect structural discontinuities. The results are presented in Figure 14.

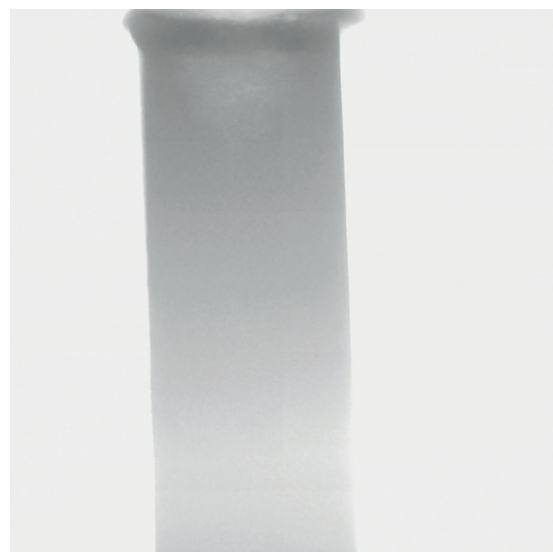


Rys. 13. Odlew eksperymentalny

Fig. 13. The experimental casting



a)



b)

Rys. 14. Rentgenogram odlewu wykonanego z zastosowaniem technologii odlewania ablacyjnego: a) przód, b) tył

Fig. 14. The radiograph of the casting made with the use of ablation casting: a) front, b) back

Na przedstawionym rentgenogramie porowatość i jama usadowa skoncentrowane są głównie w układzie wlewowym, na pozostałym obszarze brak tego typu wady.

Przeprowadzono analizę mikrostruktury odlewów wykonanych z wykorzystaniem ablacyjnego chłodzenia i destrukcji form oraz krzepnących w warunkach normalnych. Przykładowe mikrostruktury przedstawiono na rysunku 15.

Analizując obrazy mikrostruktur, należy zauważyć duże rozdrobnienie ziarna i eutektyki w odlewach wykonanych technologią ablacyjną. Potwierdzają to również badania SDAS (*Second Dendritic Arm Space*) przedstawione w tabelach 1 i 2. Pomiary odległości ramion II rzędu SDAS przeprowadzono za pomocą oprogramowania Axiovision, ZEISS. Pomiary wykonano na zarejestrowanych mikro fotografiach przy powiększeniu 100×. Zgłady trawiono w odczynniku Mi1Al.

In the presented radiograph porosity and shrinkage cavity are concentrated mainly in the gating system; the remaining area does not have these types of defects.

The analysis of the microstructure of castings was made with the use of ablation cooling and destruction of moulds under normal conditions. Exemplary microstructures are presented in Figure 15.

Analysing the images of microstructures it should be noticed that there are large defragmentations of the grain and eutectics in castings made with the ablation technology. It is also proved by SDAS (*Second Dendritic Arm Space*) research which is presented in Tables 1 and 2. The measurements of Second Dendritic Arm Space were made with the use of Axiovision software by ZEISS. The measurements were made on recorded microphotographs at the magnification 100×. Metallographic specimens were etched in Mi1Al agent.

Tabela 1. Wyniki pomiarów SDAS przeprowadzonych na próbkach z odlewu wykonanego z zastosowaniem klasycznej technologii odlewania do formy piaskowej

Table 1. The results of SDAS measurements conducted on samples from the casting made with the use of the traditional technology of casting into a sand mould

Numer pomiaru / Measurement number	SDAS dla grubości ścianki / SDAS for the thickness of wall, μm				
	3 mm	6 mm	9 mm	12 mm	15 mm
1	25	27	23	34	37
2	20	24	30	34	38
3	18	20	28	39	45
SDAS średnia / SDAS mean	21	24	27	36	40

Tabela 2. Wyniki pomiarów SDAS przeprowadzonych na próbkach z odlewu wykonanego z zastosowaniem technologii ablacyjnego odlewania do formy piaskowej

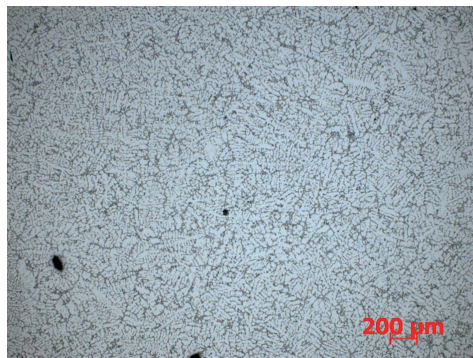
Table 2. The results of SDAS measurements conducted on samples from the casting made with the use of ablation casting into a sand mould

Numer pomiaru / Measurement number	SDAS dla grubości ścianki / SDAS for the thickness of wall, μm				
	3 mm	6 mm	9 mm	12 mm	15 mm
1	15	26	26	36	36
2	13	20	20	39	38
3	15	22	27	44	32
SDAS średnia / SDAS mean	14	23	24	40	35

W celu określenia, czy założone parametry gwarantują kierunkowość krzepnięcia odlewu przeprowadzono badania mikrostruktury na próbkach wyciętych z każdej grubości ścianki odlewu. Przykładowe wyniki przedstawiono na rysunku 16.

In order to determine whether the assumed parameters guarantee directional solidification of the casting an examination of the microstructure of samples cut from each wall thickness of the casting was conducted. Exemplary results are presented in Figure 16.

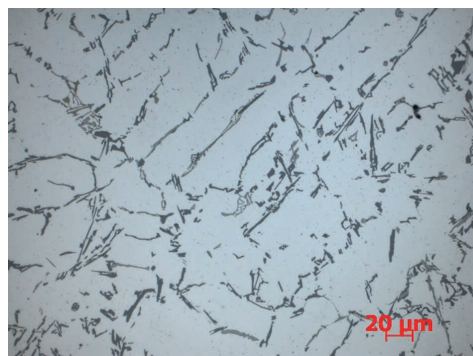
Klasyczna technologia / Traditional technology



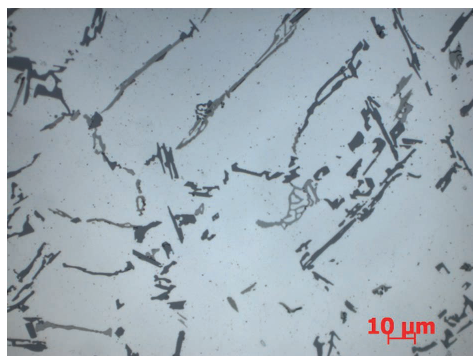
Pow. 50×



Pow. 100×

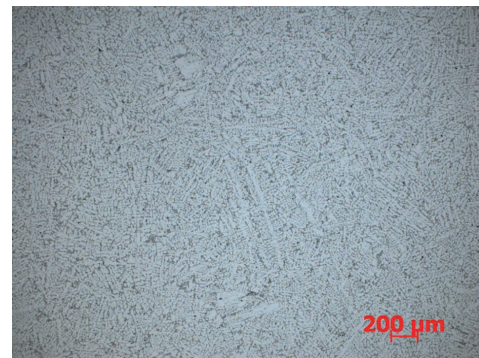


Pow. 500×

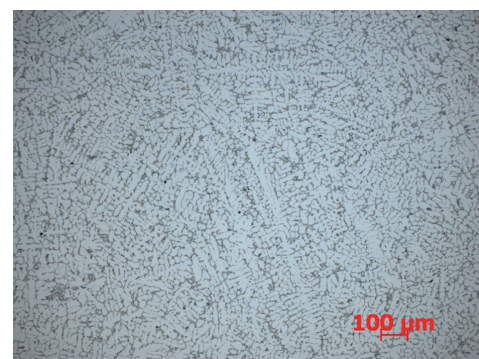


Pow. 1000×

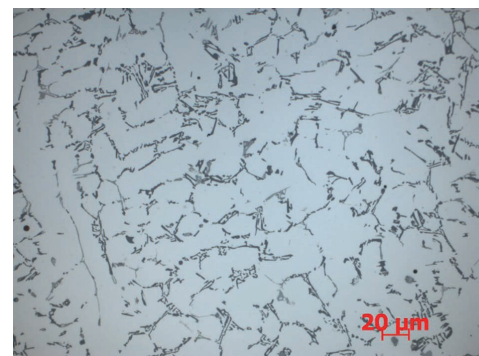
Odlewanie ablacyjne / Ablation casting



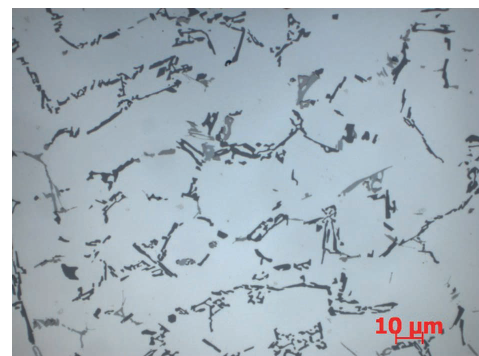
Pow. 50×



Pow. 100×



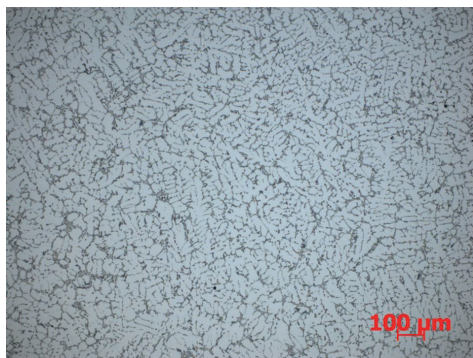
Pow. 500×



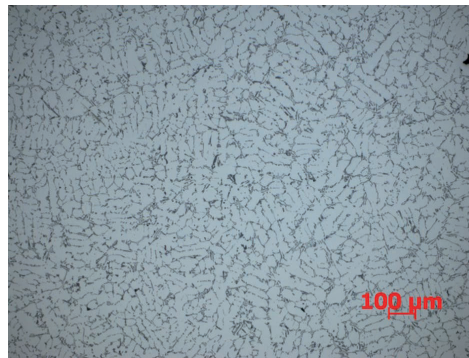
Pow. 1000×

Rys. 15. Porównanie mikrostruktur odlewu ze stopu AK7 wykonanego z wykorzystaniem klasycznej technologii oraz technologii odlewania ablacyjnego do formy piaskowej (grubość ścianki odlewu 16 mm)

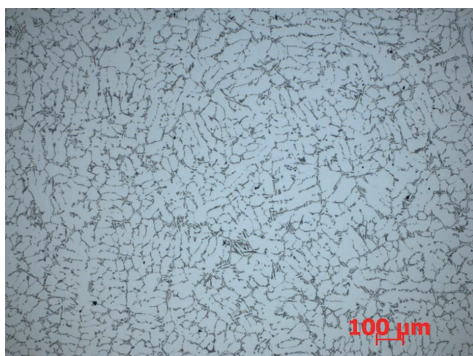
Fig. 15. The comparison of microstructures of a casting made of AK7 alloy produced with the use of the traditional technology and ablation casting in sand moulds (wall thickness of the casting 16 mm)



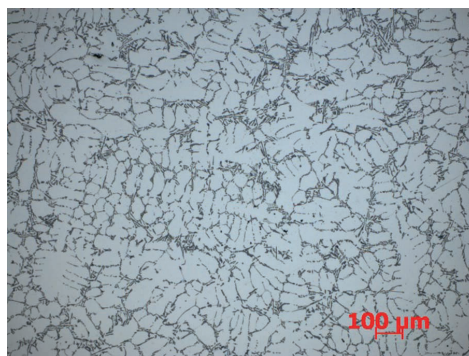
Powiększenie 100×, grubość ścianki odlewu 3 mm



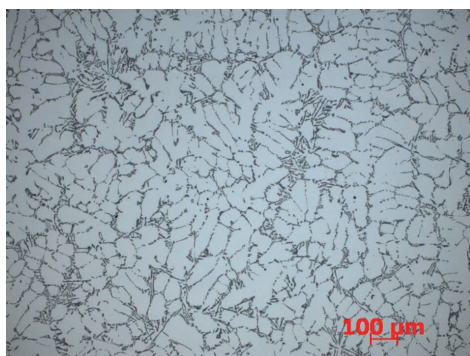
Powiększenie 100×, grubość ścianki odlewu 6 mm



Powiększenie 100×, grubość ścianki odlewu 9 mm



Powiększenie 100×, grubość ścianki odlewu 12 mm



Powiększenie 100×, grubość ścianki odlewu 15 mm

Rys. 16. Porównanie mikrostruktur odlewów wykonanych z zastosowaniem technologii odlewania ablacyjnego w zależności od grubości ścianki odlewu

Fig. 16. The comparison of microstructures of the castings made with the use of ablation casting in relation to the casting's wall thickness

Na podstawie zamieszczonych struktur można stwierdzić, że istnieje dość duże różnicowanie mikrostruktury, część odlewu krzepnąca najszybciej (najmniejsza grubość ścianki) wykazuje strukturę bardzo rozdrobnioną, w miarę wzrostu grubości ścianki (wolniejsze krzepnięcie) struktura jest bardziej gruboziarnista. Takie same wnioski można wysnuć z analizy pomiarów SDAS. Świadczy to o kierunkowym krzepnięciu odlewu, które rozpoczyna się w częściach o najmniejszym przekroju, następnie obejmuje części coraz grubsze i kończy się w części najgrubszej, stanowiącej tzw. nadlew. Podczas prawidłowego krzepnięcia cała objętość jamy skurczowej powinna się znaleźć w nadlewie. Widoczne

On the basis of the presented structures it can be stated that there exists a large differentiation of the microstructure, the part of the casting which solidifies the fastest (the lowest thickness of the wall) shows very fragmented structure, together with the increase of the thickness of the wall (slower solidification) the structure has thicker grains. The same conclusions can be drawn from the analysis of SDAS measurements. It shows directional solidification which starts in parts with the thinnest cross-section, then it involves thicker parts and finishes in the thickest part which constitutes the so-called riser. During correct solidification the whole volume of the shrinkage cavity should be in the riser. It

jest to na rentgenogramach (rys. 14). Powyższe badania potwierdzają prawidłowość założonych parametrów technologicznych (szybkość i intensywność chłodzenia odlewu).

3. Podsumowanie

Technologia odlewania ablacyjnego budzi zainteresowanie głównie przemysłu w Ameryce Północnej, nie tylko z uwagi na korzyści ekonomiczne, ale również dlatego, iż jest przyjazna dla środowiska (m.in. ze względu na możliwość regeneracji masy formierskiej, brak zapylenia przy usuwaniu formy). Krajowe odlewnie obecnie nie stosują tej metody wykonywania odpowiedzialnych odlewów, ale opanowanie tego procesu i wdrożenie w krajowych odlewniach może znacząco podnieść ich konkurencyjność. Skonstruowane urządzenie, aczkolwiek skuteczne w przeprowadzonych badaniach, nie daje jednoznacznej odpowiedzi czy w przypadku większych (grubszych form) okaże się równie skuteczne.

Należy jednak podkreślić, że wstępne próby potwierdziły możliwość wykonywania w formach piaskowych odlewów, charakteryzujących się dość dużym rozdrobnieniem mikrostruktury.

Podziękowania

Artykuł powstał w oparciu o wyniki badań wykonanych w ramach realizacji w 2013 roku pracy statutowej, pt.: „Opracowanie założeń techniczno-technologicznych do zmodyfikowanej metody wykonywania odlewów z wykorzystaniem zjawiska ablacji” (zlec. 3010/02), finansowanej przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura/References

1. Weiss D., Grassi J., Schultz B., Rohatgi P. (2011). Ablation of Hybrid Metal Matrix Composites. *AFS Proceedings*, <http://www.afsinc.org/files/mcdp/stories/magazine/webonly/11-057.pdf>
2. Grassi J., Campbell J., Hartlieb M., Major F. (2009). The Ablation Casting Process. *Mater. Sci. Forum*, 618–19, 591–594.
3. Weiss D., Schultz B., Rohatgi P. (2012). Discovering Ablation. *Metal Casting Design & Purchasing*, January/February, 36–39.
4. Weiss D., Grassi J., Schultz B., Rohatgi P. (2011). Testing the Limits of Ablation. *Mod. Casting*, December, 26–29.
5. US Patent no. 2008/0041499A1.
6. Tan Derui, Lian Haiping. (2010). The ancient Chinese casting techniques. *69th WFC Paper*, <http://www.foundryworld.com/uploadfile/201131449329893.pdf>
7. *Aluminum Mold Curing and Pouring/Ablation*, <http://www.afsinc.org>
8. Staff Report. (2008). AFS/ECS Casting Competition, *Mod. Casting*, May 2008, 22–27.
9. Zindel J.W. (2012). *Ablation Casting Evaluation for High Volume Structural Castings*. USA MP 17 May 2012.

can be seen in the radiographs (Fig. 14). The above-mentioned research proves the correctness of the assumed technological parameters (the speed and intensity of cooling of the casting).

3. Conclusions

The technology of ablation casting arouses interest mainly in the industry in North America not only due to economic benefits, but also because it is environmentally friendly. Other advantages include the possibility to reclaim moulding sand as well as the lack of dust while removing the mould. Nowadays national foundries do not use this method of producing reliable castings but fostering this process and implementing it in national foundries may significantly increase their competitiveness. The developed equipment, although effective in the conducted research, does not give an unequivocal answer whether in case of larger (thicker moulds) it will also turn out to be effective.

However, it should be stressed that the initial attempts proved the possibility to produce castings in sand moulds which are characterised by high fragmentation of the microstructure.

Acknowledgements

This article was written on the basis of results of the research conducted within the framework of the execution of the statutory operation entitled: ‘The development of technical-technological assumptions for the modified method of producing castings with the use of the phenomenon of ablation’ (order 3010/02), financed by the Ministry of Science and Higher Education.

