

## Próby ciśnieniowego odlewania żeliwa białego

### Tests to produce a white cast iron die casting

Zbigniew Konopka<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów, Katedra Odlewnictwa, ul. Armii Krajowej 19, 42-200 Częstochowa

<sup>1</sup>Czestochowa University of Technology, Faculty of Production Engineering and Materials Technology, Department of Foundry Engineering, ul. Armii Krajowej 19, 42-200 Częstochowa

E-mail: konopka@wip.pcz.pl

#### Streszczenie

Celem badań było określenie możliwości wytworzenia odlewów z żeliwa z wykorzystaniem różnych metod odlewania ciśnieniowego oraz ocena mikrostruktury tych odlewów i analiza procesu. Wykonano odlewy z żeliwa białego, które następnie wyżarzano na żeliwo ciągliwe. Stwierdzono przydatność metody ciśnieniowego odlewania do wykonywania odlewów z żeliwa i korzystny wpływ metody na zabieg obróbki cieplnej.

*Słowa kluczowe:* żeliwo białe, odlewanie ciśnieniowe, obróbka cieplna, żeliwo ciągliwe, mikrostruktura

#### Abstract

The manufacturing of cast iron castings by pressure die casting method, evaluation of castings microstructure and process analysis were the purpose of the experiments. White cast iron castings were fabricated and then these castings were annealed. The malleable cast iron castings were obtained this way. The capability of pressure die casting method for cast iron castings manufacturing was stated.

*Key words:* white cast iron, die casting, heat treatment, malleable cast iron, microstructure

#### 1. Wprowadzenie

Metoda odlewania ciśnieniowego obecnie stosowana jest głównie do wytwarzania odlewów ze stopów: cynku, aluminium i magnezu, a także w mniejszym zakresie ze stopów niskotopliwych oraz ze stopów miedzi. Do niedawna ograniczeniem stosowania tej metody do wykonywania odlewów ze stopów żelaza (staliwo, żeliwo) była wysoka temperatura odlewania tych metali, co wymaga zastosowania lepszych materiałów i spełnienia odpowiednich wymagań związanych z procesem technologicznym. Jest to najlepsza metoda wytwarzania odlewów precyzyjnych na skalę wielkoseryjną ze względu na swoje niezaprzeczalne zalety, takie jak: duża dokładność wymiarowa i wysoka gładkość powierzchni bez wad – co eliminuje obróbkę mechaniczną, możliwość wytwarzania cienkościennych odlewów o złożonych kształtach, drobnoziarnista struktura i wysokie właściwości mechaniczne, fizyczne

#### 1. Introduction

The pressure die casting method used currently is mainly applied to the production of castings of zinc, aluminium and magnesium alloys, and as well – to a lesser degree – to low-melting and copper alloys. Until recently, the use of this method of iron (cast steel, cast iron) alloy castings production was limited by the high casting temperature of these metals, which requires using superior materials and meeting specific requirements related to the technological process. It is the best method of large series manufacturing of precision castings, due to its undeniable advantages, such as: high dimensional accuracy and high surface smoothness without faults – which eliminates mechanical processing, the possibility to manufacture thin-walled castings of complex shapes, fine-grain structure and good mechanical, physical and special properties. The high process efficiency, minimising of casting

i specjalne. Duża wydajność procesu, zminimalizowanie pracy oczyszczania i wykańczania odlewów czynią tę technologię także bardzo efektywną pod względem kosztowym [1].

Precyzyjne odlewy ciśnieniowe z żeliwa czy staliwa, ze względu na dużą dokładność wymiarową, bardzo dobre właściwości mechaniczne oraz specjalne, spełniają w pełnym zakresie wymagania przemysłu motoryzacyjnego, energetycznego, chemicznego czy budowy maszyn.

Obecnie do wytwarzania tego typu odlewów stosuje się przede wszystkim metodę wytapianych modeli. Wydajność tej metody oraz nakłady finansowe związane z przygotowaniem form sprawiają jednak, że ceny odlewów precyzyjnych z żeliwa szarego produkowanych w odlewniach krajowych są wysokie.

Wytworzenie na skalę wielkoseryjną precyzyjnych odlewów z żeliwa stanowi bardzo poważny problem technologiczny związany, z jednej strony, z procesem metalurgicznym przygotowania metalu do odlewania, z drugiej zaś, z technologią odlewania i ewentualnymi zabiegami obróbki cieplnej.

W zależności od rodzaju odlewanej żeliwa (szare z grafitem płatkowym, z grafitem kulkowym, białe jako wyjściowe do wytwarzania żeliwa ciągliwego lub stopowe o specjalnych właściwościach) muszą być zastosowane różne warianty odlewania ciśnieniowego, obejmujące metalurgię i sposób przygotowania metalu do odlewania oraz warunki i parametry odlewania. W zakresie przygotowania metalu do odlewania wymienić tu można: odlewanie ze stanu ciekłego z zastosowaniem ewentualnej obróbki cieplnej odlewu i odlewanie ze stanu ciekło-stałego. Wymagania takie pojawiają się ze względu na właściwości mikrostruktury danego rodzaju żeliwa, a także warunki prowadzenia procesu metalurgicznego.

W przypadku żeliwa z grafitem płatkowym długie przetrzymywanie ciekłego metalu grozi zgarem pierwiastków, zmniejszeniem zdolności do grafityzacji i w konsekwencji krystalizacją cementytu (zabieleń), co jest wadą struktury odlewów. W tym przypadku możliwe jest usunięcie powstałych zabieleń przez krótkotrwałe wyżarzanie grafityzujące. W żeliwie z grafitem kulkowym długie przetrzymywanie żeliwa w stanie ciekłym powoduje zmianę jego składu chemicznego, związaną głównie z wyparowaniem takich pierwiastków, jak Mg czy Ca, co wywołuje zanik efektu sferoidyzacji i modyfikacji. W tym przypadku skutecznym rozwiązaniem jest odlewanie ze stanu ciekło-stałego. Odlewanie ciśnieniowe żeliwa białego ze stanu ciekłego nie grozi poważnymi zmianami mikrostruktury, a silne rozdrobnienie struktury będące skutkiem dużej szybkości krystalizacji odlewu jest wyjątkowo korzystne w dalszym zabiegu obróbki cieplnej, w której uzyskuje się różne gatunki żeliwa ciągliwego przez intensyfikację kinetyki wyżarzania grafityzującego.

cleaning and finishing works make this technology highly cost-efficient as well [1].

Due to high dimensional precision, very good mechanical and special properties, precision pressure die castings of cast iron or cast steel fully meet the requirements of the automotive, power, chemical or machinery construction industries.

Currently, the lost-wax method is predominantly used for production of castings of this type. However, the method's efficiency and expenditures involved in preparing moulds make grey cast iron casting prices from Polish foundries expensive.

Large series production of precision cast iron castings constitutes a significant technological problem related to, on the one hand, the metallurgic process of preparing the metal for casting, and on the other hand, with the die casting technology and possible thermal treatment procedures.

Depending on the type of the cast iron being die-cast (grey with flake graphite, with modular graphite, white as starting material for production of malleable cast iron or alloy with special properties), different variants of pressure die casting must be employed, covering the metallurgy and method of preparing the metal for die casting, as well as die casting conditions and parameters. Concerning the preparation of metal for die casting, the following can be mentioned: liquid die casting using casting thermal treatment and liquid-solid die casting. Such requirements arise due to the microstructure properties of the given cast iron type, as well as conditions of conducting the metallurgic process.

In the case of cast iron with flake graphite, keeping the liquid metal for long detention periods poses a danger of melting losses of elements, reducing the capability for graphitisation, and as a consequence, crystallisation of cementite (hard spot formation), which is a structural fault of castings. In this case, the hard spots can be removed by short graphitising annealing. In cast iron with modular graphite, keeping the cast iron in liquid state for long detention periods results in modifications of its chemical composition, related mainly to evaporation of such elements as Mg or Ca, which causes the spheroidisation and modification effect to disappear. In this case, an effective solution is to use liquid-solid die casting. Liquid pressure die casting of white cast iron creates no danger of significant microstructure changes, and the highly fragmented structure, resulting from the high crystallisation speed of castings, is very advantageous during the thermal treatment process, when various grades of malleable cast iron are acquired through intensification of kinetics of the graphitising annealing.

Zastosowanie odlewania w stanie ciekło-stałym powoduje zmniejszenie ilości ciepła wydzielonego z odlewu podczas krystalizacji i obniżenie temperatury odlewania poniżej 1150°C. Stosowane są procesy *rheocasting* i *thixocasting*.

W procesie *rheocasting* ciekło-stała mieszanina – wytworzona najczęściej w procesie mieszania – jest prasowana bezpośrednio w formie. W tym procesie istnieje niebezpieczeństwo wprowadzenia powietrza i wtrąceń do mieszaniny w trakcie jej przygotowania, co obniża jakość odlewu. Ze względu na określoną cykliczność i wydajność odlewania mogą także pojawić się problemy z utrzymaniem określonego składu chemicznego mieszaniny. Procesowi wytwarzania zawiesiny towarzyszy często wyjątkowo korzystne zjawisko niszczenia struktury dendrytycznej i zastępowania jej kulistymi, silnie rozdrobnionymi kryształami równoosiowymi. Odlewy z taką mikrostrukturą cechują się znacznie lepszymi właściwościami mechanicznymi od tych posiadających strukturę dendrytyczną. Dodatkowo dalsze rozdrobnienie struktury w odlewie uzyskuje się w wyniku szybkiej krystalizacji i chłodzenia metalu w metalowej formie. Aby uzyskać strukturę pierwotną rozdrobnioną szybkość chłodzenia ciekłego żeliwa nie może być mniejsza niż 1 K/s. Przy tej szybkości może już powstać częściowo ledeburyt, ale podczas krótkotrwałego podgrzewania ulega on rozpuszczeniu a struktura pozostaje rozdrobniona. Taki wariant odlewania ciśnieniowego jest wskazany dla żeliwa szarego i białego.

W metodzie *thixocasting* wcześniej przygotowany wlewek krystalizujący w warunkach statycznych jest podgrzewany w komorze prasowania do stanu ciekło-stałego w ciągu kilku sekund. W tej metodzie, podczas odlewania, dendrytyczne kryształy łączą się ze sobą tworząc dużą bryłę, która przemieszcza się do formy i pozostaje w odlewie. W rezultacie tylko ciecz z mieszaniny ulega krystalizacji i w konsekwencji uzyskuje się niejednorodną strukturę odlewów. Dlatego wlewki z żeliwa powinny być przygotowywane ze strukturą kryształów równoosiowych. Drobnodziarnistą strukturę odlewu ciśnieniowego uzyskuje się, gdy stosowany wlewek ma również strukturę drobnodziarnistą. Takie struktury wlewków można uzyskać stosując następujące metody: mieszanie w czasie krystalizacji, modyfikacja i rozdrobnienie ziaren eutektycznych czy obróbka cieplno-plastyczna statycznie krzepnącego wlewka, mało efektywna ze względu na małą plastyczność żeliwa. Niejednorodności struktury dotyczą także wydzieleń grafitu ponieważ podczas nagrzewania wlewka część grafitu może się nie rozpuścić i w strukturze odlewu wystąpi silne zróżnicowanie wielkości wydzieleń grafitu. Jednorodną mikrostrukturę żeliwa sferoidalnego uzyskuje się, gdy wielkość (średnica) wydzieleń grafitu jest mniejsza niż 100 µm. Taki wariant metody ciśnieniowego odlewania zalecany jest dla odlewów z żeliwa sferoidalnego [2].

Utilising liquid-solid die casting reduces the amount of heat generated by the casting during crystallisation, and reduces the die casting temperature below 1150°C. Rheocasting and thixocasting processes are used.

In the rheocasting process, the liquid-solid mixture – most commonly created by stirring – is pressed directly in the mould. In this process, there is a danger of introducing air and inclusions into the mixture during its preparation, which lowers casting quality. Due to the specific cyclicity and efficiency of die casting, problems with maintaining the specific chemical composition of the mixture may also arise. The mixture creation process is often accompanied by an extremely advantageous phenomenon of dendritic structure destruction and its replacement by spherical, highly fragmented equiaxial crystals. Castings with such microstructure are characterised by significantly better mechanical properties than those with dendritic structure. Additionally, further fragmentation of the casting structure is achieved by fast metal crystallisation and cooling in the metal form. In order to acquire a fragmented primary structure, the cooling rate of liquid cast iron must be no lower than 1 K/s. At this rate, ledeburite can partially form, though it is dissolved even during short-term heating, and the structure remains fragmented. Such a variant of pressure die casting is recommended for grey and white cast iron.

In the thixocasting method, a previously prepared crystallising ingot is heated under static conditions in the pressing chamber, so that it reaches the liquid-solid state within several seconds. In this method, dendritic crystals combine with each other during casting, forming a large lump that moves to the mould and remains in the casting. As a result, only the liquid from the mixture undergoes crystallisation. Consequently, non-uniform structure of castings is achieved. For this reason, cast iron ingots should be prepared with uniaxial crystal structure. Fine-grain structure of the pressure casting is achieved, when the ingot utilised also has a fine-grain structure. Such ingot structures can be achieved by using the following techniques: mixing during crystallisation, modification and fragmentation of eutectic grains, or thermal and plastic treatment of statically solidifying ingot, the method has poor effectiveness due to low plasticity of cast iron. Non-uniformity of structure also applies to precipitates of graphite, since part of the graphite during ingot heating may not dissolve, thus significant differences in graphite precipitate size is present in the casting structure. Uniform microstructure of spheroidal cast iron is achieved when size (diameter) of graphite precipitates is smaller than 100 µm. This variant of the pressure die casting method is recommended for spheroidal cast iron castings [2].

Właściwości technologii odlewania ciśnieniowego żeliwa określają, z jednej strony, stworzenie optymalnych warunków pracy maszyny i formy, z drugiej zaś, takich warunków odlewania, które gwarantują najwyższą jakość odlewu. Chodzi więc tutaj o dobór najbardziej odpowiedniego materiału na formę zapewniającego jej znaczną trwałość.

Podczas odlewania warstwa powierzchniowa formy narażona jest na cykliczne rozszerzanie cieplne. Warstwy formy głębiej położone silnie hamują takie rozszerzanie i w rezultacie w warstwie tej powstają naprężenia ściskające, które można obliczyć z następującej zależności [3]:

$$\sigma = \frac{\alpha(T_{pf} - T_o)E}{1 - \nu} \quad (1)$$

gdzie:  $\alpha$  – współczynnik rozszerzalności liniowej materiału formy,  $T_{pf}$  i  $T_o$  – odpowiednio temperatura warstwy powierzchniowej formy i temperatura początkowa formy,  $\nu$  – liczba Poissona,  $E$  – moduł Younga.

Obliczone z równania (1) naprężenia dla przyjętych wartości temperatury  $T_{pf} = 1200^\circ\text{C}$  i  $T_o = 400^\circ\text{C}$  mają następujące wartości dla wybranych materiałów formy:  $\sigma_{\text{Cu}} = 1900$  MPa,  $\sigma_{\text{stal}} = 2900$  MPa i  $\sigma_{\text{Mo}} = 1800$  MPa. Przewodność cieplna materiału formy nie jest jawnie reprezentowana w równaniu (1), ale decyduje o temperaturze  $T_{pf}$ .

Duża wartość przewodności cieplnej zmniejsza gradient temperatury w formie, co oznacza obniżenie jej temperatury na większej grubości warstwy powierzchniowej.

Z powyższej analizy wynika, że najlepszym materiałem na formę jest tworzywo o małym współczynniku rozszerzalności cieplnej, małym module Younga i dużej przewodności cieplnej. W takim materiale formy powstające w niej naprężenia będą najmniejsze, a jej trwałość będzie największa.

Z drugiej strony, z punktu widzenia wymiany ciepła z odlewem, materiał formy o większej wartości współczynnika przewodzenia ciepła powoduje zwiększenie szybkości krystalizacji i stygnięcia odlewu w formie. Dodatkowo znacznie mniejsze ciepło właściwe i ciepło krystalizacji żeliwa w porównaniu np. ze stopami aluminium skracają czas krystalizacji odlewu, co łącznie korzystnie oddziałuje na rozdrobnienie mikrostruktury, ale jednocześnie wyraźnie zmniejsza lejnosc metalu. Oznacza to konieczność szybszego wypełnienia wnęki formy gwarantującego uzyskanie odlewu bez niedolewów. Zwiększenie prędkości wypełniania nie stanowi problemu w wariacie ciśnieniowego odlewania ze stanu ciekłego, natomiast może to być ograniczeniem dla technologii odlewania ze stanu ciekło-stałego [4].

Badania odlewania żeliwa sferoidalnego z zawiesiny o temperaturze  $1160^\circ\text{C}$ , zawierającej 30% fazy

On the one hand, cast iron pressure die casting technology properties determine the creation of optimum conditions for equipment and mould operation, and on the other hand, such conditions of die casting guarantee the highest casting quality. It is therefore a matter of selecting the most suitable mould material that ensures its significant durability.

During die casting, the mould's surface layer is exposed to cyclic thermal expansions. Deeper mould layers strongly impede such expansion, which results in compressive stresses appearing in the layer, which can be calculated using the following relation [3]:

$$\sigma = \frac{\alpha(T_{pf} - T_o)E}{1 - \nu} \quad (1)$$

where:  $\alpha$  – mould material linear thermal expansion,  $T_{pf}$  and  $T_o$  – mould surface layer temperature and initial mould temperature, respectively,  $\nu$  – Poisson number,  $E$  – Young's modulus.

Stresses for the assumed temperature values  $T_{pf} = 1200^\circ\text{C}$  and  $T_o = 400^\circ\text{C}$ , calculated using formula (1), have the following values for selected mould materials:  $\sigma_{\text{Cu}} = 1900$  MPa,  $\sigma_{\text{stal}} = 2900$  MPa and  $\sigma_{\text{Mo}} = 1800$  MPa. Thermal conductivity of the mould material is not openly represented in equation (1), but it determines the temperature  $T_{pf}$ .

The high thermal conductivity reduces the temperature gradient in the mould, which means lowering its temperature in a larger portion of its surface layer. The above analysis indicates that the best mould material needs to have a low thermal expansion coefficient, low Young's modulus and high thermal conductivity. In such a mould material produced stress would be the lowest, and its durability – the highest.

On the other hand, from the perspective of heat exchange with the casting, mould material with a higher thermal conductivity coefficient increases the rate of crystallisation and cast cooling in the mould. Additionally, significantly lower specific heat and crystallisation heat of cast iron, compared to e.g. aluminium alloys, shorten the time of cast crystallisation, which – taken together – has an advantageous effect on microstructure fragmentation, although it also significantly reduces castability of the metal at the same time. This means a necessity to fill the mould cavity more quickly, which guarantees acquiring a casting without misruns. Increasing the filling rate is not a problem in liquid pressure die casting, but it may be a limiting factor for the liquid-solid die casting technology [4].

Tests of spheroidal cast iron die casting using a suspension at  $1160^\circ\text{C}$ , containing 30% of solid phase, demonstrated the need to use a feeding inlet with a surface area no greater than 1/10 of that of the pressing piston, and a speed of 1 m/s during phase II [4]. In

stałej, wykazały konieczność zastosowania wlewu doprowadzającego o polu powierzchni przekroju nieprzekraczającym 1/10 pola powierzchni tłoka prasującego i prędkości w II fazie 1 m/s [4]. W celu zmniejszenia szybkości chłodzenia żeliwa w tulei prasowania wyłożono ją papierem izolacyjnym [5].

Zagadnienie ograniczenia strat ciepła odlewanej żeliwa było przedmiotem wielu badań i rozwiązań patentowych. Najczęściej stosowano metody spowolnienia wymiany ciepła między metalem a tuleją i formą polegające na nanoszeniu specjalnych powłok izolacyjnych lub wykładaniu tulei specjalnym papierem izolacyjnym [5, 6].

## 2. Przebieg badań

Przyjęto wariant odlewania ciśnieniowego żeliwa ze stanu ciekłego z założeniem zastosowania obróbki cieplnej odlewów. Odlewy z żeliwa białego podeutektycznego o następującym składzie chemicznym (w % wag.): 3,0% C; 2,1% Si; 0,55% Mn; 0,05% S i 0,10% P (Eutektyczny Równoważnik Węgla =  $C + 0,3Si + 0,36P = 3,66\%$ ), wykonano na zimnokomorowej, poziomej maszynie ciśnieniowej, o sile zwarcia 4000 kN. Do badań zastosowano jednonękową wkładkę z czystej miedzi w stalowej obudowie formy. Żeliwo wytopiono w indukcyjnym piecu tyglowym o pojemności 50 kg. Przyjęto następujące parametry odlewania ciśnieniowego: średnica tłoka prasującego – 60 mm, prędkość tłoka w I fazie – 0,5 m/s, prędkość tłoka w II fazie – 3 m/s i ciśnienie doprasowania w III fazie – 40 MPa. Temperatura odlewania wynosiła 1250°C, a temperatura formy (mierzona pirometrem) 400°C. Odlewy poddano obróbce cieplnej polegającej na wyżarzaniu grafityzującym w następujących warunkach: temperatura wyżarzania 950°C, czas wyżarzania 60 minut w atmosferze powietrza.

Na [rysunku 1](#) przedstawiono odlew ciśnieniowy z żeliwa białego o maksymalnej grubości ścianki 10 mm.

Na [rysunku 2](#) przedstawiono mikrostruktury żeliwa odlanego pod ciśnieniem i porównawczo odlewanej grawitacyjnie do formy stalowej. Z kolei na [rysunku 3](#) zobrazowano mikrostrukturę żeliwa ciągliwego czarnego.

W mikrostrukturze żeliwa białego odlanego grawitacyjnie widoczne są jasne płytkowe wydzielania cementytu eutektycznego i kolonie perlitu (ciemne pola), rozwinięta forma płytek cementytu powstała najprawdopodobniej wskutek bardzo szybkiego odprowadzenia ciepła do formy i bardzo szybkiego procesu krystalizacji odlewu. W mikrostrukturze odlewu ciśnieniowego cementyt  $M_3C$  został rozdrobniony prawdopodobnie w wyniku intensywnego mieszania metalu we wlewie w czasie wypełniania wnęki formy. Widoczne są wydzielania eutektyki cementytowej.

order to reduce the cooling rate of cast iron in the sleeve, it was inlaid with insulation paper [5].

The issue of limiting heat losses of cast iron during die casting has been subject to numerous tests and patent solutions. The most common methods of slowing down the heat exchange between the material and sleeve and mould involve applying special insulation coatings or inlaying the sleeve with special insulation paper [5, 6].

## 2. Testing

The liquid cast iron pressure die casting variant was employed, with assumed thermal treatment of castings. Subeutectic white cast iron castings with the following chemical composition (in wt.%): 3.0% C; 2.1% Si; 0.55% Mn; 0.05% S and 0.10% P (Eutectic Carbon Equivalent =  $C + 0.3Si + 0.36P = 3.66\%$ ) were conducted using a cold-chamber, horizontal pressure machine with 4000 kN of closure strength. A single-cavity inlay of pure copper in the steel mould housing was used in the tests. The cast iron was smelted in an induction crucible furnace with 50 kg capacity. The following pressure die casting parameters were assumed: pressing piston diameter – 60 mm, piston speed during phase I – 0.5 m/s, piston speed during phase II – 3 m/s and compression pressure during phase III – 40 MPa. The die casting temperature was 1250°C, and mould temperature (measured with a pyrometer) – 400°C. The castings were thermally treated by way of graphitising annealing under the following conditions: annealing temperature 950°C, annealing time 60 minutes in air.

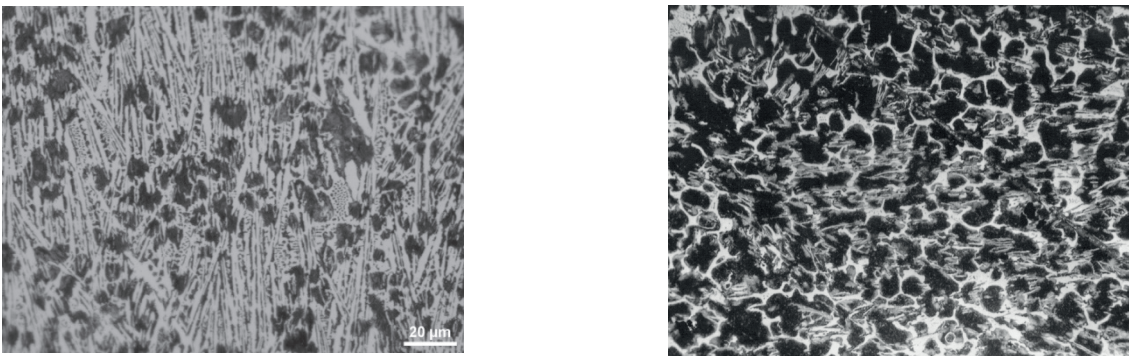
[Figure 1](#) presents a white cast iron pressure casting with a maximum wall thickness of 10 mm.

[Figure 2](#) presents microstructures of cast iron die-cast under pressure and, for comparison, those of cast iron gravity die-cast in an iron mould. [Figure 3](#) shows the microstructure of malleable black cast iron.

Bright plate precipitations of eutectic cementite and pearlite colonies (dark fields) are visible in the gravity die-cast white cast iron microstructure; the developed form of cementite plates was most probably formed as a result of very rapid heat removal to the mould and very rapid casting crystallisation. The  $M_3C$  cementite in the pressure casting microstructure was probably fragmented as a result of intensive metal stirring in the inlet during mould cavity filling. Cementite eutectic precipitations are visible.



Rys. 1. Zdjęcia ciśnieniowego odlewu z żeliwa białego  
Fig. 1. Pictures of a white cast iron pressure casting

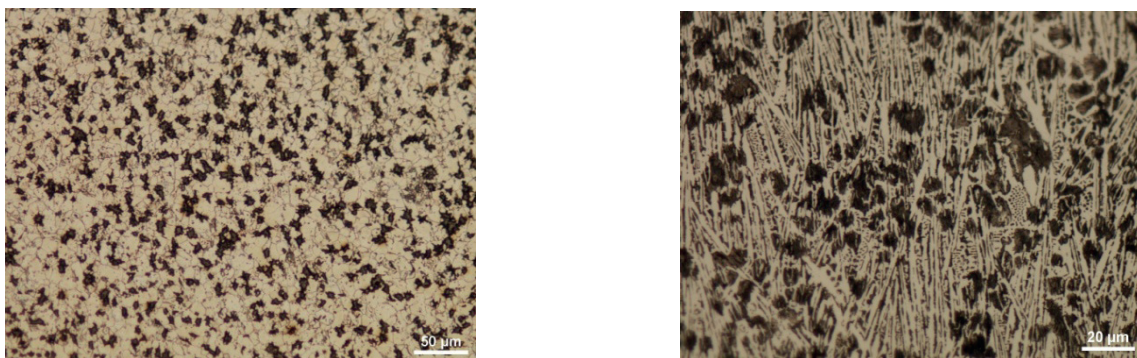


a)

b)

Rys. 2. Mikrostruktura żeliwa białego: a) odlanego grawitacyjnie do formy stalowej, b) odlanego ciśnieniowo, zgląd trawiony nitałem, pow. 500×

Fig. 2. White cast iron microstructure: a) gravity die-cast in a steel mould, b) pressure die-cast, specimen etched with nital, 500× magnification



a)

b)

Rys. 3. Mikrostruktura badanego żeliwa po wyżarzaniu grafityzującym: a) pow. 100×, b) pow. 500×

Fig. 3. Microstructure of the tested cast iron after graphitising annealing: a) magnif. 100×, b) magnif. 500×

W mikrostrukturze żeliwa ciągliwego osnowa odlewu jest ferrytyczna z wydzieleniami zwartego grafitu żarzenia. Taka postać grafitu żarzenia jest charakterystyczna dla odlewów grubościennych, jak również dla żeliwa zbyt długo przetrzymwanego w kadzi, co wywołuje zanik działania żelazokrzemu. Po zabiegu obróbki cieplnej mikrostruktura żeliwa jest drobnoziarnista z równomiernie rozmieszczonymi wydzieleniami grafitu

The casting matrix in the malleable cast iron microstructure is ferritic, with dense annealing graphite precipitations. Such a form of annealing graphite is characteristic of thick-wall castings, as well as of cast iron that was kept in the vat for too long, which causes the ferrosilicon effect to decline. After the thermal treatment procedure, cast iron microstructure is fine-grained, with graphite precipitations (annealing graphite) uniformly

(grafit żarzenia) w całej objętości próbki. Taka korzystna mikrostruktura wynika z dużej szybkości krystalizacji metalu w formie ciśnieniowej.

### 3. Podsumowanie

Na podstawie uzyskanych wyników badań i przeprowadzonej analizy można wysunąć następujące wnioski:

1. Wytwarzanie odlewów ciśnieniowych z żeliwa stanowi poważny problem technologiczny ze względu na wysoką temperaturę procesu i specyfikę krystalizacji odlewu i kształtowania jego mikrostruktury, a tym samym właściwości.
2. Optymalizacja wszystkich niezbędnych parametrów technologicznych daje duże szanse na zastosowanie tej technologii do wytwarzania odlewów z żeliwa białego. Ścisłe przestrzeganie wytycznych odlewania zapobiegnie lub w dużym stopniu zmniejszy skłonność żeliwa do zabeleń, naprężeń skurczowych i cieplnych oraz porowatości gazowej w odlewie.
3. Materiały na formy ciśnieniowe powinny się charakteryzować wysoką odpornością na zmiany temperatury, zmęczenie, erozję oraz posiadać duży współczynnik przewodności cieplnej. Wymagania te spełniają: stopy molibdenu, stopy wolframu oraz stale i staliwa stopowe.
4. Należy podkreślić, że ciśnieniowe odlewy z żeliwa białego można obrabiać cieplnie w przeciwieństwie do odlewów wykonanych ze stopów aluminium i innych metali nieżelaznych, w których pod wpływem podwyższonej temperatury zachodzi zjawisko rozprężania gazów znajdujących się w porach, co w konsekwencji prowadzi do deformacji powierzchni odlewów.
5. Bardzo szybkie chłodzenie żeliwa w procesie odlewania ciśnieniowego prowadzi do powstania bardzo drobnoziarnistej mikrostruktury odlewu, co może spowodować skrócenie czasu obróbki cieplnej (wyżarzania) i w konsekwencji do otrzymania struktury żeliwa ciągliwego z charakterystycznymi wydzieleniami węgla żarzenia.
6. Wytworzenie jakościowego odlewu z żeliwa szarego wymaga zapewnienia dużej skłonności żeliwa do grafityzacji i przestrzegania następujących warunków odlewania i krystalizacji stopu w cyklu technologicznym:

distributed in the entire bulk of the sample. Such advantageous microstructure is the result of a high rate of metal crystallisation in the pressure mould.

### 3. Summary

Based on the acquired results of tests and the analysis performed, the following conclusions can be drawn:

1. Manufacturing of cast iron pressure castings is a significant technological issue, due to the high temperature of the process and the specificity of casting crystallisation and forming of its microstructure, and therefore its properties.
2. Optimisation of all necessary technological parameters offers a significant chance to apply this method to the manufacture of white cast iron castings. Strict observation of die casting guidelines will prevent or significantly limit the cast iron's tendency to form hard spots, exhibit contraction and thermal stresses, and gas porosity in the castings.
3. Materials for pressure moulds should be characterised by high resistance to temperature changes, fatigue, erosion, and should have a high thermal conductivity coefficient. The following meet these requirements: molybdenum alloys, tungsten alloys, as well as alloy steels and cast irons.
4. It should be emphasized that white cast iron pressure castings can be thermally treated, contrary to aluminium and other non-ferrous metal alloys, where decompression of gas contained in pores occurs under raised temperature, which consequently leads to deformation of the casting surface.
5. Very fast cooling of cast iron during the pressure casting process leads to the formation of a very fine-grained casting microstructure. This can reduce the thermal treatment (annealing) time and consequently lead to acquiring malleable cast iron structure with the characteristic annealing carbon precipitations.
6. Producing quality grey cast iron castings requires a significant propensity of cast iron to graphitisation, and observing the following conditions of die casting and alloy crystallisation in the technological cycle:
  - cast iron should be characterised by a high carbon equivalent, and pig iron and circulation scrap with thick graphite precipitations should be used as the charge,

- żeliwo powinno się charakteryzować wysokim równoważnikiem węglowym, a we wsadzie należy stosować surówkę i złom obiegowy z grubymi wydzieleniami grafitu,
  - temperatura odlewania powinna być jak najniższa,
  - forma musi być pokryta odpowiednimi powłokami lub wkładkami ochronno-izolacyjnymi o bardzo małej przewodności cieplnej, a jej temperatura musi być wysoka około 400–500°C;
  - powierzchnie przekroju poszczególnych elementów układu wlewowego powinny być jak największe, korzystne jest stosowanie szerokiego wlewu szczelinowego przez co uzyskuje się bardziej równomierne obciążenie cieplne formy,
  - odlewy należy usunąć z formy przy temperaturze 950–1000°C, a następnie chłodzić z umiarkowaną szybkością.
- die casting temperatures should be as low as possible,
  - the mould must be covered with appropriate coatings or protection and insulation inlays with very low thermal conductivity, and its temperature must be high, ca. 400–500°C;
  - cross-section areas of individual feed system elements should be as large as possible, it is advantageous to utilise a wide knife gate, which enables more even thermal load of the mould to be achieved,
  - the castings should be removed from the mould at 950–1000°C, and subsequently cooled at a moderate rate.

Wymienione powyżej wytyczne odlewania zapobiegają lub w dużym stopniu zmniejszają: skłonność żeliwa do zabielen, naprężenia skurczowe i cieplne oraz porowatość skurczową i gazową. Zabielenia struktury w ciśnieniowych odlewach z żeliwa występują zazwyczaj i – jak wykazują badania – nie można ich całkowicie uniknąć poprzez izolację cieplną powierzchni formy czy też modyfikację żeliwa.

The guidelines listed above prevent or significantly limit: cast iron's tendency to form hard spots, contraction and thermal stresses, and gas and contraction porosity. Structure hard spots in cast iron pressure castings usually occur and – as demonstrated by testing – cannot be completely avoided using thermal insulation of the mould surface or by modification of the cast iron.

## Podziękowania

Podziękowania składam mgr. inż. Wiesławowi Kulejowi – właścicielowi odlewni ciśnieniowej, w której przeprowadzono próby wykonywania odlewów do badań, sfinansowane ze środków własnych firmy Odlewnictwo-Export-Import Wiesław Kulej w Kłobucku.

## Acknowledgements

Author gratitude to Wiesław Kulej, MSc. Eng. – the owner of the die casting foundry, where the castings for the research were made and financed by Casting-Export-Import Wiesław Kulej company in Kłobuck.

## Literatura/References

1. Białobrzęski A. (2002). *Technologie specjalne odlewania ciśnieniowego*. Kraków: Instytut Odlewnictwa.
2. Chisato Y., Yuichi A., Kunio K., Seiro Y. (1996). *Process for die casting graphite cast iron at solid-liquid coexisting state*. Patent US 5531261.
3. Ragan E., Dobránsky J., Baron P., Olejár T. (2012). Materials on dies for pressure die casting. *Metalurgija*, 51(1), 117–120.
4. Piwonka T.S. (2001). *Thin wall iron casting*. Final Technical Progress Report U.S.
5. Ohtake K., Manabe A., Hibino Y., Sato T., Niwa K. (2006). *Method of die casting spheroidal graphite cast iron*. Patent U.S. 7134478 B2.
6. Kopp R. (1996). Some current development trends in metal-forming technology. *J. Mater. Process. Technol.*, 60(1–4), 1–9.