

Zastosowanie technologii prasowania w stanie ciekłym do otrzymywania odlewów ze stopów aluminium

Application of squeeze casting technology to obtain aluminum alloy castings

Piotr Dudek¹

¹ Instytut Odlewnictwa, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków, Polska

¹ Foundry Research Institute, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków, Poland

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

Received: 19.04.2017. Accepted in revised form: 30.09.2017.

© 2017 Instytut Odlewnictwa. All rights reserved.

DOI: 10.7356/iod.2017.19

Streszczenie

Artykuł przedstawia wyniki badań odlewów z czterech stopów aluminium wykonanych z zastosowaniem technologii prasowania w stanie ciekłym.

Do badań zastosowano stopy: EN AW 7022 (AlZn5Mg3Cu) oraz jego modyfikację poprzez dodatek tytanu, A201.0, EN AC-4800 (AlSi13Mg1CuNi) oraz stop Al-Si-Zn według patentu PL 158900. Ze stopów wykonano odlewy z wykorzystaniem technologii prasowania w stanie ciekłym oraz – w celach porównawczych – odlewy kokilowe. Przeprowadzono badania podstawowych właściwości mechanicznych otrzymanych odlewów.

W celu polepszenia ich właściwości mechanicznych przeprowadzono obróbkę cieplną według indywidualnie dobranych – w zależności od stopu – parametrów procesu. Parametry obróbki cieplnej dobrano na podstawie m.in. analizy wykresów DSC. Wykazano skuteczność technologii prasowania w stanie ciekłym do otrzymywania wysokowytrzymałych odlewów z badanych stopów.

Słowa kluczowe: stopy aluminium, prasowanie w stanie ciekłym, właściwości mechaniczne, obróbka cieplna

Abstract

The article presents the results of investigations into castings made of four aluminum alloys produced with the use of squeeze casting technology.

The investigations used the following alloys: EN AW 7022 (AlZn5Mg3Cu) and its modification with a titanium addition, A201.0, EN AC-4800 (AlSi13Mg1CuNi), Al-Si-Zn according to the patent PL 158900. The alloys were used to make castings with the use of squeeze casting technology and – for comparison – die castings. Investigations were performed on the basic mechanical properties of the obtained castings.

In order to improve their mechanical properties, thermal treatment according to individually selected process parameters (depending on the alloy) was performed. The thermal treatment parameters were selected based on e.g. an analysis of the DSC diagrams. The tests proved the effectiveness of squeeze casting technology in obtaining high-strength casts made from the examined alloys.

Keywords: aluminum alloys, squeeze casting, mechanical properties, thermal treatment

1. Wprowadzenie

Proces prasowania w stanie ciekłym (*Squeeze Casting* – SQ) w swojej istocie jest identyczny jak ogólnie znany proces odlewania pod wysokim ciśnieniem (*High Pressure Die Casting* – HPDC). W obu procesach ciekły metal krzepnie w metalowych formach pod wysokim ciśnieniem. Tym co różni oba te procesy jest sposób włączania

1. Introduction

In its nature, the squeeze casting process is identical with high pressure die casting. In both processes, the liquid metal solidifies in metal moulds under high pressure. The difference between the two is the manner of pressing the liquid metal into the mould cavity as well as the construction. In the case of squeeze

nia ciekłego metalu do wnętrza formy oraz ich konstrukcja. W przypadku prasowania w stanie ciekłym prędkość tłoka prasującego średnio dochodzi do 0,5 m/s, a prędkość w szczelinie wlewowej – 0,4 m/s. Analogiczne wartości dla odlewania pod wysokim ciśnieniem to 10 m/s i 50 m/s. W przypadku prasowania w stanie ciekłym mamy laminarny przepływ metalu – w odlewaniu pod wysokim ciśnieniem – burzliwy. Te zasadnicze różnice w sposobie wypełniania wnętrza formy implikują właściwości odlewów otrzymane w obu technologiach. Podczas gdy zasadniczą wadą klasycznych odlewów ciśnieniowych jest ich porowatość gazowa i niemożność przeprowadzenia ich obróbki cieplnej, to problem ten w przypadku odlewów prasowanych jest marginalny. Odlewy ciśnieniowe są z reguły odlewami cienkościennymi – odlewy prasowane – grubościennymi. Do odlewania pod ciśnieniem najlepiej jest stosować stopy okołoeutektyczne o zawartości Fe około 1% lub korzystnym stosunku Fe/Mn – takich ograniczeń nie posiada technologia prasowania w stanie ciekłym, można w niej stosować nawet stopy do przeróbki plastycznej o relatywnie małej lejuści. Osobliwością procesu prasowania w stanie ciekłym jest możliwość infiltracji porowatych preform, a tym samym wytwarzanie kompozytów metalowych o szerokim kompleksie właściwości.

Pomimo szeregu korzyści technologia prasowania w stanie ciekłym nie jest szeroko stosowana. Prasowanie w stanie ciekłym w sposób zdecydowany przegrywa z technologią odlewania pod wysokim ciśnieniem pod względem szybkości produkcji, dlatego też technologia SQ stosowana jest do wykonywania bardzo odpowiedzialnych odlewów, ale dla stosunkowo małoseryjnej produkcji.

W związku z koniecznością zmniejszenia emisji CO₂, co związane jest z obniżeniem konsumpcji paliw płynnych przez samochody, konieczne jest obniżenie masy całego pojazdu. Do 2020 roku koncerny nie będą mogły produkować samochodów, których średnia (w całym wolumenie produkcji) emisja CO₂ będzie większa niż 95 gramów na każdy kilometr. Wymusza to zmniejszenie zużycia paliwa przez pojazd. Technologia prasowania w stanie ciekłym jest technologią, która wydaje się być perspektywistyczną w tym obszarze, głównie do produkcji elementów zawieszenia pojazdów. W Instytucie Odlewnictwa od wielu lat prowadzone są prace nad opanowaniem tej technologii i wdrożenia jej w krajowych odlewniach, głównie produkujących komponenty dla przemysłu *automotive*.

Współcześnie znany proces prasowania w stanie ciekłym powstał właśnie na zamówienie przemysłu samochodowego, tj. firmy Toyota, ponieważ koncern miał trudności w produkcji obręczy kół samochodowych ze stopów aluminium spowodowane ich porowatością. Proces został wdrożony przez firmę *Ube Industries Ltd* w 1979 roku w *Toyota Motor Corporation Ltd*. W tym samym roku uruchomiono produkcję prasowanych w stanie ciekłym stalowych części rakiet PATRIOT (do 68 kg) [1]. Jednakże podwaliny tego procesu zostały opracowane

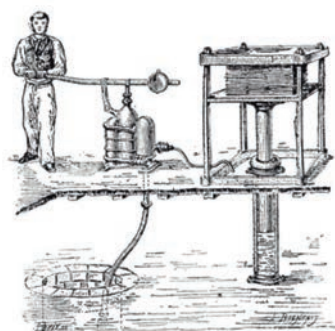
casting, the injector plunger velocity reaches 0.5 m/s, and the velocity in the gating gap – 0.4 m/s. Analogical values for high pressure casting are 10 m/s and 50 m/s, respectively. In the case of squeeze casting, the metal flow is laminar, whereas with high pressure casting, it is turbulent. These fundamental differences in the manner of filling the mould determine the properties of casts obtained in both technologies. While the basic flaw of classical pressure castings is their gas porosity and their inability to thermal treatment, in the case of squeezed castings, this problem is marginal. Pressure castings are in general thin-walled, whereas squeezed castings are thick-walled. For pressure casting, it is best to apply near-eutectic alloys with a Fe content of about 1% or with an advantageous Fe/Mn ratio, while these limitations are not the case in squeeze casting technology, in which it is possible to apply even plastic treatment alloys of a relatively low castability. A peculiarity of the squeeze casting process is the possibility to infiltrate the porous preforms and thus produce metal composites of a broad complex of properties.

Despite a range of advantages, squeeze casting technology is not commonly applied. Squeeze casting definitely loses to high pressure casting in respect of the production rate, and so, the SQ technology is used to produce very responsible castings for relatively small-scale production.

Due to the necessity to reduce CO₂ emission, which is connected with lowering the liquid fuel consumed by cars, it is necessary to lower the mass of the whole vehicle. By 2020, car manufacturers will not be able to produce cars whose average (in the whole production volume) CO₂ emission is higher than 95 grams per kilometer. This enforces a reduction in the fuel consumed by the vehicle. Squeeze casting technology is a technology which seems to be perspective in this area, mainly in the production of vehicle suspension components. For many years, the Foundry Institute has been conducting research aimed at mastering this technology and implementing it in domestic foundries, mainly those producing components for the automotive industry.

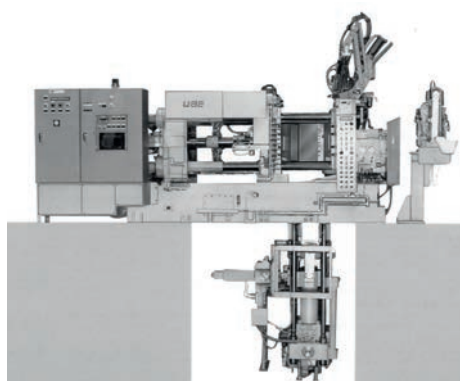
The presently known squeeze casting process was created precisely to order for the automotive industry, i.e. by the Toyota company, as the concern faced difficulties in the production of car wheel rings from aluminum alloys, caused by the porosity of the latter. The process was implemented by the Ube Industries Ltd company in 1979 at Toyota Motor Corporation Ltd. In the same year, the production of squeeze cast steel components of PATRIOT rockets began (up to 68 kg) [1]. However, the foundations of this process had been already elaborated in 1795, when Joseph Bramah patented the hydraulic press (British Patent no. 2045) [2] (Figs. 1–2).

już w 1795 roku, kiedy to Joseph Bramah opatentował prasę hydrauliczną (British Patent nr 2045) [2] (rys. 1–2).



Rys. 1. Prasa hydrauliczna według patentu Josepha Bramaha [3]

Fig. 1. Hydraulic press according to Joseph Bramah's patent [3]



Rys. 2. Współczesna maszyna do prasowania w stanie ciekłym oparta na patencie Josepha Bramaha (UBE HVSC 350) [4]

Fig. 2. Modern machine for squeeze casting based on Joseph Bramah's patent (UBE HVSC 350) [4]

Technologia prasowania w stanie ciekłym jest technologią hybrydową – łączy w sobie zalety kucia matrycowego i odlewania pod wysokim ciśnieniem, co przedstawiono w tabeli 1.

The squeeze casting technology is a hybrid technology – it combines the advantages of die casting and high pressure casting, which are presented in Table 1.

Tabela 1. Porównanie wybranych parametrów technologicznych prasowania w stanie ciekłym (squeeze casting), kucia i odlewania pod wysokim ciśnieniem (HPDC)

Table 1. Comparison of selected technological parameters of squeeze casting, forging and high pressure die casting

Właściwości/Properties	Squeeze Casting	Kucie/Forging	HPDC
Złożoność kształtu / Complexity of shape	wysoki/high	niski/low	wysoki/high
Chropowatość powierzchni / Surface roughness	zadowalająca/satisfactory	zła/low	zadowalająca/satisfactory
Właściwości mechaniczne / Mechanical properties	wysokie/high	wysokie/high	niskie/low
Dokładność wymiarowa / Dimensional precision	dobra/good	zadowalająca/satisfactory	dobra/good
Poziom porowatości / Level of porosity	mały/low	ograniczony/limited	wysoki/high
Zdolność do anodyzowania / Anodizing capability	dobra/good	dobra/good	niska/low
Zdolność do obróbki cieplnej / Thermal treatment capability	dobra/good	dobra/good	niska/low
Wydajność / Efficiency	wysoka/high	dobra/good	wysoka/high
Konieczność obróbki skrawaniem / Necessity of machining	mała/low	wysoka/high	mała/low
Koszt detalu / Retail costs	średni/medium	wysoki/high	niski/low

2. Metoda badań

Badania prowadzono na kompleksie do prasowania w stanie ciekłym, składającym się z prasy hydraulicznej UBE VSC 500 posiadającej pionowy układ wlewowy. Metal topiono w oporowym piecu węgelnym STOTEK ALUSMELT 500 w tyglu wykonanym z SiC, uprzednio pokrytym zawiesiną azotku boru (BN) – rysunek 3.



Rys. 3. Stanowisko badawcze (kompleks UBE)

Fig. 3. Test stand (UBE apparatus)

Po stopieniu ciekły metal wytrzymywano w zakresie temperatury 50–130°C powyżej linii likwidus danego stopu, a następnie odlewano do kokili oraz do formy metalowej przeznaczonej do realizacji procesu prasowania w stanie ciekłym. Temperaturę kokili utrzymywano na poziomie 200 ±5°C, natomiast formę do prasowania w stanie ciekłym w przedziale od 200°C do 240°C w zależności od stosowanego stopu. Temperaturę formy odlewniczej stabilizowano poprzez zastosowanie dwóch urządzeń grzewczo-chłodzących Tool-Temp TT-390 i pokrywano 10% wodnym roztworem grafitu koloidalnego. W celu określenia indywidualnych parametrów odlewania i obróbki cieplnej przeprowadzono badania różnicowej kalometrii skaningowej (*Differential Scanning Calorimetry – DSC*) za pomocą wysokotemperaturowego różnicowego kalometru skaningowego DSC 404 C/3/G Pegasus. Badania przeprowadzono w atmosferze ochronnej argonu z szybkością nagrzewania 5 K/min w zakresie od temperatury otoczenia do ok. 700°C.

Przeprowadzono badania podstawowych właściwości mechanicznych otrzymanych odlewów. Statyczne próby rozciągania w temperaturze otoczenia przeprowadzono za pomocą maszyny Instron 8800M, z szybkością odkształcenia 3 mm/min, zgodnie z normą PN-EN 10002-1:2004 [5]. Każdy wynik stanowił średnią z 5 pomiarów.

Do badań zastosowano stopy:

1. Stop przeznaczony do przeróbki plastycznej EN AW 7022 (AlZn5Mg3Cu) oraz jego modyfikację poprzez dodatek tytanu.

2. Test methodology

The investigations were performed on a squeeze casting apparatus, consisting of a hydraulic press UBE VSC 500 with a vertical gating system. The metal was melted in a resistance soaking furnace STOTEK ALUSMELT 500, in a crucible made of SiC, previously covered with a boron nitride suspension (BN) – Figure 3.

After melting, the liquid metal was held at a temperature in the range of 50–130°C above the liquidus line of the given alloy, and next, it was cast into a gravity die and a metal mould assigned for the squeeze casting process. The temperature of the gravity die was maintained at a level of 200 ±5°C, whereas the mould for squeeze casting – within the range of 200°C to 240°C, depending on the applied alloy. The casting mould temperature was stabilized through the application of two heating and cooling devices Tool-Temp TT-390 and coated with a 10% water solution of colloidal graphite. In order to determine the individual parameters of the casting and the thermal treatment processes, differential scanning calorimetry tests were performed by means of a high temperature differential scanning calorimeter – the DSC 404 C/3/G Pegasus. The tests were conducted in a protective argon atmosphere at the heating rate of 5 K/min, within the temperature range from ambient temperature to 700°C.

Investigations of the basic mechanical properties of the obtained castings. Static tensile tests at ambient temperature were made by means of the Instron 8800M machine, at the deformation rate of 3 mm/min, according to the standard PN-EN 10002-1:2004 [5]. Each result constituted the mean value of 5 measurements.

The following alloys were used in the investigations:

1. Alloy assigned for plastic treatment EN AW 7022 (AlZn5Mg3Cu) and its modification with a titanium addition.

- | | |
|---|---|
| <p>2. Wysokowytrzymały, nieznormalizowany w PN-EN stop odlewniczy A201.0.</p> <p>3. Stop odlewniczy EN AC-4800 – AlSi13Mg1CuNi.</p> <p>4. Wysokocynkowy stop Al-Si-Zn według patentu PL 158900: „Odlewniczy stop aluminiowy o podwyższonych i wysokich właściwościach mechanicznych” [6].</p> | <p>2. High-strength casting alloy A201.0, non-standardized in PN-EN.</p> <p>3. Casting alloy EN AC-4800 – AlSi13Mg1CuNi.</p> <p>4. High-zinc alloy Al-Si-Zn according to the patent PL 158900: “Casting aluminum alloy with elevated and high mechanical properties” [6].</p> |
|---|---|

Stopy do badań zostały wykonane w Instytucie Metali Nieżelaznych w Gliwicach Oddział Metali Lekkich w Skawinie.

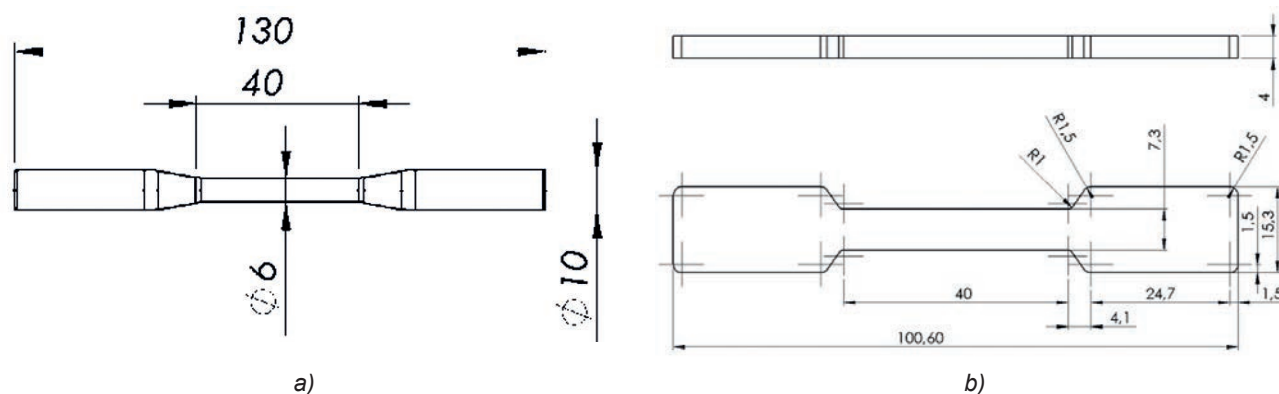
Ze stopów wykonano odlewy z wykorzystaniem technologii prasowania w stanie ciekłym oraz – w celach porównawczych – odlewy kokilowe. Takie metody porównawcze bardzo często spotyka się w literaturze światowej [7–10], chociaż właściwszą metodą wydaje się być technologia poddawania pod wysokim ciśnieniem, albowiem metal poddawany działaniu ciśnienia znacznie zmienia jego krystalizację oraz intensyfikuje wymianę ciepłą w układzie odlew-forma [1], co występuje w obu tych technologiach. Część odlewów zarówno prasowanych w stanie ciekłym, jak i kokilowych poddano specyficznej – w zależności od rodzaju stopu – obróbce cieplnej.

Ze wszystkich stopów odlano próbki wytrzymałościowe, w przypadku odlewów kokilowych – okrągłe, natomiast prasowanych – płaskie. Taki kształt próbek determinowało posiadane oprzyrządowanie. O ile koszt wykonania kokili jest stosunkowo niewielki, to koszt wykonania formy (czy choćby wkładki ciśnieniowej) jest kilkakrotnie większy. Próbkę toczono na wymiar zgodny z normą PN-EN ISO 6892-1:2010 [11]. Wymiary próbek podano na rysunku 4.

Test alloys were made at the Institute of Non-Ferrous Metals in Gliwice, Light Metals Division in Skawina.

The alloys were used to make castings with the use of the squeeze casting technology and – for comparison – die castings. Such comparison methods are very common in the global literature [7–10], although a more appropriate method seems to be the high pressure casting technology, as the metal subjected to pressure significantly changes its crystallization and intensifies the heat exchange in the cast-mould system [1], which is the case for both these technologies. Some of the castings, both the squeezed castings and the die castings, underwent a specific – depending on the alloy type – thermal treatment.

All the alloys were used to cast samples for strength tests, round in the case of die castings and flat in the case of squeezed castings. Such a sample shape was determined by the available equipment. While the cost of producing a die is relatively low, the cost of producing a mould (or even a pressure insert) is a few times higher. The samples were rolled into size in accordance with the standard PN-EN ISO 6892-1:2010 [11]. The dimensions of the samples are given in Figure 4.



Rys. 4. Wymiary próbek wytrzymałościowych: a) – odlew kokilowy, b) – odlew wykonany według technologii prasowania w stanie ciekłym

Fig. 4. Dimensions of strength samples: a) – die casting, b) – castings made according to the squeeze casting technology

3. Wyniki badań i ich omówienie

3.1. Stop AlZn5Mg3Cu

Stop AlZn5Mg3Cu (EN AW-7022) – znany pod nazwą handlową CERTAL – posiada wysokie właściwości

3. Test results and discussion

3.2. Alloy AlZn5Mg3Cu

Alloy AlZn5Mg3Cu (EN AW-7022) – known under the commercial name CERTAL – has high strength proper-

wytrzymałościowe, zbliżone do stali konstrukcyjnych węglowych i niskostopowych nieobrobionych cieplnie. Jest to stop przeznaczony do przeróbki plastycznej, z którego wykonuje się m.in. blachy, formatki i pręty. Blachy AW-7022 są stosowane do obróbki głębokich wybrań, do budowy form wtryskowych, ciśnieniowych i rozdmuchowych, elementów tłoczników, części maszyn, narzędzi przemysłowych. Podczas obróbki skrawaniem zachowana jest wysoka stabilność kształtu.

Badania przeprowadzono na stopie o składzie chemicznym przedstawionym w tabeli 2.

ties, close to those of carbon construction steels and low-alloy steels not subjected to heat treatment. It is an alloy assigned for heat treatment, used to make e.g. metal sheets, forms and rods. AW-7022 sheets are used for the treatment of deep recesses, for the construction of injection, pressure and blowing moulds, stamping die elements, machine parts and industrial tools. During the machining process, a high stability of shape is maintained.

The tests were performed on the alloy with the composition given in Table 2.

Tabela 2. Skład chemiczny stopu AW 7022, % wag.

Table 2. Chemical composition of alloy AW 7022, wt. %

	Zn	Mg	Fe	Si	Cu	Mn	Ni	Sn	Pb	Cr	Ti	Al
Wg normy EN 573-1 [12] / According to standard EN 573-1 [12]	4,30–5,20	2,60–3,70	≤0,50	≤0,50	0,50–1,00	0,10–0,40	–	–	–	0,10–0,30	–	reszta/ residue
Wg atestu 084/2015/IV / According to attestation 084/2015/IV	4,86	3,22	0,18	0,13	0,91	0,25	0,008	0,003	0,003	0,26	0,003	reszta/ residue
Z wytopu / From melt	4,80	2,95	0,10	0,13	0,84	0,23	0,006	0,003	0,001	0,22	0,003	reszta/ residue
	4,82	2,98	0,11	0,12	0,81	0,22	0,005	0,003	0,001	0,22	0,300	

Stop zmodyfikowano przez dodatek tytanu do ilości 0,3%. Przeprowadzono badania podstawowych właściwości mechanicznych w stanie lanym (F) zarówno odlewów kokilowych, jak i prasowanych w stanie ciekłym oraz analogiczne badania po obróbce cieplnej. Otrzymane wyniki (średnia z 5 pomiarów) przedstawiono w tabeli 3.

The alloy was modified with a titanium addition in the amount of up to 0.3%. The basic mechanical properties of both the die castings and the squeezed castings, in the state as-cast (F) as well as after heat treatment, were investigated. The obtained results (average of 5 measurements) are presented in Table 3.

Tabela 3. Badania podstawowych właściwości mechanicznych odlewów ze stopu AW 7022 w stanie lanym (F)

Table 3. Tests of basic mechanical properties of castings made of alloy AW 7022, as-cast (F)

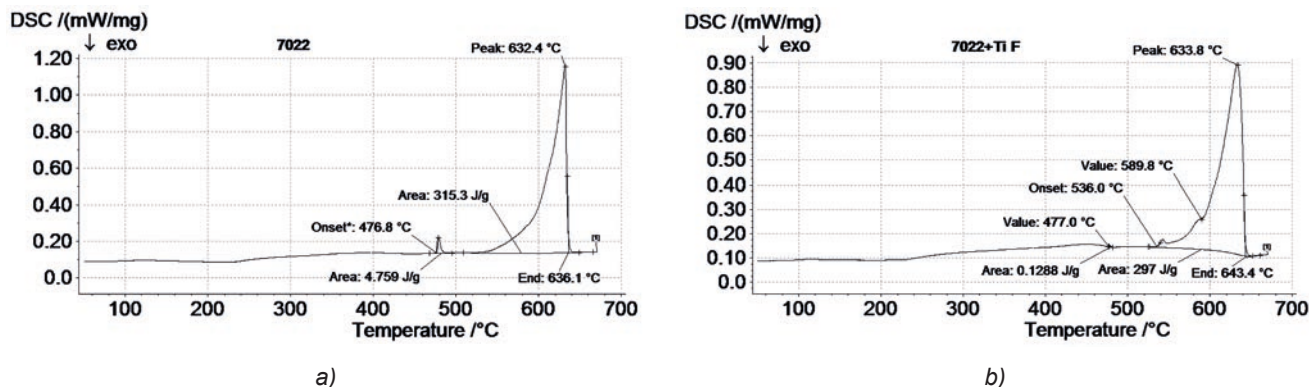
Właściwości mechaniczne odlewów / Mechanical properties	$R_{p0,2}$, MPa	R_m , MPa	HBW
kokilowych w stanie lanym (F) / Die castings, as-cast (F)	182	198	110
kokilowych w stanie lanym (F) modyfikowanych Ti / Die castings, as-cast (F) modified with Ti	173	187	104
prasowanych w stanie ciekłym w stanie lanym (F) / Squeeze castings, as-cast (F)	241	255	90
prasowanych w stanie ciekłym w stanie lanym (F) modyfikowanych Ti / Squeeze castings, as-cast (F) modified with Ti	240	255	128

Na podstawie różnicowej, skaningowej kalorymetrii określono identyfikację przemian fazowych i określono temperatury solidus/likwidus stopu. Wyniki badań przedstawiono na rysunku 5.

Przemiana fazowa I odpowiada prawdopodobnie topnieniu eutektyki $\alpha + \text{MgZn}_2$, będącej wynikiem niejednorodności chemicznej i lokalnego wzbogacenia w magnez; przemiana II odpowiada topnieniu fazy pierwotnej αZn . Pogrubione wartości temperatury

On the basis of differential scanning calorimetry, the phase transformations as well as the solidus/liquidus temperatures of the alloy were identified. The results of the tests are presented in Figure 5.

Phase transformation I probably corresponds to the melting of eutectic $\alpha + \text{MgZn}_2$, which is the result of the chemical heterogeneity and the local enrichment with magnesium, while transformation II corresponds to the melting of the primary phase αZn . The bolded tem-



Rys. 5. Wyniki DSC dla stopu AW 7022 w stanie lanym (F) bez Ti (a) i z dodatkiem tytanu (b)
 Fig. 5. DSC results for alloy AW 7022, as-cast (F) without Ti (a) and with a titanium addition (b)

oznaczają odpowiednio solidus (*onset*) i likwidus (*Peak*).

Na podstawie analizy wykresów DSC oraz danych literaturowych [13,14] określono parametry obróbki cieplnej T6 – przesycanie w temperaturze 450–460 °C przez 3 h, następnie chłodzenie w zimnej wodzie oraz starzenie przez 5 h w temperaturze 170 °C. Po obróbce cieplnej przeprowadzono badania właściwości mechanicznych. Wyniki przedstawiono w tabeli 4.

perature values denote the solidus (*onset*) and liquidus (*peak*), respectively.

Based on the analysis of the DSC diagrams as well as the literature data [13,14], the thermal treatment parameters T6 were determined – supersaturation at 450–460 °C for 3 h, followed by cooling in cold water and ageing for 5 h at 170 °C. After thermal treatment, the mechanical properties were investigated. The results are presented in Table 4.

Tabela 4. Właściwości mechaniczne odlewów kokilowych i prasowanych w stanie ciekłym ze stopu AW 7022 po obróbce cieplnej T6 (bez dodatku tytanu)

Table 4. Mechanical properties of die and squeeze castings in the as-cast state made of alloy AW 7022 after thermal treatment T6 (without titanium)

Właściwości mechaniczne / Mechanical properties	$R_{p0.2}$, MPa	R_m , MPa	A_5 , %	HBW 2,5/62,5
Odlew kokilowy + T6 / Die casting + T6	281	325	3	107,7
Odlew prasowany w stanie ciekłym + T6 / Squeeze casting, as-cast + T6	385	487	7	140

Pręty wyciskane z tego stopu (zgodnie z normą EN 755-2 [15]) w stanie T6 (dla średnic 0–80 mm) powinny posiadać minimum $R_{p0.2}$ – 420 MPa, R_m – 490 MPa i wydłużenie A_5 – 7%. Otrzymane właściwości mechaniczne odlewów prasowanych w stanie ciekłym po odpowiedniej obróbce cieplnej są bardzo zbliżone do wartości otrzymanych metodą przeróbki plastycznej.

The rods squeeze casting from this alloy (according to the standard EN 755-2 [15]) in the state T6 (for diameters 0–80 mm) should have the minimum $R_{p0.2}$ – 420 MPa, R_m – 490 MPa and elongation A_5 – 7%. The obtained mechanical properties of the as-cast squeeze castings after heat treatment are very close to the values obtained by the plastic processing method.

3.2. Stop A201.0

Kolejnym stopem, na którym prowadzono badania, był stop według amerykańskiego oznaczenia UNS A 02010. Jest to wysokowytrzymały stop układu Al-Cu z dodatkiem srebra. Jego skład chemiczny określa norma SAE AMS 4223E [16] kompatybilna z normą UNS A12010 [17]. Jego najbliższym odpowiednikiem w normie EN-PN jest stop EN AC-21000. Ze względu na jedne z najwyższych właściwości mechanicznych wśród stopów aluminium jest on stosowany w motoryzacji i lotnictwie oraz kosmonautyce. Szerokie zastosowanie

3.2. Alloy A201.0

Another tested alloy was UNS A 02010 (according to the American denotation). It is a high-strength alloy from the Al-Cu system with a silver addition. Its chemical composition is defined by the standard SAE AMS 4223E [16], compatible with the standard UNS A12010 [17]. Its closest equivalent in the standard EN-PN is alloy EN AC-21000. Owing to some of the highest mechanical properties among aluminum alloys, it is applied in the automotive and aircraft industry as well as astronautics. The broad range of applications is limited by

ogranicza jego cena, gdyż ze względu na zawartość srebra jest on relatywnie drogim stopem.

Skład chemiczny tego stopu przedstawiono w tabeli 5.

Ze stopu wykonano odlewy próbek wytrzymałościowych w kokili oraz w technologii prasowania w stanie ciekłym. Przeprowadzono badania DSC, mające na celu określenie parametrów obróbki cieplnej. Wykres DSC przedstawiono na rysunku 6.

its price, as, due to its silver content, it is relatively expensive.

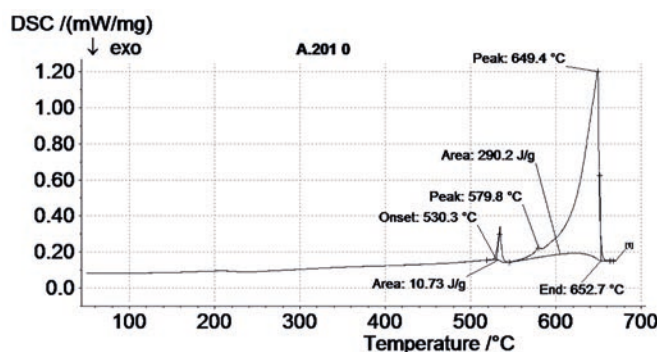
The chemical composition of this alloy is given in Table 5.

The alloy was used to make samples for the testing of mechanical properties in a die and according to the squeeze casting technology. DSC tests were performed in order to determine the heat treatment parameters. The DSC diagram is presented in Figure 6.

Tabela 5. Skład chemiczny stopu A201.0

Table 5. Chemical composition of alloy A201.0

	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ag	Ti	Al
Wg normy SAE AMS 4223E [16] / According to standard SAE AMS 4223E [16]	4,0–5,0	<0,10	0,15–0,35	0,20–0,40	0,05	0,4–1,0	0,15–0,35	reszta/ residue
Wg atestu 084/2015/I / According to attestation 084/2015/I	4,86	0,08	0,33	0,39	0,06	0,58	0,26	reszta/ residue
Z wytopu / From melt	4,50	0,07	0,29	0,41	0,04	0,56	0,24	reszta/ residue



Rys. 6. Wykres DSC dla stopu A201.0

Fig. 6. DSC diagram for alloy A201.0

Tabela 6. Właściwości mechaniczne odlewów ze stopu A201.0

Table 6. Mechanical properties of castings made of alloy A201.0

Właściwości mechaniczne / Mechanical properties	$R_{p0,2}$ MPa	R_m MPa	A_5 %	HBW 2,5/62,5
Odlewy kokilowe, bez obróbki cieplnej (F) / Die castings, without heat treatment (F)	110,0	177,0	2,4	79,7
Odlewy kokilowe, po obróbce cieplnej (T6) / Die castings, after heat treatment (T6)	348,0	420,0	6,8	69,8
Odlewy prasowane w stanie ciekłym bez obróbki cieplnej (F) / Squeeze castings, without heat treatment (F)	120,7	174,3	1,8	81,3
Odlewy prasowane w stanie ciekłym po obróbce cieplnej (T6) / Squeeze castings, after heat treatment (T6)	380,0	490,0	7,8	90,0

Na podstawie wykresu oraz danych literaturowych [13,18] dokonano wyboru parametrów obróbki cieplnej. Wielowariantową obróbkę cieplną (T6) przeprowadzono według schematu: nagrzewanie w temperaturze 510–515°C przez 2 h, następnie wytrzymanie w temperaturze 525–530°C przez 16 h, chłodzenie

Based on the diagram and the literature data [13,18], thermal treatment parameters were selected. The multi-variant thermal treatment (T6) was performed according to the scheme: heating at 510–515°C for 2 h, followed by holding at 525–530°C for 16 h, cooling in water and annealing at 150–155°C for 20 h.

w wodzie oraz wygrzewanie w temperaturze 150–155°C przez 20 h.

Próbki poddano badaniom podstawowych właściwości mechanicznych w stanie litym i po obróbce cieplnej. Otrzymane wyniki przedstawiono w tabeli 6.

3.3. Stop AlSiCuNiMg

Stop AlSi12CuNiMg (EN AC 48000) jest stopem eutektycznym, w którym dodatki Cu i Ni podnoszą odporność na oddziaływanie podwyższonej temperatury. Stop ten bardzo rozpowszechniony w praktyce przemysłowej ma dobrą leżność, małą rozszerzalność cieplną i mały współczynnik tarcia. Z tych powodów zdecydowana większość tłoków silników spalinowych i cylindrów produkowana jest z tego stopu.

Skład chemiczny badanego stopu przedstawiono w tabeli 7.

The samples were tested in respect of their basic mechanical properties in the as-cast state and after heat treatment. The obtained results have been presented in Table 6.

3.3. Alloy AlSiCuNiMg

Alloy AlSi12CuNiMg (EN AC 48000) is a eutectic alloy, in which the Cu and Ni additions raise its resistance to elevated temperatures. This alloy, very common in industrial practice, exhibits a very good castability, a low thermal expansion and a low coefficient of friction. For these reasons, a large majority of combustion engine pistons and cylinders are produced from this alloy.

The chemical composition of the examined alloy is presented in Table 7.

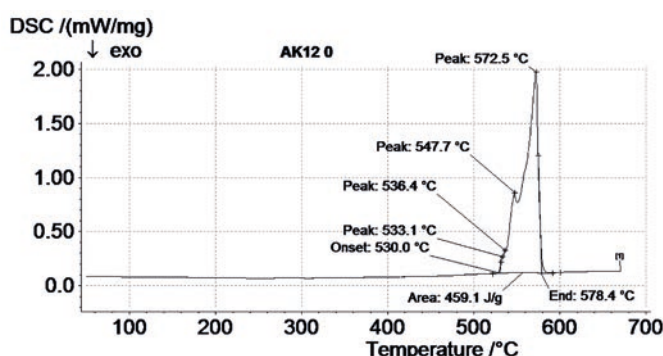
Tabela 7. Skład chemiczny stopu EN AC 48000

Table 7. Chemical composition of alloy EN AC 48000

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn
Wg normy / According to standard	10,50–13,50	0,7 (0,6)	0,80–1,50	0,350	0,80–1,50	0,70–1,30	0,350
Wg atestu 084/2015/III / According to attestation 084/2015/III	11,22	0,21	1,27	0,006	1,23	0,96	0,017
Z wytopu / From melt	12,10	0,19	1,17	0,005	1,20	1,00	0,010

Na podstawie wykresu DSC (rys. 7) oraz danych literaturowych [19,20] przeprowadzono obróbkę cieplną odlewów kokilowych i prasowanych w stanie ciekłym według schematu: wygrzewanie w temperaturze 505–510°C przez 8 h, następnie chłodzenie w wodzie, po czym następowało starzenie w temperaturze 165–185°C przez 6 h.

Based on the DSC diagram (Fig. 7) and the literature data [19,20], heat treatment of die castings and squeeze castings was performed according to the schedule: annealing at 505–510°C for 8 h, followed by cooling in water and ageing at 165–185°C for 6 h.



Rys. 7. Wykres DSC stopu EN AC 48000

Fig. 7. DSC diagram for alloy EN AC 48000

Otrzymane wyniki właściwości mechanicznych przedstawiono w tabeli 8.

The obtained results of the castings' mechanical properties are presented in Table 8.

Tabela 8. Właściwości mechaniczne odlewów ze stopu EN AC 48000

Table 8. Mechanical properties of castings made of alloy EN AC 48000

Właściwości mechaniczne / Mechanical properties	$R_{p0,2}$, MPa	R_m , MPa	A_5 , %	HBW 2,5/62,5
Odlewy kokilowe bez obróbki cieplnej (F) / Die castings, without heat treatment (F)	–	195	–	91,7
Odlewy kokilowe po obróbce cieplnej (T6) / Die castings, after heat treatment (T6)	–	232	–	95,0
Odlewy prasowane bez obróbki cieplnej (F) / Squeeze castings, without heat treatment (F)	–	232	–	105,0
Odlewy prasowane po obróbce cieplnej (T6) / Squeeze castings, after heat treatment (T6)	–	360	–	125,0

3.4. Stop AlSi10Zn10

Jest to stop odlewniczy o podwyższonych i wysokich właściwościach mechanicznych, szczególnie do odlewania części w technologii prasowania w stanie ciekłym. Charakteryzuje się bardzo wysoką twardością (ok. 170 HB) [6].

Skład chemiczny badanego stopu przedstawiono w tabeli 9.

3.4. Alloy AlSi10Zn10

It is a casting alloy of elevated and high mechanical properties, used especially to cast components in squeeze casting technology. It is characterized by a very high hardness (about 170 HB) [6].

The chemical composition of the examined alloy is given in Table 9.

Tabela 9. Skład chemiczny stopu AlSi10Zn10

Table 9. Chemical composition of alloy AlSi10Zn10

	Zn	Mg	Fe	Si	Cu	Mn	Ti	Al
Wg atestu 084/2015/II / According to attestation 084/2015/II	10,06	2,14	0,13	9,60	5,50	1,78	0,008	reszta/ residue
Z wytopu / From melt	11,50	1,70	0,10	10,60	5,35	1,72	0,003	reszta/ residue
	11,20	1,72	0,11	10,10	5,31	1,68	0,1	

Wykonano odlewy bez i z dodatkiem tytanu (do zawartości 0,1%), w kokili oraz prasowane w stanie ciekłym. Wyniki właściwości mechanicznych odlewów bez obróbki cieplnej przedstawiono w tabeli 10.

Die and squeeze castings, with and without a titanium addition (up to the content of 0.1%), were prepared. The results of the castings' mechanical properties, without heat treatment, are presented in Table 10.

Tabela 10. Właściwości mechaniczne odlewów ze stopu AlSi10Zn10 bez obróbki cieplnej (F)

Table 10. Mechanical properties of castings made of alloy AlSi10Zn10 without thermal treatment (F)

Właściwości mechaniczne / Mechanical properties	$R_{p0,2}$, MPa	R_m , MPa	A_5 , %	HBW 2,5/62,5
Odlewy kokilowe bez obróbki cieplnej (F) / Die castings, without heat treatment (F)	–	175	–	151,5
Odlewy kokilowe + Ti bez obróbki cieplnej (F) / Die castings + Ti, without heat treatment (F)	–	187	–	152,6
Odlewy prasowane bez obróbki cieplnej (F) / Squeezed castings, without heat treatment (F)	–	210	–	157
Odlewy prasowane + Ti bez obróbki cieplnej (F) / Squeezed castings + Ti, without heat treatment (F)	–	191	–	160

Przeprowadzono obróbkę cieplną (T6) według następujących parametrów:

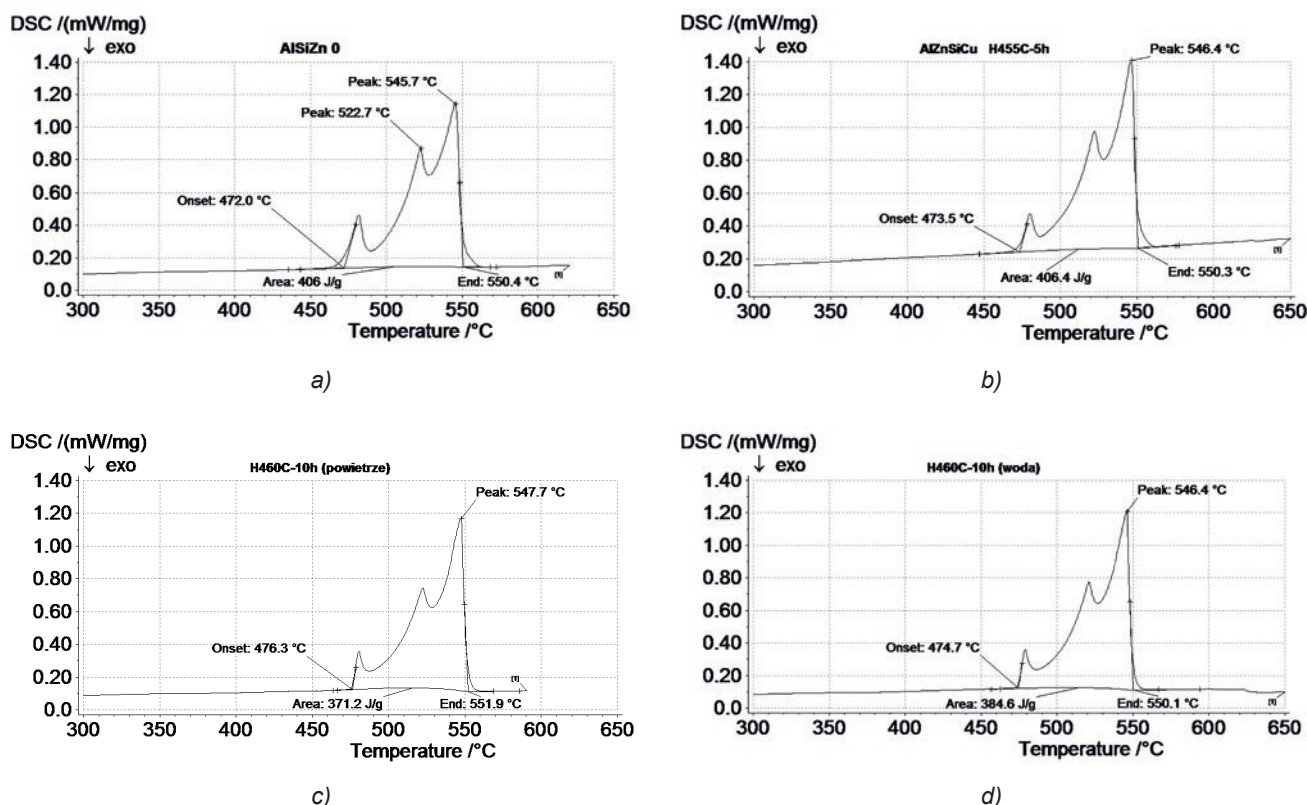
Heat treatment (T6) was performed according to the following parameters:

- przesycanie przez 6 h w temperaturze 460°C i studzenie na powietrzu,
- supersaturation for 6 h at 460°C and cooling in air,

- przesycanie przez 10 h w temperaturze 480°C i studzenie na powietrzu,
- przesycanie przez 10 h w temperaturze 480°C i szybkie studzenie w wodzie.
- supersaturation for 10 h at 480°C and cooling in air,
- supersaturation for 10 h at 480°C and rapid cooling in water.

Następnie przeprowadzono badania DSC odlewów. Wyniki przedstawiono na [rysunku 8](#).

Next, DSC tests of the castings were performed. The results are presented in [Figure 8](#).



Rys. 8. Wyniki różnicowej skaningowej kalorymetrii: a) w stanie lanym, b) – po przesycaniu przez 6 h w temperaturze 460°C, c) po przesycaniu przez 10 h w temperaturze 480°C i szybkim studzeniu na powietrzu, d) po przesycaniu przez 10 h w temperaturze 480°C i szybkim studzeniu w wodzie

Fig. 8. Results of differential scanning calorimetry: a) as-cast, b) – after supersaturation for 6 h at 460°C, c) after supersaturation for 10 h at 480°C and rapid cooling in air, d) after supersaturation for 10 h at 480°C and rapid cooling in water

Na podstawie analizy wykresów należy stwierdzić, że obróbka cieplna w założonych parametrach jest nieefektywna i należy przeprowadzić dalsze badania uwzględniające dłuższy czas przesycania. Wartości ciepła odpowiadającego 1 pikowi, tzn. ilości tej fazy (faz) odniesionej do masy całej próbki wynosi dla warunków:

- AlSiZn_0 – 28 J/g,
- AlZnSiCu_H455-5h – 14 J/g,
- AlZnMgCu_H460-10h_powietrze – 13 J/g,
- AlZnMgCu_H460-10h_woda – 12 J/g.

Based on the analysis of the diagrams, it should be stated that the thermal treatment at the assumed temperatures is ineffective and further tests should be conducted, which will consider a longer supersaturation time. The values of heat corresponding to 1 peak, i.e. the amount of this phase(s) referred to the mass of the whole sample, equal as follows:

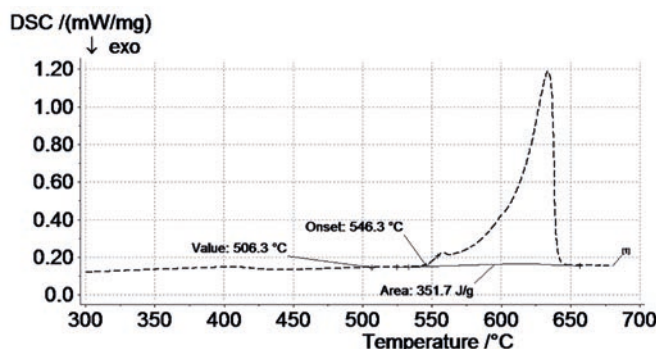
- AlSiZn_0 – 28 J/g,
- AlZnSiCu_H455-5h – 14 J/g,
- AlZnMgCu_H460-10h_air – 13 J/g,
- AlZnMgCu_H460-10h_water – 12 J/g.

Dodatek do stopu 0,1% Ti pogorszył granice wytrzymałości na rozciąganie (R_m), dlatego dalsze badania przeprowadzono na stopie bez dodatku tego pierwiastka.

W celu optymalizacji obróbki cieplnej przeprowadzono kolejną obróbkę cieplną (przesycanie w temperaturze 480°C przez 17 godzin i studzenie w wodzie) i ponownie badania DSC (rys. 9).

An alloy addition of 0.1% Ti has reduced the tensile strength limits (R_m), so further tests were carried out on the alloy without the addition of this element.

In order to optimize the heat treatment, another heat treatment procedure was performed (supersaturation at 480°C for 17 hours and cooling in water), followed by DSC tests (Fig. 9).



Rys. 9. Wykres DSC po 17 h wygrzewania stopu w temperaturze 460°C

Fig. 9. DSC diagram after 17 h of annealing at 460°C

Przeprowadzono badania właściwości mechanicznych otrzymanych odlewów. Otrzymane wyniki przedstawiono w tabeli 11.

The obtained alloys were tested in respect of their mechanical properties. The results are given in Table 11.

Tabela 11. Właściwości mechaniczne odlewów ze stopu AlSi10Zn10 po obróbce cieplnej

Table 11. Mechanical properties of castings made of alloy AlSi10Zn10 after thermal treatment

Właściwości mechaniczne / Mechanical properties	$R_{p0.2}$, MPa	R_m , MPa	A_5 , %	HBW 2,5/62,5
Odlewy kokilowe po obróbce cieplnej (T6) / Die castings, after thermal treatment (T6)	–	220	–	145
Odlewy prasowane po obróbce cieplnej (T6) / Squeeze castings, after thermal treatment (T6)	–	230	–	170

4. Dyskusja wyników

Do badań wybrano cztery stopy aluminium o różnym składzie chemicznym i różnym przeznaczeniu – stop do przeróbki plastycznej, stop o wysokiej wytrzymałości mechanicznej, stop odlewniczy oraz stop o wysokiej twardości przeznaczony do prasowania w stanie ciekłym. Każdy z tych stopów w stanie litym wykazuje inne właściwości.

Dodatek tytanu zarówno w stopie AW 7022, jak i AlSi10Zn10 nie wpłynął na umowną granicę plastyczności $R_{p0.2}$, jak i na wytrzymałość na rozciąganie R_m , znacznie natomiast podniósł twardość stopu AW 7022.

Obróbka cieplna odlewów prasowanych w stanie ciekłym znacznie (w przypadku stopu 201.0 nawet 3-krotnie!) zwiększyła umowną granicę plastyczności ($R_{p0.2}$). Taki znaczny wzrost właściwości mechanicznych świadczy pośrednio o strukturze odlewu – odlew musi

4. Discussion of results

The tests were performed on four aluminum alloys of different chemical compositions and different intended uses – an alloy for plastic treatment, an alloy of high mechanical strength, a casting alloy and an alloy of high hardness assigned for squeeze casting. Each alloy as-cast exhibits different properties.

An addition of titanium in alloy AW 7022 and AlSi10Zn10 did not affect the proof stress $R_{p0.2}$, or the tensile strength R_m , while significantly increasing the hardness of alloy AW 7022.

The heat treatment of the squeeze castings significantly (three-fold, in the case of alloy 201.0!) increases the proof stress ($R_{p0.2}$). Such a large increase of the mechanical properties indirectly proves the particular structure of the casting – it must be characterized by very high compactness (very low porosity). It should be

charakteryzować się bardzo dużą zwartością (znikoma porowatością). Na uwagę zasługuje fakt, że stop ten po obróbce cieplnej ma niemal identyczne wartości wytrzymałości mechanicznej jak stop do przeróbki plastycznej AW 7022. Posiada jednak mniejszą twardość.

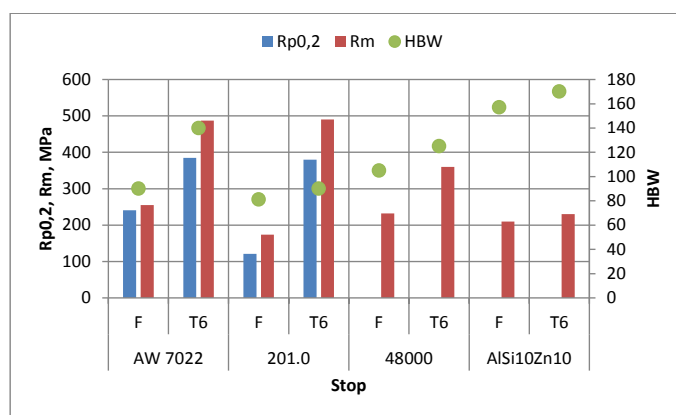
Obiecujące wyniki wartości wytrzymałości mechanicznej przedstawia stop AlSi10Zn10. Jest on znacznie tańszy od stopu 201.0. Sprawą wymagającą dalszych badań jest jego obróbka cieplna – niezwykle trudna z uwagi na taki dobór składników stopowych, który jest na granicy ich maksymalnej rozpuszczalności w aluminium.

Przedstawione wyniki badań stwarzają możliwość szerokiego doboru stopu pod konkretne wymagania w zależności od potrzeb – wysoka wytrzymałość, plastyczność lub twardość (rys. 10).

noted that this alloy, after heat treatment, exhibits almost identical mechanical strength properties with the ones of alloy AW 7022, used for plastic treatment. However, it is characterized by lower hardness.

Promising results of the mechanical strength values are exhibited by alloy AlSi10Zn10. It is much cheaper than alloy 201.0. A matter requiring further investigation is its heat treatment, which is extremely difficult, due to the selection of its alloy elements being at the limit of their maximal solubility in aluminum.

The presented investigation results provide the possibility of a broad selection of alloy options, according to the specific requirements depending on the given needs – a high strength, plasticity or hardness (Fig. 10).



Rys. 10. Właściwości mechaniczne odlewów z badanych stopów prasowanych w stanie ciekłym

Fig. 10. Mechanical properties of castings made of the examined squeeze casting alloys

5. Wnioski

Przeprowadzone badania wykazały, że stopy – tradycyjnie uznawane za nieodlewnicze (przeznaczone do przeróbki plastycznej) – mogą być skutecznie zastosowane w technologii prasowania w stanie ciekłym. Poszerza to znacznie zakres stosowania stopów aluminium w wykonywaniu wysokowytrzymałych odlewów o właściwościach mechanicznych niespotykanych w tradycyjnych stopach odlewniczych.

Odpowiednio dobrane parametry obróbki cieplnej znacząco podwyższają właściwości mechaniczne badanych odlewów. Wyjątek stanowi tu stop AlSi10Zn10, dla którego obróbka cieplna wymaga dalszej optymalizacji. Niemniej stop ten w stanie lanym posiada najwyższą twardość – 145 HBW w przypadku odlewów kokilowych i 170 HBW dla odlewów prasowanych w stanie ciekłym.

5. Conclusions

The performed research demonstrated that the alloys which are traditionally viewed as wrought alloys can be effectively applied in squeeze casting technology. This significantly broadens the scope of application of aluminum alloys in the production of high-strength castings with such mechanical properties which are unknown in the case of traditional casting alloys.

Properly selected thermal treatment parameters significantly increase the mechanical properties of the examined castings. An exception is alloy AlSi10Zn10, for which heat treatment requires further optimization. Nevertheless, this alloy, when as-cast, has the highest hardness – 145 HBW in the case of the die castings and 170 HBW for the squeeze castings.

Podziękowania

Badania zrealizowano w ramach projektu „Zaawansowane materiały i technologie ich wytwarzania”

Acknowledgements

The research has been conducted within the frames of the project „Advanced materials and technologies

nr POIG.01.01.02-00-015/09-00. Rozwój technologii squeeze casting i tixocasting dla otrzymywania materiałów funkcjonalnych i gradientowych oraz odlewów ze stopów metali nieżelaznych zbrojonych lokalnie.

Szczególne podziękowania kieruję dla Panów dr. Andrzeja Gazdy, mgr. inż. Adama Tchórze, mgr. inż. Marcina Małysz i mgr. inż. Adama Bitki za pomoc w realizacji badań.

of their production” no. POIG.01.01.02-00-015/09-00. Development of the squeeze casting and thixocasting technology applied to obtain functional and gradient materials as well as casts from locally reinforced non-ferrous metals.

I would like to express my special thanks to Andrzej Gazda, PhD, Adam Tchórz, M.Sc. Eng., Marcin Małysza, M.Sc. Eng. and Adam Bitka, M.Sc. Eng. for their help in the realization of the research.

Literatura/References

1. Sobczak J. 1993. *Teoretyczne i praktyczne podstawy procesu prasowania w stanie ciekłym (squeeze casting) metali nieżelaznych*. *Prace Instytutu Odlewnictwa* 43 (sp. is. 41).
2. Sobczak J.J. 2016. *Teoria, praktyka, stan aktualny i perspektywy rozwoju odlewania pod ciśnieniem – wybrane zagadnienia*. Wydawnictwo skryptowe. Kraków: Instytut Odlewnictwa.
3. https://static8.depositphotos.com/1041725/909/v/950/depositphotos_9090899-stock-illustration-hydraulic-press-or-bramah-press.jpg [Dostęp: 26.06.2017].
4. <http://www.ubemachinery.co.jp> [Dostęp: 26.06.2017].
5. PN-EN 10002-1:2004 Metale – Próba rozciągania – Część 1: Metoda badania w temperaturze otoczenia.
6. Sobczak J., G. Sęk-Sas, Z. Lech. Patent PL 158900 „Odlewniczy stop aluminium o podwyższonych i wysokich własnościach mechanicznych”, 30.10.1992 WUP 10/92.
7. Smillie M. 2006. *Casting and Analysis of Squeeze Cast Aluminium Silicon Eutectic Alloy*. Christchurch, New Zeland: University of Canterbury.
8. Schwam D., J.F. Wallace, Q. Chang, Y. Zhu. 2002. *Optimization of the squeeze casting process for aluminum alloy parts*. Washington D.C.: U.S. Department of Energy.
9. Ashiri R., F. Karimzadeh, B. Niroumand. 2014. „On effect of squeezing pressure on microstructural characteristics, heat treatment response and electrical conductivity of an Al-Si-Mg-Ni-Cu alloy”. *Materials Science and Technology* 30 (10) : 1162–1169.
10. Reguła T., A. Fajkiel, P. Dudek, K. Saja. 2014. „Odlewanie stopów do przeróbki plastycznej z udziałem ciśnienia zewnętrznego / Casting of wrought alloys under external pressure”. *Prace Instytutu Odlewnictwa / Transactions of the Foundry Research Institute* 54 (4) : 3–11.
11. PN-EN ISO 6892-1:2010 Metale – Próba rozciągania – Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej.
12. PN-EN 573-1:2006 – Aluminium i stopy aluminium – Skład chemiczny i rodzaje wyrobów przerobionych plastycznie – Część 1: System oznaczeń numerycznych.
13. <http://www.matweb.com> [Dostęp: 26.06.2017].
14. Hesse W. 2011. *Aluminium Material Data Sheets*. Berlin, Wien, Zürich: Beuth Verlag GmbH.
15. PN-EN 755-2:2016-05 – Aluminium i stopy aluminium – Pręty, rury i kształtowniki wyciskane – Część 2: Własności mechaniczne.
16. SAE AMS 4223 E – Aerospace Material Specification. Aluminum Alloy, Castings 4.5Cu - 0.70Ag - 0.30Mn - 0.25Mg - 0.25Ti (A201.0-T4) Solution Heat Treated and Naturally Aged / Note: Revision E.
17. UNS A12010 – Aluminum Foundry Alloy. Casting.
18. Kabir M.S., T.I. Minhaj, E.A. Ashrafi, M.M. Islam. 2014. „The influence of ageing time and temperature on the structure and properties of heat treated A201.0 aluminum alloy”. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)* 3 (3) : 78–83.
19. Górny Z. 1992. *Odlewnicze stopy metali nieżelaznych: przygotowanie ciekłego metalu, struktura i właściwości odlewów*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
20. Lech Z., E. Czekaj, J. Nykiel, B. Kułaga. 2003. „Optymalizacja procesu obróbki cieplnej stopu tłokowego typu AlSi12CuNiMg, ze względu na twardość i stabilność wymiarową, w warunkach przemysłowych”. *Archiwum Odlewnictwa* 3 (8) : 75–90.