

## Odewanie stopów do przeróbki plastycznej z udziałem ciśnienia zewnętrznego

### Casting of wrought alloys under external pressure

Tomasz Reguła<sup>1</sup>, Aleksander Fajkiel<sup>1</sup>, Piotr Dudek<sup>1</sup>, Krzysztof Saja<sup>1</sup>

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

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

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

#### Streszczenie

W pracy opisano wyniki prób wytwarzania odlewów ze stopów aluminium do przeróbki plastycznej: 2024, 6061, 7075. Badaniom poddano odlewy wytworzone pod wysokim ciśnieniem (150 MPa) na maszynie do realizacji procesu prasowania w stanie ciekłym (ang. squeeze casting) UBE VSC 500. Za odlewy odniesienia posłużyły elementy odlewane grawitacyjnie. Odlewy poddano obróbce cieplnej do stanu umocnionego wydzieleniowo T6. Przeprowadzono badania kalorymetryczne, badania właściwości mechanicznych oraz metalografii ilościowej. Stwierdzono korzystny wpływ ciśnienia prasowania zarówno na mikrostrukturę oraz właściwości mechaniczne odlewów w stanie lanym, jak i obrobionym cieplnie.

Słowa kluczowe: stopy aluminium, stopy do przeróbki plastycznej, prasowanie w stanie ciekłym, właściwości mechaniczne

#### Abstract

The paper presents results of wrought alloys casting trials under external pressure. Three alloys were used in the experiment – namely: 2024, 6061 and 7075. The examinations were conducted on squeeze cast parts that solidified under high pressure (150 MPa) in a Vertical Squeeze Casting machine UBE VSC 500. Gravity castings were used as a reference. The castings were heat treated to T6 condition. DSC and quantitative metallographic examinations were carried out. Mechanical properties were also tested. The advantageous effect of the external pressure has been assessed based on the results of the quantitative metallography and mechanical properties in cast and in the T6 condition.

Keywords: aluminum alloys, wrought alloys, squeeze casting, mechanical properties

### 1. Wprowadzenie

Badane stopy z serii 2xxx, 6xxx i 7xxx, w stanie przerobionym plastycznie mają bardzo dobre właściwości mechaniczne, szczególnie po obróbce cieplnej, co pozwala na ich szerokie zastosowanie w przemyśle samochodowym, lotniczym itd. Wytrzymałość elementów wytwarzanych z omawianych stopów z wykorzystaniem klasycznych technologii odlewniczych jest znacząco niższa ze względu na zawartość dużej ilości nieciągłości strukturalnych. Są one nieuniknioną konsekwencją krzepnięcia tychże stopów w warunkach ciśnienia atmosferycznego.

Ze względu na obniżone właściwości technologiczne stopy o szerokim zakresie krzepnięcia nie są rekomendowane do procesów przerobu na drodze

### 1. Introduction

The 2xxx, 6xxx and 7xxx series alloys have remarkably good mechanical properties, especially after heat treatment. Due to this fact, they are widely utilized in automotive, aerospace, and similar industries. The durability of the elements made of the said alloys by means of traditional casting techniques is significantly lower as there are numerous structural discontinuities identifiable. They are unavoidable effects of the solidification of the said alloys under atmospheric pressure.

Considering the lowered technological properties, alloys with a wide solidification range are not recommended to be processed by means of casting [1,2]. Nevertheless, they are widely utilized as materials taken advantage of in the wrought alloy creation process.

odlewanie [1,2], znalazły jednak szerokie zastosowanie – głównie jako materiał do procesów przeróbki plastycznej. W odniesieniu do stopów odlewniczych, stopy te charakteryzują się silnie obniżoną lejunością oraz skłonnością do pęknięcia na gorąco, co spowodowane jest m.in. szerokim zakresem krzepnięcia [3]. Jednocześnie stopy do przeróbki plastycznej wykazują znakomite właściwości mechaniczne, szczególnie po obróbce cieplnej, co czyni je bardzo korzystnym materiałem konstrukcyjnym.

Ciśnienie zewnętrzne wywierane na lustro krzepnącego metalu wpływa korzystnie na wszystkie właściwości gotowych odlewów [4,5] zarówno przez zaprasowywanie nieciągłości strukturalnych powstających w trakcie krzepnięcia, jak i przez intensyfikację wymiany ciepła ze ściankami formy. Wpływa to na rozdrobnienie mikrostruktury oraz na eliminację nadmiernej porowatości w gotowych elementach wytworzonych przy udziale ciśnienia zewnętrznego.

Technologia prasowania w stanie ciekłym (ang. *squeeze casting*) łączy zalety procesów odlewniczych (wysoka produktywność, możliwość wytwarzania stosunkowo skomplikowanych geometrycznie kształtów) wraz z korzyściami wynikającymi z przeróbki plastycznej (wysokie właściwości mechaniczne wytwarzanych części) [6–8]. Ze względu na wysokie ciśnienie podczas krzepnięcia metalu oraz laminarne wypełnianie wnęki formy odlewy wytwarzane za pomocą tego procesu posiadają doskonałe właściwości mechaniczne oraz minimalną zawartość nieciągłości strukturalnych. Korzystny wpływ ciśnienia na wypełnianie wnęki formy daje możliwość wytwarzania elementów również ze stopów przeznaczonych typowo do przeróbki plastycznej [9,10].

W niniejszym artykule opisano wyniki przeprowadzonych eksperymentów mających na celu zbadanie możliwości technicznych oraz efektów jakie daje zastosowanie stopów o obniżonych właściwościach technologicznych do wytwarzania elementów prasowanych w stanie ciekłym przy użyciu kompleksu technologicznego UBE.

## 2. Metodyka

Materiałem do badań były odlewy grawitacyjne oraz prasowane w stanie ciekłym wykonywane ze stopów do przeróbki plastycznej serii 2xxx, 6xxx oraz 7xxx o składzie chemicznym, który podano w tabeli 1.

Metal topiono w oporowym piecu węgelnym STOTEK ALUSMELT 500 z tygłem wykonanym z SiC, uprzednio pokrytym zawiesiną azotku boru (BN). Po stopieniu ciekły metal wytrzymywano w temperaturze: 730°C dla stopu 7075, 740°C dla stopu 2024 i 750°C dla stopu 6061, a następnie odlewano do formy metalowej przeznaczonej do realizacji procesu prasowania w stanie ciekłym. Formę pokryto powłoką oddzielającą składającą się z 10% wodnego roztworu grafitu koloidal-

While taking into consideration casting alloys, they are characterised mainly by remarkably decreased castability and hot cracking susceptibility which are the results of, among other things, the wide solidification range [3]. At the same time, casting alloys have been proven to have exceptional mechanical properties, especially after heat treatment, which makes them remarkably efficient materials for structures.

External pressure applied to the top layer of a solidifying metal positively affects all the utilitarian features of the ready-made casts [4,5] due to both eliminating structural discontinuities occurring in the process of solidification and the intensification of heat exchange with the sides of the mould. These phenomena directly translate into the fragmentation of the microstructure, as well as the elimination of excessive porosity of the components made in the external pressure-based casting process.

The squeeze casting technology combines the advantages of casting processes (high productivity, ability to make relatively complex geometric shapes) with the benefits of cold forming (excellent mechanical properties of produced parts) [6–8]. Due to high pressure applied during the metal solidification procedure and laminar filling of the mould, the casts made in the said process have outstanding mechanical properties and a minimum number of observable structural discontinuities. The advantageous influence of pressure on the mould filling process offers the possibility to make various elements out of alloys that are typically designed for wrought processing [9,10].

The main objective of this paper is to present the outcomes of the experiments which were oriented towards the specification of technical capabilities and effects of the utilization of alloys with low technological properties in making squeeze casts by means of the Vertical Squeeze Casting machine by UBE.

## 2. Methodological background

Gravity and squeezed casts made of alloys for cold working purposes (series 2xxx, 6xxx, and 7xxx), were used for the examination. Their chemical composition is listed Table 1.

Metal was melted in the STOTEK ALUSMELT 500 soaking furnace in a SiC crucible. The crucible was previously covered with slurry boron nitride (BN). After the melting procedure, the metal was maintained in the temperature: 730°C for 7075 alloy, 740°C for 2024 alloy and 750°C for 6061 alloy and then transferred to a metal mould designed for squeeze casting. The aforementioned mould was covered with a 10% solution of colloidal graphite (Hydrokollag 17-13 made of

Tabela 1. Skład chemiczny badanych stopów  
Table 1. Chemical composition of the examined alloys

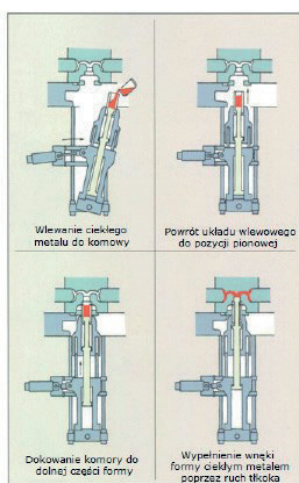
Skład chemiczny, % wag. / Chemical composition, wt. %									
Stop/Alloy	Si	Mg	Fe	Cu	Zn	Mn	Cr	Ti	Al
7075	0,36	2,70	0,31	1,75	6,05	0,25	0,25	0,10	reszta/bal.
6061	0,51	1,09	0,27	0,35	0,19	0,09	0,20	0,01	reszta/bal.
2024	0,03	1,39	0,35	4,22	0,14	0,61	0,02	0,05	reszta/bal.

nego (Hydrokollag 17-13 firmy Acheson). Temperaturę formy stabilizowano za pomocą dwóch urządzeń grzewczo-chłodzących Tool-Temp TT-390 i utrzymywano w temperaturze 200°C. Ciśnienie zewnętrzne wywierano za pomocą tłoka prasującego maszyny UBE VSC 500. Czas oddziaływania ciśnienia wynosił 20 s. Odlewy prasowane w stanie ciekłym wykonywano pod ciśnieniem 150 MPa. Wytworzono również serię grawitacyjnych odlewów odniesienia (krzepnących pod ciśnieniem atmosferycznym 0,1 MPa). W tym przypadku ciekły metal wlewano do kokili odwzorowującej kształt próbki wytrzymałościowej o przekroju okrągłym.

Na [rysunku 1](#) przedstawiono schemat wykonywania odlewów oraz zdjęcie stanowiska badawczego znajdującego się w Instytucie Odlewnictwa.

firm Acheson). The temperature of the mould was kept stable by means of two Tool-Temp TT-390 heating/cooling devices and maintained at 200°C. External pressure was applied by means of the UBE VSC 500 squeeze casting machine. The pressure application time was equal to 20 s. All squeeze casts were created with the external pressure of 150 MPa. Moreover, a series of gravity reference casts (solidifying under the atmospheric pressure of 0.1 MPa) was created. In that case, melted metal was transferred into the casting die in the shape of a round section testing sample.

[Figure 1](#) presents the scheme of cast making and casting station located in the Foundry Research Institute.



a)



b)

Rys. 1. Maszyna UBE VSC 500: a) schemat działania, b) stanowisko badawcze

Fig. 1. UBE VSC 500 machine: a) operation principle, b) casting station

Badane odlewy poddano zabiegom obróbki cieplnej do stanu umocnionego wydzieleniowo T6 poprzez wygrzewanie i gwałtowne chłodzenie (przesycanie) oraz sztuczne starzenie w podwyższonej temperaturze. Parametry obróbki cieplnej przedstawiono w [tabeli 2](#).

Elementy wycięte z wytworzonych odlewów posłużyły w dalszym etapie prac do uzyskania próbek wytrzymałościowych o kształcie według normy PN-EN 10002-1 (średnica bazy – 5 mm, długość – 25 mm) oraz materiału do badań metalograficznych.

The examined casts were heat treated to T6 condition. After proper heating the alloy was cooled down rapidly (solubilisation quenching), subsequently part was artificially aged in an increased temperature. The heat treatment parameters are provided in [Table 2](#).

The elements cut from the casts were used in the next part of the examination to make test samples in the shapes specified by the PN-EN10002-1 standard (base diameter – 5 mm, length – 25 mm) and material for metallographic examinations. The static pull tests

Tabela 2. Schematy temperaturowo-czasowe obróbki cieplnej  
Table 2. Time and temperature schemes of the alloy heat treatment procedure

Stop/Alloy	Stan/Condition	Temperatura, °C / Temperature, °C	Czas, h / Time, h
2024	T4	495	4
	T6 (ze stanu T4)	180	9
6061	T4	540	3
	T6 (ze stanu T4)	180	6
7075	T4	475	5
	T6 (ze stanu T4)	140	12

Statyczne próby zrywania prowadzono na maszynie wytrzymałościowej INSTRON 8880.

Próbki przeznaczone do badań mikrostrukturalnych poddano obserwacjom na mikroskopie optycznym Leica DM IRM z modułem do cyfrowej rejestracji obrazów JVC TK-C1380 oraz na skaningowym mikroskopie elektronowym E-SEM XL30 firmy FEI. Próbki następnie wytrawiono i ponownie poddano obserwacjom na mikroskopie optycznym. Ilościową analizę obrazów uzyskanych mikrofotografii przeprowadzono z użyciem oprogramowania Leica QWin oraz Measure IT Olympus Soft Imaging Solutions.

Pomiarów maksymalnych długości cięciw ziaren oraz długości i szerokości przekroju ziaren dokonano w oparciu o mikrofotografie ze skaningowej mikroskopii elektronowej oraz mikroskopii optycznej. Otrzymane wyniki posłużyły do sporządzenia histogramów, na podstawie których poprzez wykreślenie krzywych rozkładu normalnego wyznaczono średni rozmiar ( $x_c$ ), jak również szerokość rozkładu wielkości ziaren.

Za miarę ilościową szerokości rozkładu przyjęto szerokość połówkową krzywej rozkładu normalnego (FWHM). Stopień dopasowania krzywych rozkładu normalnego do danych eksperymentalnych określono współczynnikiem  $R^2$ .

Badania kalorymetryczne przeprowadzono wysokotemperaturowym kalorymetrem skaningowym na aparacie DSC 404 F1 Pegasus firmy NETZSCH w atmosferze ochronnej argonu z szybkością nagrzewania 5 K/min w zakresie od temperatury otoczenia do około 700°C. Zarejestrowano krzywe DSC podczas nagrzewania stopu i studzenia.

### 3. Wyniki badań

W badaniach wykorzystano unikalny w skali krajowej kompleks do prasowania w stanie ciekłym firmy UBE, składający się m.in. z pionowej prasy UBE VSC o sile zwierania 500 ton. Wysokie ciśnienie prasowania (150 MPa) stosowane w procesie *squeeze casting* niweluje niekorzystne właściwości technologiczne badanych

were performed by means of the INSTRON 8880 metal durability testing machine.

The samples for the microstructural examinations were checked under the Leica DM IRM optical microscope with the JVC TK-C1380 digital image recording module, as well as under the FEI E-SEM XL30 scanning electron microscope. Quantitative analysis of the recorded micro images was made by means of the Leica QWin and Measure IT Olympus Soft Imaging Solutions software.

Measurements of the maximum length of grain chord, as well as the length and width of the grain section were made based on the micro images recorded through the utilization of optical and electron microscopes. The obtained results were afterwards utilized to create histograms based on which (by means of the specification of normal distribution curves) the average size ( $x_c$ ) and distribution range of the grain size were calculated.

The indicator of the distribution range was the full width at half maximum (FWHM) of the normal distribution curve. The relation between the said curve and the research data was set as the  $R^2$  coefficient.

Calorimetric tests were carried out by means of the NETZSCH high-temperature scanning calorimeter with the DSC 404 F1 Pegasus camera in a controlled argon atmosphere with a heating rate of 5 K/min in a temperature ranging from ambient temperature up to approximately 700°C. During the process of heating and cooling down the alloys, the DSC curves were recorded.

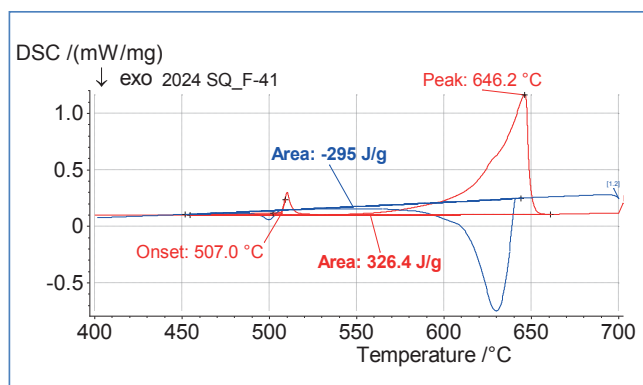
### 3. Results and discussion

The study used a Vertical Squeeze Casting machine with the clamping force of 500 tons. High casting pressure (150 MPa) utilized in the squeeze casting process nullified the technological disadvantages of the examined alloys, making it possible to create fault-free alloys even with the utilization of low castability input material.

stopów, co pozwala na wytworzenie odlewów bez wad, pomimo niskiej lejułości materiału wejściowego.

Wyniki badań kalorymetrycznych umożliwiły poznanie zakresów krzepnięcia dla stopów o różnym składzie chemicznym wykorzystywanych w eksperymencie. Przykładowy wykres DSC dla stopu 2024 przedstawiono na [rysunku 2](#). Zakresy krzepnięcia wynoszą: 139,2°C, 90,5°C i 152,6°C odpowiednio dla badanego stopu 2024, 6061 oraz 7075. Szerokie zakresy krzepnięcia są jedną z przyczyn niskich właściwości technologicznych stopów do przeróbki plastycznej ze względu na niekorzystne efekty występujące w trakcie krystalizacji, m.in. tworzenie dużej ilości pustek w przestrzeniach międzydendrytycznych oraz pęknięć wzdłuż mikrokanalików, uformowanych przez ruch kapilarny fazy ciekłej [3].

The outcomes of calorimetric analyses made it possible to specify the solidification ranges of the alloys with varying chemical composition used in the discussed examination. For example the DSC chart for the 2024 alloy is presented in [Figure 2](#). The solidification ranges were equal to: 139.2°C, 90.5°C and 152.6°C for 2024, 6061 and 7075 alloys, respectively. Wide solidification ranges is one of the reasons for low technological properties of heat treated alloys, especially due to disadvantageous phenomena taking place during the crystallization process, such as the creation of too many voids in the interdendritic areas, as well as fractures along micro canals formed by the capillary motion occurring during the squeeze casting procedure [3].



Rys. 2. Wykres DSC stopu 2024

Fig. 2. DSC chart for the 2024 alloy

Badane stopy odlewane do kokili w stanie litym posiadają umiarkowane właściwości mechaniczne. Wartość wytrzymałości na rozciąganie wynosi: 206 MPa, 147 MPa i 192 MPa odpowiednio dla stopu 2024, 6061 i 7075 przy wydłużeniu całkowitym równym: 1,4%, 7,3% i 0,9%. Właściwości mechaniczne badanych stopów można znacząco zwiększyć przez użycie ciśnienia zewnętrznego w trakcie krzepnięcia. Średnie wartości wytrzymałości na rozciąganie uzyskane z badań próbek wyciętych z odlewów prasowanych w stanie ciekłym pod ciśnieniem około 150 MPa wzrosły średnio o 20%, a wydłużenia o 140% w odniesieniu do odlewów grawitacyjnych. Wartości  $R_m$  wynoszą: 244 MPa, 172 MPa i 239 MPa przy wydłużeniu odpowiednio: 3,9%, 12,0% i 2,2%.

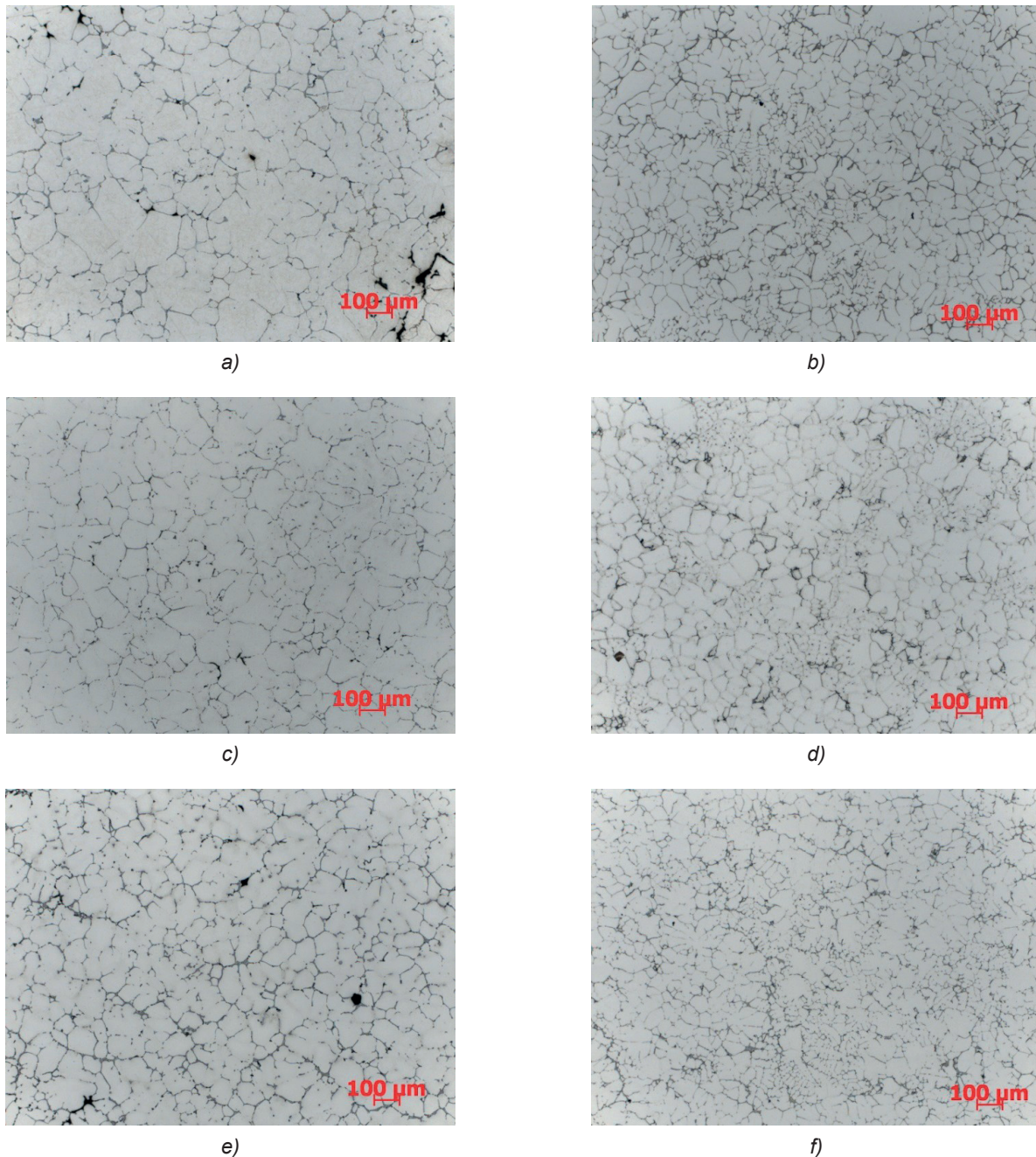
Wykazano, że wzrost właściwości wywołany jest zmniejszeniem porowatości odlewów oraz rozdrobnieniem mikrostrukturalnym badanych próbek. Na [rysunku 3](#) przedstawiono obrazy mikrostrukturalne odlewów grawitacyjnych oraz prasowanych w stanie ciekłym. Mikrostruktury odlewów grawitacyjnych zawierają duży udział porowatości, co jest spowodowane charakterem ich krzepnięcia. Szeroki zakres pomiędzy liniami likwidus i solidus powoduje powstawanie wewnętrznych

The examined wrought alloys transferred to the casting die had moderate mechanical properties. Their tensile strength was equal to: 206 MPa, 147 MPa, and 192 MPa for the 2024, 6061 and 7075 alloys, respectively, with the total elongation equal to: 1.4%, 7.3% and 0.9%. The mechanical properties of the examined alloys were then notably improved by means of external pressure utilization during their solidification. The average tensile strength coefficient of the wrought alloys, in the case of which the pressure of approximately 150 MPa was applied, increased by 20% on average and hot workability increased by 140% in comparison to gravity casts. The  $R_m$  values were equal to 244 MPa, 172 MPa and 239 MPa for hot workability of 3.9%, 12.0% and 2.2%, respectively.

The performed examination indicated that the improvement of the basic properties were caused by the decrease in porosity of the casts and microstructural fragmentation of the samples. [Figure 3](#) presents microstructural images of gravity and squeezed casts. The microstructures of the gravity casts are characterised by their high porosity caused by their solidification method. The wide range between the liquidus and solidus lines translated directly into the creation of internal empty

puszek związanych z ruchem ciekłej fazy w przestrzeniach międzydendrytycznych [3]. Przyłożenie ciśnienia zwiększa gwałtownie szybkość chłodzenia, tym samym redukując czas krystalizacji odlewu, co sprzyja zmniejszeniu tendencji do powstawania tego typu porowatości. Wzrost szybkości chłodzenia wpływa też na rozdrobnienie mikrostrukturalne odlewów, o czym świadczą badania metalografii ilościowej, których wyniki dla badanych stopów przedstawiono w tabeli 3.

spaces between the interdendritic areas [3]. The application of additional pressure rapidly increased the cooling time, thus lowering the cast crystallization time. Such a procedure decreased the porosity of the cast. The cooling time decrease also affected the microstructural cast fragmentation. The formulated hypothesis was confirmed by the outcomes of the quantitative metallographic examinations, the results of which are presented in Table 3.



Rys. 3. Mikrostruktury badanych stopów odlewanych grawitacyjnie i prasowanych w stanie ciekłym: a) 2024 (0,1 MPa), b) 2024 (150 MPa), c) 6061 (0,1 MPa), d) 6061 (150 MPa), e) 7075 (0,1 MPa), f) 7075 (150 MPa)

Fig. 3. Microstructures of the examined gravity and squeezed alloys: a) 2024 (0.1 MPa), b) 2024 (150 MPa), c) 6061 (0.1 MPa), d) 6061 (150 MPa), e) 7075 (0.1 MPa), f) 7075 (150 MPa)

Tabela 3. Wyniki badań metalografii ilościowej  
 Table 3. Results of the quantitative metallographic examinations

Stop/ Alloy	Ciśnienie prasowania, MPa / Casting temperature, MPa	Średni rozmiar ziarna, $\mu\text{m}$ / Average grain size, $\mu\text{m}$	Średnia powierzchnia wydzieliń ( $\text{Mg}_2\text{Si}$ , Si, $\text{Al}_2\text{Cu}$ ), $\mu\text{m}^2$ / Average fragmentation size ( $\text{Mg}_2\text{Si}$ , Si, $\text{Al}_2\text{Cu}$ ), $\mu\text{m}^2$	Gęstość obiektów strukturalnych, ilość obiektów, $\text{mm}^2$ / Structural density, number of objects, $\text{mm}^2$
2024	0,1	101,3	16,07	$4,0 \cdot 10^3$
	150	67,4	12,21	$9,3 \cdot 10^3$
6061	0,1	107,3	19,13	$2,7 \cdot 10^3$
	150	79,7	15,10	$5,3 \cdot 10^3$
7075	0,1	95,6	17,84	$8,0 \cdot 10^3$
	150	63,5	8,41	$2,1 \cdot 10^3$

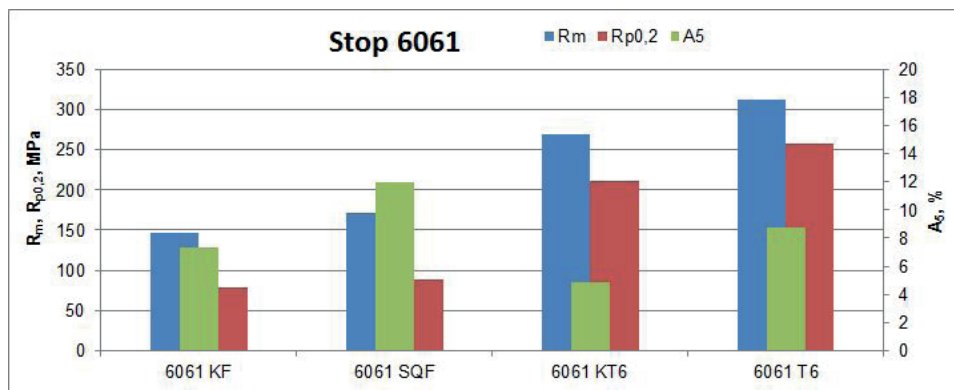
Właściwości mechaniczne stopów do przeróbki plastycznej mogą być znacząco podwyższone przez przeprowadzenie zabiegów obróbki cieplnej.

W eksperymencie przeprowadzono zabiegi przesycań oraz sztucznego starzenia do stanu T6, również w przypadku stopu 2024, który zazwyczaj starzony jest naturalnie. Wyniki badań właściwości mechanicznych badanych stopów odlewanych grawitacyjne i pod ciśnieniem w stanie lanym oraz umocnionym wydzieleniowo przedstawiono na rysunku 4.

Mechanical properties of the examined alloys may be notably improved by means of heat treatment. During the experiment, the quenching and artificial ageing to T6 condition procedures were performed, even for the 2014 alloy, which is aged in a natural manner normally. The outcomes of the examinations of the mechanical properties of both gravity and squeezed alloys are presented in Figure 4.



a)



b)



c)

Rys. 4. Właściwości mechaniczne badanych stopów odlewanych grawitacyjnie (K) i pod ciśnieniem 150 MPa (SQ) w stanie lanym (F) i po obróbce cieplnej do stanu T6: a) stop 2024, b) 6061, c) 7075

Fig. 4. Mechanical properties of gravity (K) and squeezed alloys 150 MPa (SQ) in the as-cast state (F) and after heat treatment to T6 condition: a) 2024, b) 6061, c) 7075 alloys

Elementy odlane grawitacyjnie ze stopu 2024 w stanie umocnionym wydzieleniowo miały wartość wytrzymałości na rozciąganie na poziomie 326 MPa przy wydłużeniu równym 2,9%. W przypadku tego materiału odlewane pod ciśnieniem 150 MPa wytrzymałość na rozciąganie wzrosła do 376 MPa przy wydłużeniu 4,9%. Analogiczne wyniki uzyskano dla stopu 6061, gdzie wariant prasowany w stanie ciekłym po obróbce cieplnej do stanu T6 posiadał znacząco korzystniejsze właściwości w odniesieniu do elementów odlewanych grawitacyjnie. W przypadku odlewów prasowanych pod ciśnieniem 150 MPa uzyskano wytrzymałość na rozciąganie na poziomie 310 MPa przy plastyczności 9%. Najkorzystniejsze właściwości mechaniczne uzyskano w przypadku elementów wykonanych ze stopu 7075. Odlewy prasowane w stanie ciekłym w stanie T6 miały wartości 500 MPa przy plastyczności na poziomie 4%.

Duża różnica w poziomie właściwości odlewów grawitacyjnych i prasowanych w stanie ciekłym po obróbce cieplnej jest wynikiem większego rozdrobnienia mikrostrukturalnego i wzrostu gęstości badanych odlewów.

#### 4. Wnioski

1. Technologia prasowania w stanie ciekłym umożliwia wykonywanie odlewów również ze stopów do przeróbki plastycznej.
2. Ciśnienie prasowania wpływa pozytywnie na właściwości mechaniczne badanych detali, redukując ilość wad wewnętrznych typu porowatości oraz wywołując rozdrobnienie mikrostruktury.
3. Obróbka cieplna znacząco podwyższa właściwości mechaniczne stopów – w szczególności prasowanych w stanie ciekłym.

Gravity cast elements from alloy 2024 in the heat treated state were characterised by a value of tensile strength at 326 MPa at an elongation equal to 2.9%. In the case of this material cast at a pressure of 150 MPa, the tensile strength increased to 376 MPa at an elongation of 4.9%. Analogical results were obtained for alloy 6061 where the pressed variant in the liquid state after heat treated to the T6 condition showed significantly superior properties in relation to the gravity cast elements. For elements pressed under a pressure of 150 MPa, the tensile strength at a level of 310 MPa and hot workability of 9% was obtained. The most favourable mechanical properties were obtained for components made from alloy 7075. Squeeze castings in the T6 condition had values of 500 MPa at the level of hot workability of 4%.

The large difference in the properties of gravity and squeeze castings after the heat treatment is a result of an increased microstructural refinement and an increase in the density of the tested castings.

#### 4. Conclusions

1. The squeeze casting technology allows for casting with the use of wrought alloys.
2. Compressed pressure has a positive effect on the mechanical properties of the tested parts by reducing the number of internal defects (e.g. porosity) and refining the microstructure.
3. Heat treatment increases the mechanical properties of alloys to a significant degree – especially those compressed in squeeze casting.



## Podziękowania

Publikacja zrealizowana w ramach projektu „Zaawansowane materiały i technologie ich wytwarzania” nr POIG.01.01.02-00-015/09-00.

## Acknowledgements

This publication has been made as part of the “Advanced materials and technologies for their manufacture” project no. POIG.01.01.02-00-015/09-00.

## Literatura/References

1. Dong J. et al. (2003). Liquidus semi-continuous casting, reheating and thixoforming of a wrought aluminum alloy 7075. *Mat. Sci. Eng. A*, 345(1-2), 234-242.
2. Flemings M. (1974). *Solidification Processing*. New York: McGraw-Hill.
3. Kaufman J.G., Rooy E.L. (2004). *Aluminum Alloy Castings – Properties, Processes, and Applications*. Materials Park, OH: ASM International.
4. Sekhar J. (1985). Solidification by pressure application. *Scripta Metall.*, 19(12), 1429-1433.
5. Smith G. (1986). *Squeeze casting of pure Al/Si alloys*. Ph.D. Project: University of Southampton.
6. Ghomashchi M.R., Vikrov A. (2000). Squeeze casting: an overview. *J. Mater. Process. Tech.*, 101(1-3), 1-9.
7. Sobczak J.J. (1993). Teoretyczne i praktyczne podstawy procesu prasowania w stanie ciekłym metali nieżelaznych. *Prace Instytutu Odlewnictwa*, 41(43 special issue).
8. Pennington J. (1988). Squeeze-cast parts approach performance of forgings. *Mod. Met.*, 44(1), 52-60.
9. Yue T.M. (1996). Squeeze casting of light alloys and their composites. *J. Mater. Process. Tech.*, 58(2-3), 302-307.
10. Evans P.V., Keyte R., Ricks R.A. (1993). Squeeze casting of aluminium alloys for near net shape manufacture. *Mater. Design*, 14(1), 65-67.

