

Hybrydowa technologia HPDC&HSC

Hybrid HPDC&HSC technology

Piotr Dudek^{1*} , Jerzy J. Sobczak^{1,2,3} 

¹Sieć Badawcza ŁUKASIEWICZ – Instytut Odlewnictwa, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków, Polska

²Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Odlewnictwa, ul. Reymonta 23, 30-059 Kraków, Polska

³Bulgarian Academy of Sciences, IMSET, 67 Shipchensky prohod Str., 1574 Sofia, Bułgaria

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

²AGH – University of Science and Technology, Faculty of Foundry Engineering, ul. Reymonta 23, 30-059 Kraków, Poland

³Bulgarian Academy of Sciences, IMSET, 67 Shipchensky prohod Str., 1574 Sofia, Bulgaria

*Corresponding author: piotr.dudek@iod.krakow.pl

Received: 06.05.2019. Accepted in revised form: 31.05.2019.

© 2019 ŁUKASIEWICZ – Instytut Odlewnictwa. All rights reserved.

DOI: 10.7356/iod.2019.03

Streszczenie

W artykule przedstawiono rys historyczny oraz stan obecny technologii odlewania z wykorzystaniem ciśnienia zewnętrznego na przykładzie odlewania pod wysokim ciśnieniem (High Pressure Die Casting – HPDC) oraz prasowania w stanie ciekłym (Squeeze Casting – SC). Wykazano podobieństwa i różnice obu technologii oraz obszary wspólne, które zostały wykorzystane do budowy współczesnych, hybrydowych maszyn łączących cechy HPDC i SC. Ostatnie lata przyniosły rozwój konstrukcji maszyn ciśnieniowych, które umożliwiły hybrydyzację technologii z wysoką elastycznością procesu, polegającą na wyborze takiego sposobu przyłożenia ciśnienia zewnętrznego, w którym można pełniej wykorzystać jego wpływ jako czynnika termodynamicznego. Zaprezentowano doświadczenia w zakresie prasowania w stanie ciekłym i stało-ciekłym, uzyskane w badaniach prowadzonych w Instytucie Odlewnictwa w Krakowie.

Słowa kluczowe: odlewanie pod wysokim ciśnieniem, prasowanie w stanie ciekłym, stopy aluminium, stopy magnezu, kompozyty metalowe

Abstract

The article presents the history and current state of the technology of external pressure casting in the case of High Pressure Die Casting (HPDC) and Squeeze Casting (SC). The similarities and differences between the two technologies and the common areas that were used in the construction of modern hybrid machines combining the features of HPDC and SC were shown. Recent years have seen the development of pressure machine designs that have enabled the hybridisation of technologies with high flexibility of the process, consisting in the choice of such a method of applying external pressure in which its influence can be more effectively used as a thermodynamic factor. The following experiments were presented in the field of liquid and solid-liquid casting, obtained from research conducted at the Foundry Research Institute in Kraków.

Keywords: High Pressure Die Casting, Squeeze Casting, aluminum alloys, magnesium alloys, metal matrix composites

1. Wstęp

Odewanie z wykorzystaniem ciśnienia zewnętrznego jest młodszym bratem technologii przetwarzania ciekłego metalu w gotowy wybór – szeroko pojętego odlewnictwa. Odlewnictwo jako rzemiosło towarzyszy

1. Introduction

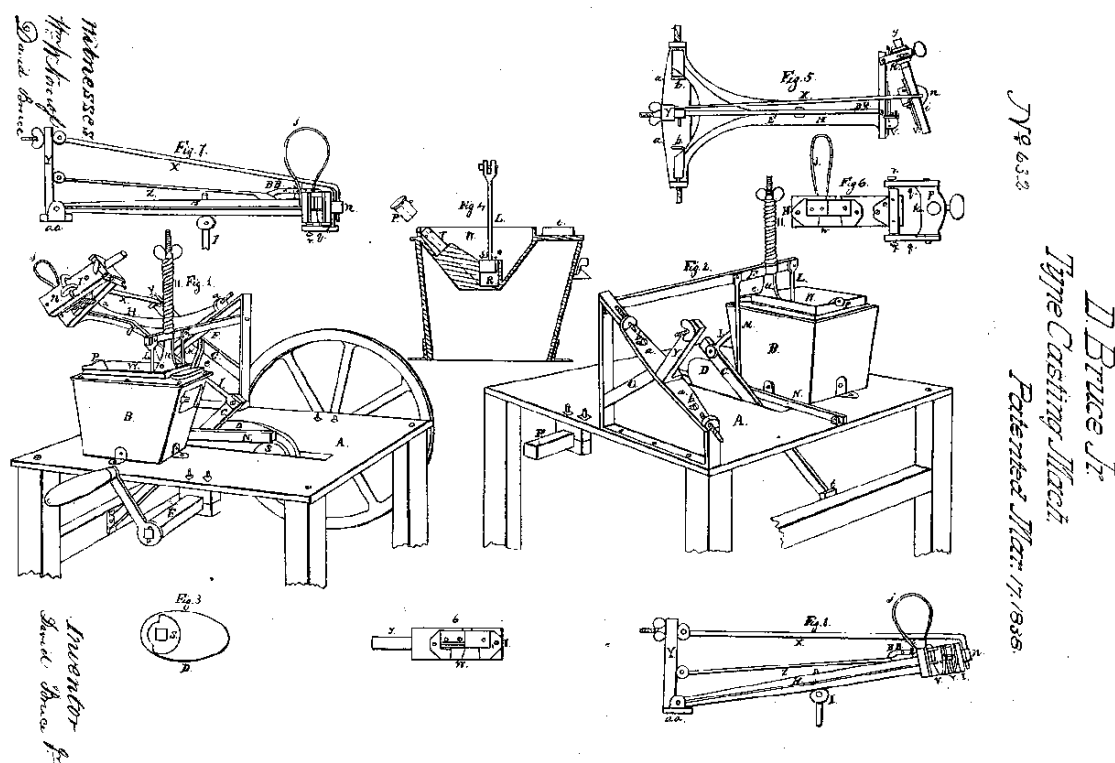
Casting with the use of external pressure is a younger sibling of the technology of processing liquid metal into a ready-made product – widely understood as casting. Metalcasting as a craft has accompanied man for 7000

człowiekowi już od 7000 lat – odlewnictwo z wykorzystaniem ciśnienia zewnętrznego – około 180 lat [1].

Pochodzenie procesu odlewania ciśnieniowego jest trudne do ustalenia. Analizując historię druku i tworzenia czcionek, można zauważyć, że w amerykańskim patencie (numer 632 z 1838 roku) przedstawiona jest pierwsza maszyna odlewnicza, wymyślona przez Davida Bruce'a Jr., która zawiera zasady odlewania ciśnieniowego (rys. 1).

years – foundry engineering with the use of external pressure – for about 180 years [1].

The origin of the pressure casting process is difficult to determine. Analysing the history of printing and font making, it can be seen that the American patent (number 632 from 1838) presents the first casting machine invented by David Bruce Jr., which contains the principles of pressure casting (Fig. 1).



Rys. 1. Schemat pierwszej maszyny odlewniczej, wykorzystującej zasady odlewania ciśnieniowego (według opisu patentowego Davida Bruce'a Juniora) [2]

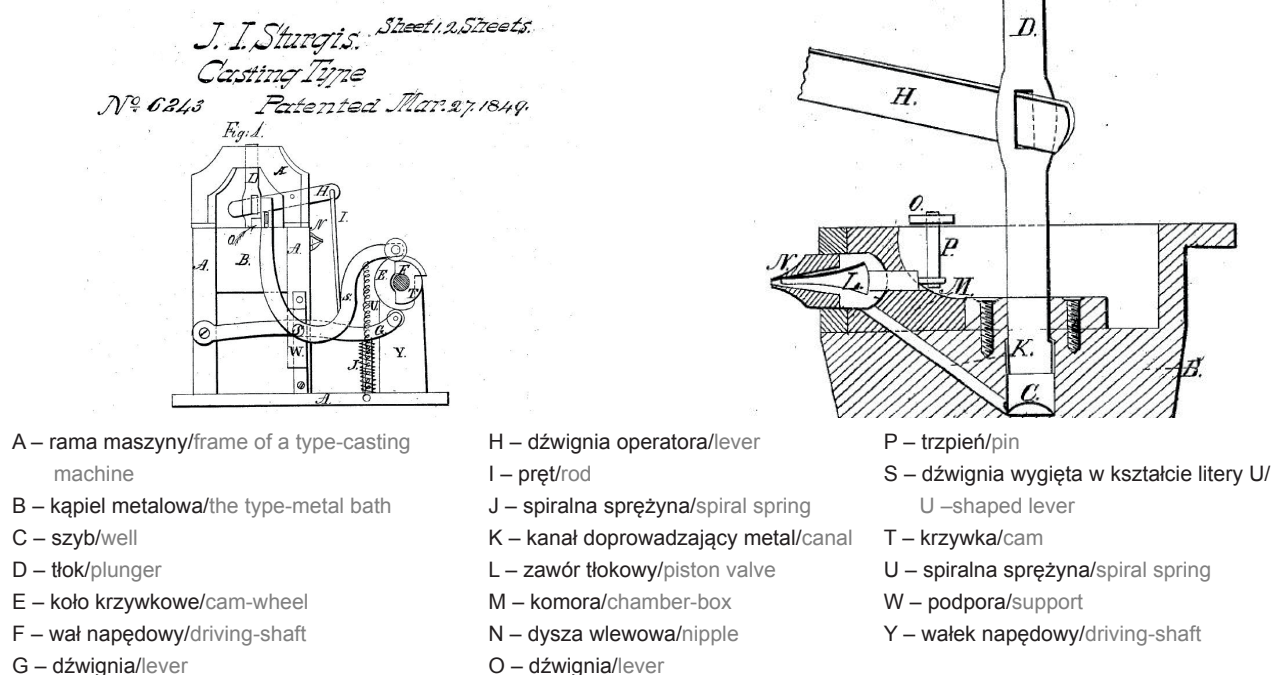
Fig. 1. Diagram of the first casting machine using the principle of pressure casting (according to David Bruce Jr.'s patent description) [2]

Najprawdopodobniej pierwowzorem do maszyny drukarskiej Bruce'a była maszyna opatentowana w 1805 roku w USA przez Williama Winga (*Types machine for casting*) oraz w 1806 przez jego ucznia, Elihu White'a (patent GB numer 2.979 – *A Machine for Casting or Founding Types, Letters, Spaces, and Quadrats Usually Made Use of In Printing*) [3,4].

Patent – US numer 6.243 – przyznany w 1849 roku, związany jest już bezpośrednio z odlewnictwem ciśnieniowym (*Improvement in type-casting machines*). Wynalazcą małej, ręcznej maszyny, która miała na celu zmechanizowanie produkcji czcionek drukarskich (poprzez wtrysk ołowiu), produkowanych do tej pory pojedynczo i ręcznie, był John I. Sturgis. Założenia tej maszyny Sturgis opracował już w 1838 roku. Działanie maszyny

Most probably the prototype for Bruce's printing machine was the machine patented in 1805 in the USA by William Wind (*Types machine for casting*) and in 1806 by his student, Elihu White (GB patent number 2.979 – *A Machine for Casting or Founding Types, Letters, Spaces, and Quadrats Usually Made Use Of In Printing*) [3,4].

Patent – US number 6.243 – granted in 1849, is directly related to pressure casting machines (*Improvement in type-casting machines*). John I. Sturgis was the inventor of a small hand-held machine, which aimed to mechanise the production of printing fonts (by means of lead injection), which until then had been produced individually and manually. The assumptions of this machine were developed by Sturgis as early as 1838. The



Rys. 2. Schemat maszyny do odlewania czcionek drukarskich (według opisu patentowego Johna I. Sturgisa [5])
Fig. 2. A schematic diagram of a type-casting machine (According to the patent description of John I. Sturgis [5])

przypomina współczesne ciśnieniowe maszyny gorąco-komorowe (rys. 2).

Przez pierwsze 30 lat odlewanie ciśnieniowe służyło jedynie do odlewania czcionek drukarskich. Stosowano wtedy intuicyjnie różne kompozycje cyny i ołowiu, tworząc stopy odlewnicze. W 1868 roku Brytyjczyk Charles Babbage wykorzystał technologię wtrysku pod ciśnieniem stopów ołowiu, antymonu, cyny i cynku do produkcji drobnych elementów precyzyjnych dla liczydeł mechanicznych [6].

Od 1892 roku rozpoczęto produkcję odlewanych ciśnieniowo elementów do gramofonów i kas fiskalnych, jednak masowa produkcja wielu rodzajów części rozpoczęła się dopiero na początku XX wieku [7].

Herbert H. Franklin w 1893 roku założył firmę pod własnym imieniem. **Była to pierwsza firma na świecie** zajmująca się wykonywaniem maszyn i odlewów ciśnieniowych, takich jak przekładnie i tuleje łożyskowe. W 1904 roku w tej firmie po raz pierwszy w praktyce światowej zostały odlane ciśnieniowo łożyska do korbowodów samochodowych.

Opatentowanie w 1929 roku przez Josefa Polaka zimnokomorowej maszyny ciśnieniowej z poziomą komorą prasowania wpłynęło na znaczny rozwój ciśnieniowego odlewnictwa stopów aluminium, które dopiero w 1967 roku przewyższyło produkcję odlewów ciśnieniowych ze stopów cynku – dotychczasowych liderów.

Współczesne maszyny ciśnieniowe charakteryzują się dużymi prędkościami wtrysku i dużymi ciśnieniami prasowania. Prędkość metalu w szczelinie wlewowej dochodzi do 100 m/s, a siła zwierania maszyn ciśnieniowych – do 45 000 kN. Wysoka prędkość metalu zwią-

operation of the machine resembles modern hot chamber pressure die casting machines (Fig. 2).

For the first 30 years, pressure casting was only used to cast printing fonts. Different compositions of tin and lead were used intuitively to form casting alloys. In 1868, British man Charles Babbage used the technology of pressurised injection of alloys of lead, antimony, tin and zinc to produce small precision elements for mechanical counters [6].

In 1892, the production of pressure-casting elements for turntables and fiscal cash registers began. However, mass production of many kinds of parts started only at the beginning of the 20th century [7].

Herbert H. Franklin founded the company under his own name in 1893. **It was the first company in the world** to produce machines and pressure castings such as gears and bearing bushings. In 1904, for the first time ever, bearings for automotive connecting rods were cast in this company.

In 1929 Josef Polak patented a cold chamber pressure die casting machine with a horizontal press chamber, which led to a significant development of aluminium alloy casting, which only in 1967 exceeded the production of zinc alloy castings – the former leaders.

Modern pressure casting machines are characterised by high injection speeds and high pressures. The metal velocity at the gate reaches 100 m/s and the locking force of pressure casting machines – up to 45,000 kN. The high speed of the metal is connected with the short time of filling the mould cavity – milliseconds. The use of modern electronics enables the control of such a dynamic process, and the progress

zana jest z krótkim czasem wypełniania wnęki formy – rzędu milisekund. Zastosowanie nowoczesnej elektroniki umożliwia kontrolę tak dynamicznego procesu, a postęp w metalurgii stopów oraz szerokie zastosowanie systemów obniżającego ciśnienie we wnętrzu formy ciśnieniowej (systemy *Vacuum*) – wykonywanie odpowiedzialnych odlewów dla przemysłu samochodowego (tak zwanych odlewów strukturalnych).

Prasowanie metalu w stanie ciekłym (*Squeeze Casting*) jest technologią nieco starszą od odlewania pod wysokim ciśnieniem. Najwcześniejsze doniesienia o możliwości prasowania metalu w stanie ciekłym pochodzą z 1878 roku. Podwaliny tego procesu zostały opracowane już w 1795 roku, kiedy to Joseph Bramah opatentował prasę hydrauliczną (*British Patent* nr 2045) [8]. Prasa ta umożliwiała „prasowanie ciekłego metalu” na przykładzie wykonywania rur ołowianych (1797). To wydarzenie traktowane jest jako początek technologii *Squeeze Casting* [9]. Inne źródła [10] podają, że najwcześniejsze wzmianki o technologii SC pochodzą z 1819 roku, a szczegółowe opisanie tej technologii zawiera praca „Kucie ciekłego metalu – Shtampovka iz zhidkogo metalla” (1964) V.M. Plyatski’ego oraz polska monografia [9].

Komercyjny rozwój prasowania w stanie ciekłym rozpoczął się w Europie, w Stanach Zjednoczonych, Japonii i Chinach dopiero po roku 1960. W latach 70. XX wieku nastąpił gwałtowny rozwój tej technologii. W okresie maj 1978 – marzec 1979 prowadzone były intensywne prace nad wykonaniem odlewu podstawy dla rakiet PATRIOT Warhead XM248E1 technologią SC [9].

Technologia prasowania w stanie ciekłym realizowana jest od samego początku w wariantcie pionowego wywierania ciśnienia (*VSC – Vertical Squeeze Casting*) w sposób bezpośredni lub pośredni.

W przypadku bezpośredniego odlewania metodą SC, ciekły metal jest wlewany do otwartej formy, a hydrauliczny stempel lub tłok naciska od góry ku dołowi (lub od dołu ku górze) na ciekły stop (prasowanie stemplowe i tłokowe). Największą zaletą tego procesu jest fakt, że nacisk jest rozłożony bezpośrednio na całą powierzchnię ciekłego metalu podczas krzepnięcia, sprzyjając wytwarzaniu odlewu o zminimalizowanej ilości nieciągłości strukturalnych. Metoda ta umożliwia wzmożoną wymianę ciepła, zapewniając rozdrobnienie ziarna, ale nie kontroluje w pełni geometrii odlewu w kierunku pionowym, zwłaszcza w wariantcie wywierania ciśnienia od góry, w głąb odlewu. W przypadku prasowania stemplowego może dochodzić do penetracji utlenionej warstwy powierzchniowej ciekłego metalu, a w przypadku zbyt szybkiego ruchu stempla nawet do zachodzenia przepływu turbulentnego.

W metodzie prasowania pośredniego stop jest wlewany do komory znajdującej się w dolnej części, a następnie za pomocą tłoka z siłownikiem hydraulicznym wciągany do wnęki formy. Przepływ metalu może być

in the metallurgy of alloys and the wide application of systems reducing pressure in the cavity of the pressure mould (Vacuum systems) – making responsible castings for the automotive industry (so-called structural castings).

Squeeze Casting is a slightly older technology than high pressure die casting. The earliest reports of the ability to press liquid metal date back to 1878. The foundations of this process were developed as early as 1795, when Joseph Bramah patented the hydraulic press (British Patent No. 2045) [8]. This press made it possible to “press liquid metal” on the example of making lead tubes (1797). This event is treated as the beginning of Squeeze Casting technology [9]. Other sources [10] state that the earliest references to SC technology date back to 1819, and a detailed description of this technology is contained in the work “Kucie ciekłego metalu – Shtampovka iz zhidkogo metalla” (1964). V.M. Plyatski and the Polish monograph [9].

The commercial development of squeeze casting began in Europe, the United States, Japan and China only after 1960. In the 1970s, the technology developed rapidly. Between May 1978 and March 1979, intensive work was carried out on the casting of the base for PATRIOT Warhead XM248E1 rockets with SC technology [9].

Squeeze casting technology has been implemented from the very beginning in the Vertical Squeeze Casting (VSC) variant directly or indirectly.

In the direct SC method, liquid metal is poured into an open mould and the hydraulic stamp or plunger presses from the top to the bottom (or from the bottom to the top) on the liquid alloy (stamp and plunger pressing). The biggest advantage of this process is that pressure is distributed directly over the entire surface of the liquid metal during solidification, favouring the production of castings with a minimised amount of structural discontinuities. This method enables increased heat transfer, ensuring grain fragmentation, but does not fully control the geometry of the casting in the vertical direction, especially in the variant of exerting pressure from the top into the casting. In the case of stamp pressing, the oxidised surface layer of liquid metal can be penetrated, and in the case of too fast movement of the stamp, even a turbulent flow can occur.

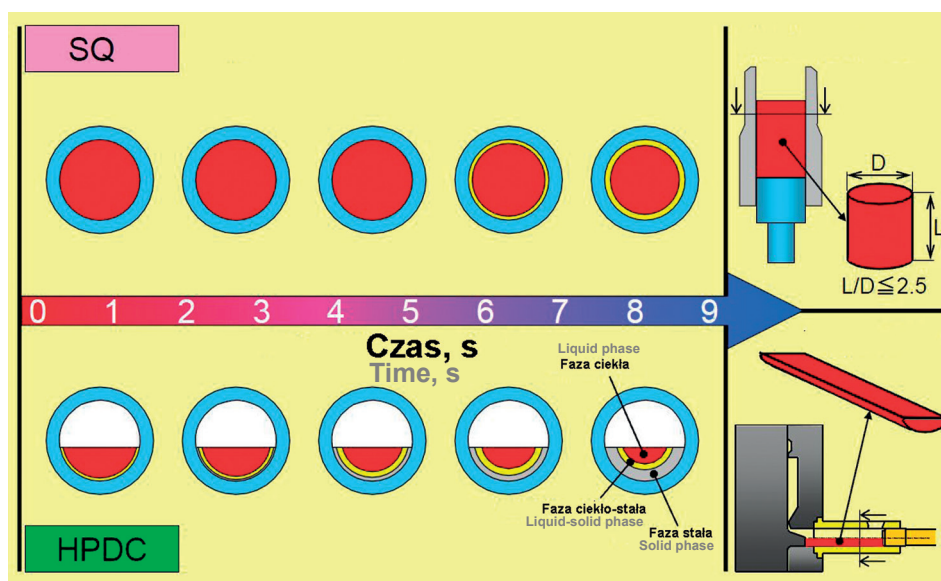
In the indirect pressing method, the alloy is poured into a chamber located in the lower part, and then pressed into the mould cavity by means of a plunger with a hydraulic cylinder. The metal flow can be controlled by the speed of the plunger and the rate at which the pressure rises.

The biggest advantage of vertical squeeze casting is a high (almost 100%) degree of chamber filling. This results in a smaller amount of gases entering the mould cavity and a high capacity to fill the mould cavity due to the lack of solid phase in the wall layer of the

kontrolowane przez prędkość tłoka i szybkość narastania ciśnienia prasowania.

Największą korzyścią pionowego prasowania w stanie ciekłym jest duży (niemal 100%) stopień wypełnienia komory. Wynika z tego mniejsza ilość gazów wprowadzanych do wnętrza formy oraz duża zdolność do wypełniania wnętrza formy z uwagi na brak fazy stałej w warstwie przyściennej komory prasowania (co ma miejsce w technologii HPDC) – rysunek 3.

chamber (which is the case with the HPDC technology) – Figure 3.



Rys. 3. Porównanie stopnia wypełnienia wnętrza formy w przypadku prasowania w stanie ciekłym (na górze) oraz w przypadku odlewania pod wysokim ciśnieniem (u dołu) [11]

Fig. 3. The comparison of the filling level of the mould cavity in the case of squeeze casting (top) and in the case of high pressure die-casting (bottom) [11]

Odlewy prasowane w stanie ciekłym – z uwagi na małą zawartość porowatości – mogą być poddawane procesowi obróbki cieplnej (rys. 4).

Ze względu na specyfikę procesu i brak wymogu dobrych właściwości odlewniczych, w technologii SC mogą być stosowane stopy do przeróbki plastycznej o dużym zakresie temperatury krzepnięcia, co sprzyja uzyskaniu wysokich właściwości mechanicznych odlewu (rys. 5).

Współczesne dążenia do gospodarki niskoemisyjnej i wykonywania odlewów „na gotowo” (*Near Net Shape*), a jednocześnie o dużej wytrzymałości i plastyczności, szczególnie predestynują technologię prasowania w stanie ciekłym. W ostatnich latach proces SC znalazł aplikację produkcyjną w USA (m.in. REL, Inc. Calumet, Madison-Kipp Corporation, Eck Industries, Inc. Wisconsin), Wielkiej Brytanii, Chinach i Japonii (Reterra Inc. Ryokamisusuki).

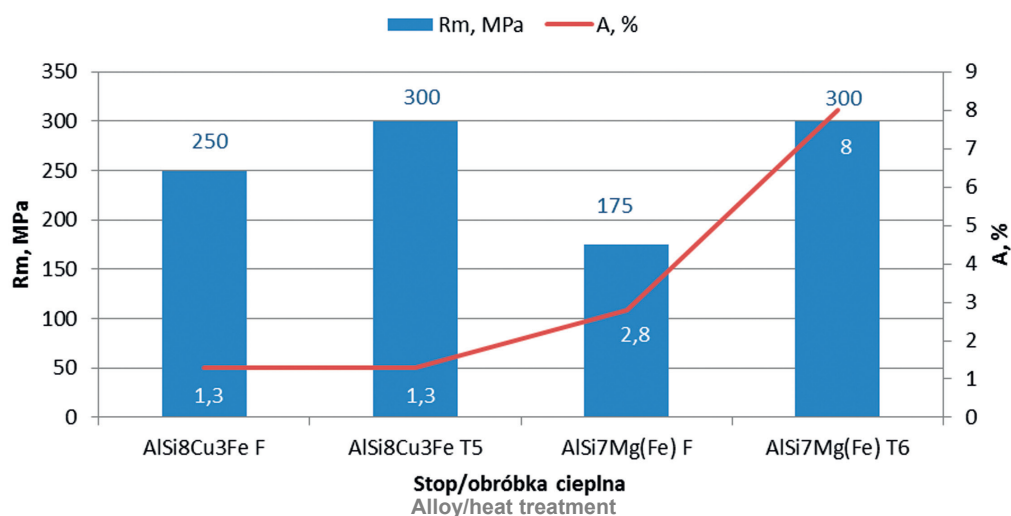
W 1997 r. w Ameryce Północnej było dziewięciu producentów odlewów wykonywanych technologią prasowania w stanie ciekłym, aktualnie ich liczba sięga kilkunastu [13].

Squeeze castings can be heat treated due to their low porosity content (Fig. 4).

Due to the specificity of the process and the lack of a requirement for good casting properties, SC technology can use alloys for plastic forming with a large range of solidification temperatures, which is conducive to obtaining high mechanical properties of the casting (Fig. 5).

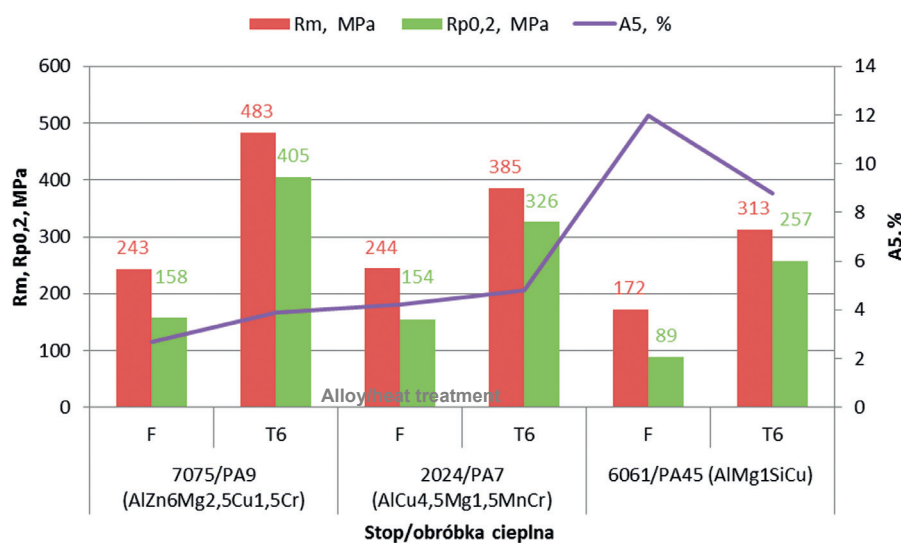
Modern aspirations for a low-carbon economy and ready-made castings (*Near Net Shape*), and at the same time of high strength and ductility, especially predestine the technology of squeeze casting. In recent years, the SC process has found a production application in the USA (e.g. REL, Inc. Calumet, Madison-Kipp Corporation, Eck Industries, Inc. Wisconsin), Great Britain, China and Japan (Reterra Inc. Ryokamisusuki).

In 1997, in North America there were nine producers of castings made with the use of squeeze casting technology, currently their number reaches over a dozen [13].



Rys. 4. Właściwości wytrzymałościowe odlewów otrzymanych w procesie squeeze casting z odlewniczych stopów aluminium (opracowanie własne na podstawie [12]). Właściwości wytrzymałościowe wyznaczano na próbkach wycinanych z odlewu

Fig. 4. Strength properties of castings obtained in the squeeze casting process from aluminium casting alloys (own elaboration based on: [12]). Strength properties were determined on samples cut from a casting



Rys. 5. Właściwości wytrzymałościowe wyznaczone na próbkach wyciętych z odlewów otrzymanych w procesie squeeze casting stopów aluminium przeznaczonych do przeróbki plastycznej (opracowanie własne – dane uzyskane w trakcie realizacji projekt ZAMAT). Właściwości wytrzymałościowe wyznaczano na próbkach wycinanych z odlewu

Fig. 5. Strength properties determined on samples cut from castings obtained during squeeze casting of aluminium alloys intended for plastic forming (own elaboration – data obtained during the ZAMAT project). Strength properties were determined on samples cut from a casting

Doświadczenia branżowe związane z odlewaniem metodą SC szybko rosną. Początkowo stosowano daną technologię do elementów, które napotkały problemy jako konwencjonalne odlewy. Wynikało to ze względu na ograniczenia projektowe, nowe zastosowania powodujące większe obciążenia, zwiększone wymagania dla szczelności odlewów. Następne, kolejne obszary

Industry experience with SC is growing rapidly. Initially, the technology was applied to elements that encountered the same problems as conventional castings. This was due to design constraints, new applications resulting in higher loads, increased requirements for the tightness of castings. Further growth areas were the replacement of aluminium alloy forgings or cast-

wzrostu to zastąpienie odlewek ze stopów aluminium lub odlewów dotychczas wykonywanych ze stopów żelaza odlewami prasowanymi w stanie ciekłym. Dla przykładu – badania mikrostruktury odlewu ze stopu A356 (AlSi7Mg) prasowanego w stanie ciekłym wykazały istotne zmniejszenie nie tylko pierwszorzędowego, ale również drugorzędowego rozstawu ramion dendrytu (*Secondary dendrite arm spacing – SDAS*) nawet do około 25 μm [13].

W USA proces SC wykorzystywany jest głównie dla odlewów motoryzacyjnych, takich jak elementy układu kierowniczego i zawieszenia (zwrotnice, wahacze). Tam gdzie wytrzymałość zmęczeniowa i plastyczność są ważnymi wymaganiami, proces SC jest zdecydowanie procesem optymalnym [14].

Z uwagi na coraz lepsze zrozumienie procesu oddziaływania ciśnienia zewnętrznego jako czynnika termodynamicznego na ciekły i krzepnący metal, tworzone są wiarygodne modele i algorytmy w celu optymalizacji procesu *Squeeze Casting*.

Już w 1995 roku prognozowano, że elementy wykonane technologią SC mogą zastąpić konwencjonalne części samochodowe wykonane z żeliwa i tłoczzonej stali [15]. Alex Monroe z NADCA, zasugerował, że skoro maszyny ciśnieniowe budowane są z poziomym (*HSC*) lub pionowym (*HVSC*) układem wtryskowym, korzystnym jest zaadaptowanie maszyn HPDC do technologii *Squeeze Casting*. Takiej konwersji dokonała firma BuhlerPrince, która produkuje maszyny ciśnieniowe „Liquid Metal Squeeze” o sile zwierania od 4000 do 40 000 kN w dwóch wersjach: z poziomym systemem zwierania i pionowym systemem wtryskowym oraz pionowym systemem zwierania i pionowym układem wtryskowym.

Wysokociśnieniowe systemy wtrysku w połączeniu z regulacją prędkości i ciśnienia w zamkniętej pętli umożliwiają wypełnienie formy odlewniczej z bardzo precyzyjną prędkością, zapewniając bardzo mały stopień turbulencji metalu podczas jej wypełniania [16].

W porównaniu z tradycyjnym odlewaniem pod wysokim ciśnieniem (*HPDC*), poziome prasowanie metalu w stanie ciekłym (*HSC*) to bardzo obiecujący sposób wytwarzania odlewów o wysokiej integralności, dzięki zmniejszonej porowatości gazowej i skurczowej w odlewach. Zasadniczą różnicą są prędkości wypełniania wnętrza formy – wolne w technologii *HSC* i bardzo szybkie w technologii *HPDC*. Ta duża prędkość wypełniania wnętrza formy ciśnieniowej powoduje problemy z porowatością odlewów. Zastosowanie obniżonego ciśnienia we wnętrzu formy ciśnieniowej (odlewanie w tak zwanej „próżni”) umożliwia wykonywanie odpowiedzialnych odlewów strukturalnych tą technologią, wymaga jednak doposażenia maszyny ciśnieniowej w odpowiednie urządzenia i ingerencję w konstrukcję formy.

W ostatnim okresie czasu pojawiły się maszyny ciśnieniowe realizujące zarówno proces *HPDC*, jak i *HSC*. Wykorzystywany jest w tym przypadku fakt, że w obu technologiach stosuje się poziomy system wtrysku me-

ings previously made of iron alloys with squeeze castings. For example, studies of the microstructure of A356 alloy (AlSi7Mg) squeeze cast showed a significant reduction not only in the primary but also in the secondary dendrite arm spacing (SDAS) to about 25 μm [13].

In the USA, the SC process is mainly used for automotive castings, such as steering and suspension components (swivel axles, wheel arms). Where fatigue strength and ductility are important requirements, the SC process is definitely an optimal one [14].

In view of the increasing understanding of the process of interaction of external pressure as a thermodynamic factor with liquid and solidifying metal, reliable models are being developed as well as algorithms to optimise the Squeeze Casting process.

As early as 1995, it was predicted that SC components could replace conventional automotive parts made of cast iron and pressed steel [15]. Alex Monroe of NADCA suggested that if pressure casting machines are built with a horizontal (HSC) or vertical (HVSC) injection systems, it is beneficial to adapt HPDC machines to Squeeze Casting technology. This conversion was made by BuhlerPrince, which manufactures “Liquid Metal Squeeze” pressure casting machines with a locking force of 4,000 to 40,000 kN in two versions: a horizontal locking system and a vertical injection system, and a vertical locking system and a vertical injection system.

High-pressure injection systems in combination with speed and pressure control in a closed loop enable the casting mould to be filled at a very precise speed, ensuring a very low degree of turbulence of the metal during its filling [16].

Compared to traditional high pressure die casting (HPDC), horizontal squeeze casting (HSC) is a very promising way to produce castings with high integrity due to reduced gas porosity and shrinkage in the castings. The main difference is the speed of filling the mould cavity – slow in HSC technology and very fast in HPDC technology. This high filling speed of the mould cavity causes problems with the porosity of castings. The use of reduced pressure in the mould cavity (casting in the so-called “vacuum”) makes it possible to make responsible structural castings with this technology, but requires additional equipment of the pressure casting machine in the appropriate devices and interference in the mould construction.

Recently, pressure casting machines have appeared which realise both the HPDC and HSC processes. In this case, the fact that the horizontal metal injection system exists in both technologies is used. In both technologies, the metal is poured into the chamber and the plunger pushes liquid metal into the cavity of the mould. However, there are two important differences between HPDC and HSC. First of all, the plunger velocity in the second phase of the HPDC

talu. W obu technologiach metal jest wlewany do komory prasującej a tłok przetłacza ciekły metal do wnętrza formy ciśnieniowej. Istnieją jednak dwie istotne różnice między HPDC i HSC. Przede wszystkim prędkość tłoka w drugiej fazie cyklu w HPDC jest niezwykle wysoka (ponad 10 m/s), co prowadzi do turbulencji i atomizowania przepływu. W procesie HSC metal wtryskiwany jest do formy z bardzo małą prędkością (0,5 m/s, a nawet w najnowszych maszynach – 0,05 m/s) – rysunek 6.

Różnicę w prędkości wypełniania wnętrza formy przedstawiono również na rysunku 7 (a). Druga różnica polega na wielkości szczeliny wlewowej – bardzo mała w przypadku HPDC, duża, a w zasadzie jej brak – w technologii HSC (rys. 7 b).

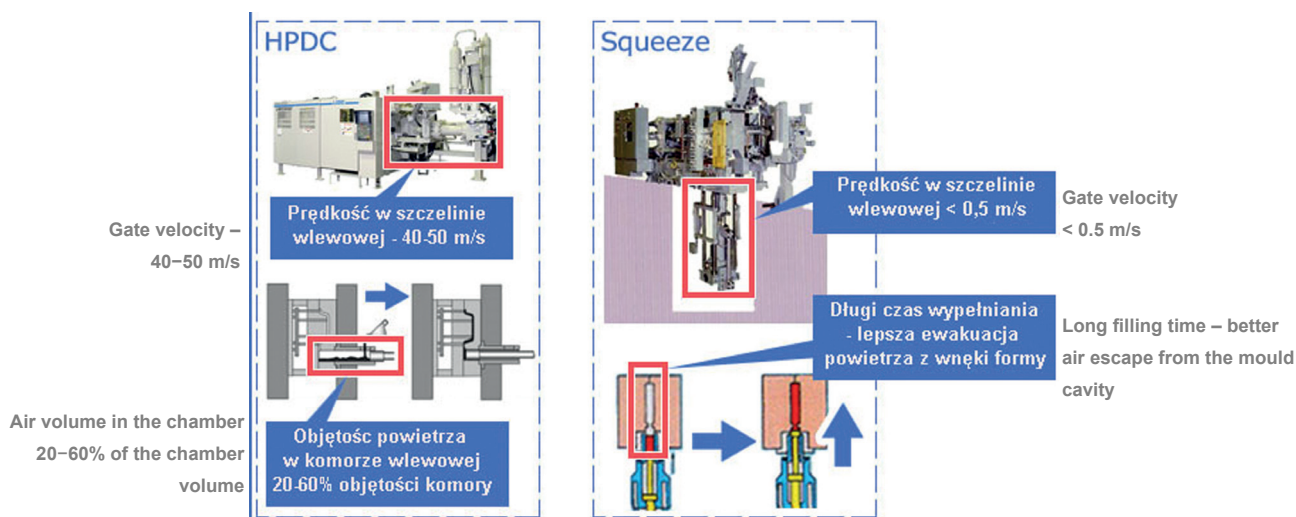
Liderem w produkcji maszyn do prasowania w stanie ciekłym jest japońska firma UBE Industries, która spopularyzowała w latach siedemdziesiątych maszyny pionowe (VSC), a w latach 80. XX wieku – maszyny poziome (HSC).

cycle is extremely high (over 10 m/s), which leads to turbulence and atomisation of the flow.

In the HSC process the metal is injected into the mould at a very low speed (0.5 m/s or even in the latest machines – 0.05 m/s) – Figure 6.

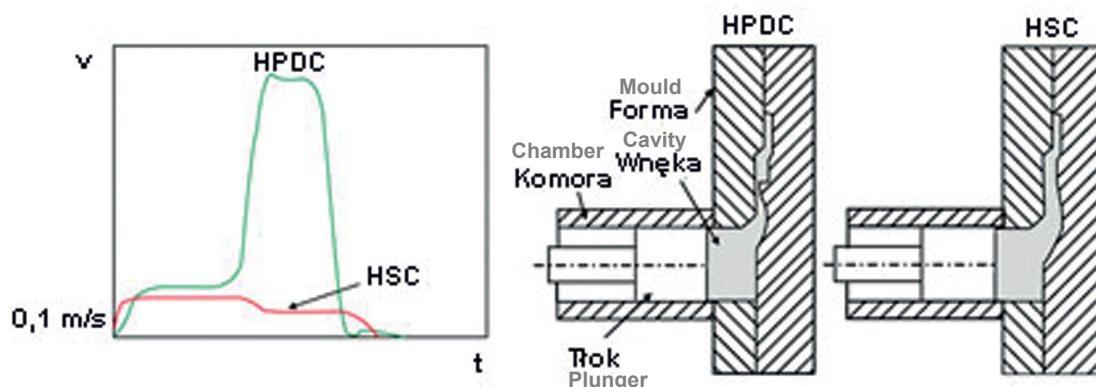
The difference in the speed of filling the mould cavity is also shown in Figure 7 (a). The second difference is in the size of the gate – very small for HPDC, large, or in fact lack of it – in the HSC technology (Fig. 7 b).

The Japanese company UBE Industries is the leader in the production of squeeze casting machines. The company popularised vertical machines (VSC) in the 1970s and horizontal machines (HSC) in the 1980s.



Rys. 6. Porównanie prędkości wypełniania wnętrza formy w technologii HPDC i HSC [17]

Fig. 6. The comparison of the filling speed of the mould cavity in the HPDC and HSC technology [17]

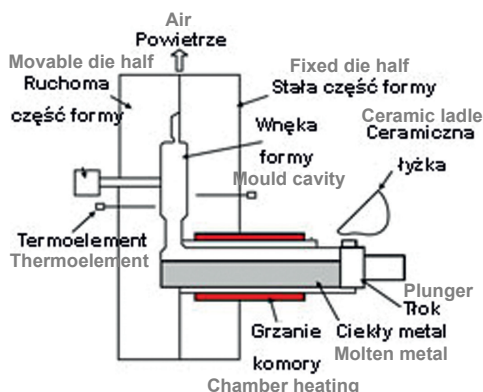


Rys. 7. Różnica w prędkości wypełniania wnętrza formy (a) oraz różnica w wielkości szczeliny wlewowej w obu technologiach (b) [18]

Fig. 7. The difference in the speed of filling the mould cavity (a) and in the size of the gate in both technologies (b) [18]

Wolne wypełnienia wnęki formy powoduje, że w komorze wlewowej powstaje gruba, przyścienna warstwa metalu półciekłego i stałego (vide rys. 3). Dlatego też w niektórych rozwiązaniach (np. firmy TOYO – system 3S) komora wlewowa jest dodatkowo podgrzewana, aby zapewnić odpowiednią leśność metalu (rys. 8).

The slow filling of the mould cavity causes the chamber to form a thick wall layer of semi-liquid and solid metal (see Fig. 3). Therefore, in some solutions (e.g. TOYO – 3S system), the chamber is additionally heated to ensure the correct castability of the metal (Fig. 8).



Rys. 8. System grzania komory w maszynie TOYO [18]

Fig. 8. The chamber heating system in the TOYO machine [18]

W ostatnich latach nastąpił gwałtowny rozwój technologii prasowania w stanie ciekłym w Chinach. W 2015 roku amerykańska firma Shiloh Industries, Inc., podpisała umowę z chińską firmą Suzhou Sanji Foundry Equipment Co., Ltd. na uruchomienie odlewni wykorzystującej technologii SC na potrzeby amerykańskiego przemysłu motoryzacyjnego.

Shiloh Industries, Inc., z USA jest największą na świecie firmą produkującą odlewy i znaną na całym świecie z produkcji komponentów samochodowych. Suzhou Sanji jest producentem odlewów ciśnieniowych i prasowanych w stanie ciekłym. Od 2007 roku firma wykonuje odlewy metodą SC, opracowując szereg urządzeń do realizacji tego procesu w układzie zarówno pionowym jak i poziomym.

Odlewnia Suzhou Sanji produkuje około 8000 ton odlewów SC ze stopów aluminium. Jest to w chwili obecnej największa na świecie odlewnia wykonująca wyroby metodą prasowania w stanie ciekłym [19]. Odlewnia ta dysponuje również pierwszą na świecie prasą o sile zwierania 5500 kN, przeznaczoną dla stopów magnezu (rys. 9).

Odlewnia Suzhou Sanji wykonuje odlewy m.in. dla instytutu badawczego General Motor w Szanghaju. Firma ta jest również producentem hybrydowych, poziomych maszyn o sile zwierania od 1800 do 35 000 kN (rys. 10).

Firma ta produkuje również hybrydowe maszyny w układzie pionowym o siłach zwierania 1800–40 000 kN (rys. 11).

Japońska firma Toshiba opracowała typoszerzeg hybrydowych maszyn (jak np. DEC150MT), z bardzo niską prędkością wtrysku – 0,05 m/s. Maszyna ponadto

In recent years there has been a rapid development of squeeze casting technology in China. In 2015, Shiloh Industries, Inc., an American company, signed an agreement with a Chinese company Suzhou Sanji Foundry Equipment Co., Ltd. to launch a foundry using SC technology for the US automotive industry.

Shiloh Industries, Inc., USA is the world's largest casting company and known worldwide for its production of automotive components. Suzhou Sanji is a manufacturer of high pressure and squeeze castings. Since 2007, the company has been making castings using the SC method, developing a variety of equipment for this process in both vertical and horizontal configurations.

The Suzhou Sanji Foundry produces approximately 8,000 tonnes of SC castings from aluminium alloys. It is currently the largest squeeze casting foundry in the world [19]. The foundry also has the world's first press with a closing force of 5,500 kN for magnesium alloys (Fig. 9).

Suzhou Sanji Foundry manufactures castings for, among others, the General Motor research institute in Shanghai. The company is also a manufacturer of hybrid horizontal machines with closing forces from 1,800 to 35,000 kN (Fig. 10).

This company also manufactures hybrid vertical machines with closing forces of 1,800–40,000 kN (Fig. 11).

The Japanese company Toshiba has developed a series of hybrid machines (such as the DEC150MT) with a very low injection speed of 0.05 m/s. The machine also achieves the speed of a conventional pressure machine – 10 m/s.



Rys. 9. Pionowa maszyna do prasowania metalu w stanie ciekłym dla stopów magnezu (VSC) [19]

Fig. 9. A vertical squeeze casting machine for magnesium alloys (VSC) [19]



Rys. 10. Hybrydowa maszyna HSC&HPDC o sile zwierania 30 000 kN [20]

Fig. 10. A hybrid HSC&HPDC with closing force 30,000 kN [20]



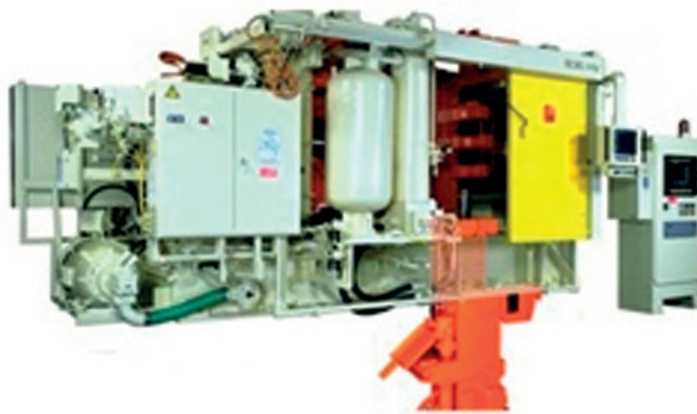
Rys. 11. Hybrydowa maszyna VSC&HPDC o sile zwierania 8000 kN [20]

Fig. 11. A hybrid VSC&HPDC machine with closing force 8,000 kN [20]

uzyskuje również prędkości konwencjonalnej maszyny ciśnieniowej – 10 m/s.

W Stanach Zjednoczonych firma BuhlerPrince produkuje maszyny hybrydowe o siłach zwierania 4000–40 000 kN (rys. 12).

In the United States, BuhlerPrince manufactures hybrid machines with closing forces of 4,000–40,000 kN (Fig. 12).



Rys. 12. Hybrydowa maszyna BuhlerPrince [21]

Fig. 12. A hybrid BuhlerPrince machine [21]

W 2012 roku w Instytucie Odlewnictwa w Krakowie uruchomiono prasę hydrauliczną do realizacji procesu prasowania w stanie ciekłym i stało-ciekłym (rys. 13).

In 2012, in the Foundry Research Institute in Kraków, a hydraulic press for the liquid and solid-liquid squeeze casting process was launched (Fig. 13).



Rys. 13. Stanowisko do prasowania w stanie ciekłym i stało-ciekłym w oparciu o prasę hydrauliczną firmy UBE o siłę zwierania 5000 kN

Fig. 13. The liquid and solid-liquid press station based on a UBE hydraulic press with a closing force of 5,000 kN

W latach 2012–2018 prowadzone były z wykorzystaniem kompleksu UBE projekty dotyczące m.in.:

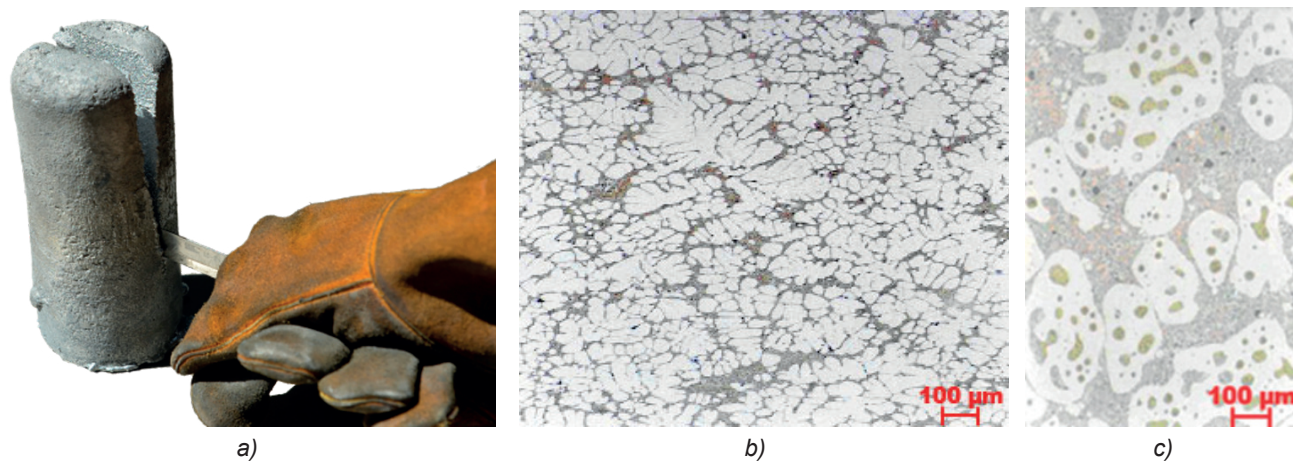
In the years 2012–2018, projects were carried out using the UBE complex, including:

1. Otrzymywania materiałów funkcjonalnych i gradientowych oraz odlewów ze stopów metali nieżelaznych zbrojonych lokalnie – projekt ZAMAT. Oprócz wartości naukowych, užitarnym osiągnięciem w badaniach było otrzymanie po raz pierwszy w Polsce tiksotropowych odlewów prasowanych

1. Obtaining functional and gradient materials and castings from locally reinforced non-ferrous metal alloys – the ZAMAT project. Apart from scientific values, a utilitarian achievement in the research was obtaining thixotropic solid-liquid squeeze castings for the first time in Poland

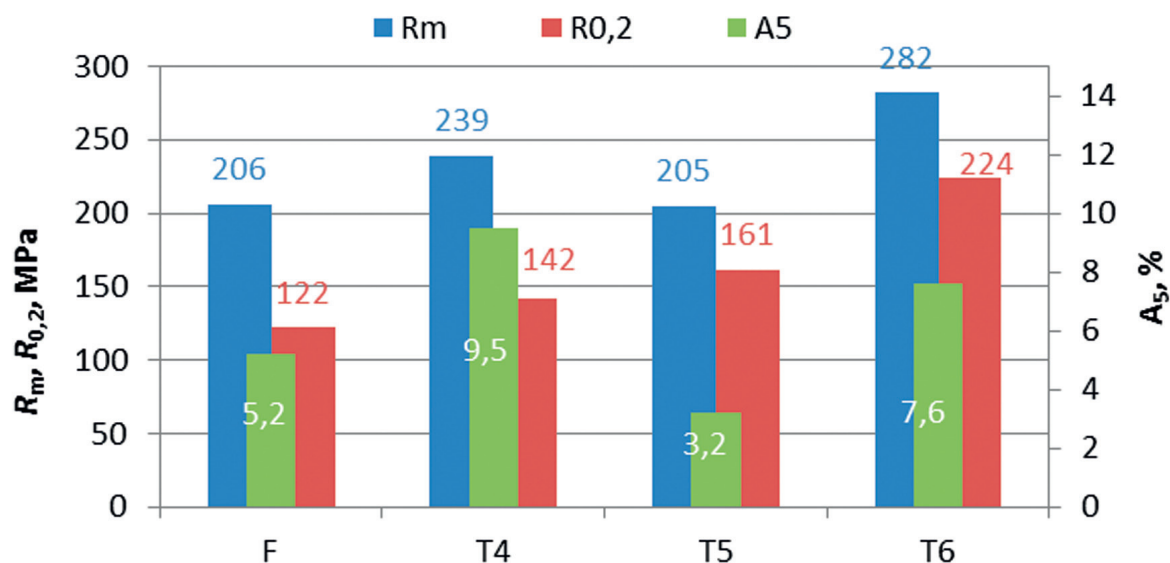
w stanie stało-ciekłym (technologia *Rheocast*) (rys. 14) oraz przeprowadzenie pełnej, zmodyfikowanej obróbki cieplnej przeznaczonej dla odlewów prasowanych w stanie ciekłym (rys. 15).

(*Rheocast* technology) (Fig. 14) and carrying out a complete, modified heat treatment for squeeze castings (Fig. 15).



Rys. 14. Wlewek ze stopu AlSi7Mg otrzymany metodą *Rheocast* (a), mikrostruktura odlewu kokilowego ze stopu AlSi7Mg (b) oraz po sprasowaniu w stanie ciekłym, sprzyjającym globularyzacji faz i wydzielań (c)

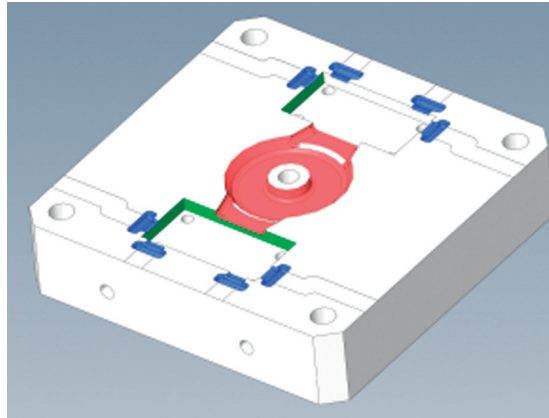
Fig. 14. An ingot from the AlSi7Mg alloy obtained by the *Rheocast* method (a), the microstructure of die casting from the AlSi7Mg alloy (b) and after squeeze casting, promoting phase and precipitation globalisation (c)



Rys. 15. Właściwości mechaniczne odlewów ze stopu AlSi7Mg prasowanych w stanie ciekłym po obróbce cieplnej (badania własne – zrealizowane w ramach projektu ZAMAT). Właściwości wytrzymałościowe wyznaczano na próbkach wycinanych z odlewu

Fig. 15. Mechanical properties of the AlSi7Mg alloy castings after heat treatment (own research – carried out within the framework of the ZAMAT project). Strength properties were determined on samples cut from a casting

2. Produkcji dodatkowego opancerzenia kołowych transporterów opancerzonych i platform gąsienicowych w ramach projektów realizowanych na rzecz bezpieczeństwa i obronności państwa (rys. 16–17).
2. The manufacture of additional armour for wheeled armoured transporters and caterpillar platforms within the framework of projects implemented for the benefit of national security and defence (Figs. 16–17).



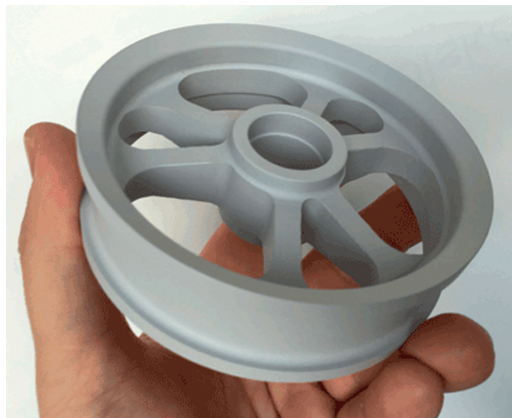
Rys. 16. Koncepcja konstrukcji formy do prasowania w stanie ciekłym
Fig. 16. The design concept for a squeeze casting mould



Rys. 17. Wnęka formy z preformami do nasączania ciekłym metalem, służąca do wytwarzania płytek pancernych o osnowie metali lekkich

Fig. 17. The mould cavity with preforms for soaking in molten metal for the production of light metal matrix armoured plates

3. Wykorzystanie innowacyjnych rozwiązań technologiczno-materiałowych w budowie pojazdów inwalidzkich (rys. 18). Kompleks UBE wykorzystany był do wykonywania odlewanych kół do wózków inwalidzkich ze stopu magnezu.
3. The use of innovative technological and material solutions in the construction of wheelchairs (Fig. 18). The UBE complex was used to make cast magnesium alloy wheels for wheelchairs.



Rys. 18. Prototypowe koło ze stopu magnezu do wózków inwalidzkich
Fig. 18. A prototype magnesium alloy wheel for wheelchairs

Ponadto prowadzona była prototypowa produkcja elementów silnika dla czołowego, niemieckiego producenta aut osobowych.

2. Podsumowanie

Rosnące wymagania producentów pojazdów zarówno osobowych, jak i ciężarowych w zakresie wysokiej wytrzymałości, ale przede wszystkim lekkości konstrukcji powodują, że dotychczasowe, tradycyjne metody wytwarzania technikami ciekło-fazowymi w najbliższym czasie mogą okazać się niewystarczające dla spełniania tych wymagań. Jak powszechnie wiadomo, konwencjonalne odlewy ciśnieniowe charakteryzują się nieakceptowalną dla przemysłu motoryzacyjnego porowatością gazową, przy czym zastosowanie systemów próżniowych w znaczący sposób ogranicza, ale nie w pełni eliminuje ją całkowicie. Niewątpliwą zaletą odlewania ciśnieniowego jest stosunkowo niska cena odlewów, możliwość uzyskania cienkościennych (poniżej 1 mm grubości ścianki) odlewów oraz szybkość produkcji. Prasowanie w stanie ciekłym umożliwia wykonanie odlewów o zminimalizowanej, blisko zerowej porowatości, ale stosunkowo grubościennych, o znacznie mniejszej szybkości produkcji i wysokim kompleksie właściwości użytkowych, zwłaszcza po obróbce cieplnej.

Połączenie obu tych technologii przy obecnym stanie techniki stało się możliwe i może być realizowane na jednej maszynie. Analizując trendy rozwojowe na najbliższe lata, wydaje się, że takie hybrydowe maszyny będą coraz częściej wykorzystywane w odlewnictwie wykorzystującym ciśnienie zewnętrzne jako czynnik termodynamiczny, odgrywający istotną rolę w trakcie krystalizacji i krzepnięcia ciekłego metalu.

Podziękowania

W pracy wykorzystano wyniki otrzymane w ramach projektu „Zaawansowane materiały i technologie ich wytwarzania” 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”, a także w ramach projektów „Dodatkowe modułowe opancerzenie kołowych transporterów opancerzonych i platform gąsiennicowych” nr DOBR-BIO4/024/13237/2013 oraz „Wykorzystanie innowacyjnych rozwiązań technologiczno-materiałowych w budowie pojazdów inwalidzkich” nr UOD-DEM-1-255/001.

Praca była częściowo wykonana w ramach projektu № BG05M2OP001-1.001-0008-C01 „Science and Education for Smart Growth 2014–2020”, sponsorowanego przez European Regional Development Fund.

In addition, prototype production of engine components for a leading German passenger car manufacturer was carried out.

2. Summary

Increasing requirements of manufacturers of both passenger cars and trucks in terms of high strength, but above all lightweight construction mean that the existing, traditional methods of manufacturing with liquid-phase techniques in the near future may prove to be insufficient to meet these requirements. As is widely known, conventional high pressure die castings are characterised by gas porosity unacceptable for the automotive industry, while the use of vacuum systems significantly reduces, but does not fully eliminate, gas porosity. An unquestionable advantage of high pressure die casting is the relatively low price of castings, the possibility of obtaining thin-walled (below 1 mm wall thickness) castings and the speed of production. Squeeze casting makes it possible to produce castings with minimised, close to zero porosity, but relatively thick-walled, with much lower production speed and a high complex of performance characteristics, especially after heat treatment.

The combination of these two technologies with the current state of the art has become possible and can be implemented with a single machine. Analysing the development trends in the coming years, it seems that such hybrid machines will be increasingly used in foundry applications using external pressure as a thermodynamic factor, playing an important role in the crystallisation and solidification of liquid metal.

Acknowledgements

The paper uses results obtained on the project “Advanced materials and technologies of their production” No. POIG.01.01.02-00-015/09-00 “The development of squeeze casting and tixocasting technologies for obtaining functional and gradient materials and castings of non-ferrous metals alloys reinforced locally”, as well as within the projects “Additional modular armouring of wheeled armoured transporters and caterpillar platforms” No. DOBR-BIO4/024/13237/2013 and “The use of innovative technological and material solutions in the construction of wheelchairs” No. UOD-DEM-1-255/001.

The work was partly performed within the framework of the project No. BG05M2OP001-1.001-0008-C01 “Science and Education for Smart Growth 2014–2020”, sponsored by the European Regional Development Fund.

Autorzy dziękują mgr. inż. Piotrowi Długoszowi oraz mgr. inż. Pawłowi Darłakowi za udostępnienie materiałów z badań wykorzystanych w danej pracy.

Authors thank Piotr Długosz, MSc. Eng. and Paweł Darlak, MSc. Eng. for sharing the results of investigations used in this publication.

Literatura/References

1. Sobczak J.J. 2016. *O roli odlewnictwa metali w rozwoju cywilizacji*. Kraków: Instytut Odlewnictwa. ISBN 978-83-941558-7-2.
2. <http://www.galleyrack.com/images/artifice/letters/press/noncomptype/casters/pivotal/literature/us-0000632-1838-03-17-machine-for-casting-printing-types.pdf> [dostęp: 21.06.2018].
3. <https://circuitousroot.com/artifice/letters/press/noncomptype/casters/white-wing/gb-patent-1806-2979/index.html> [dostęp: 21.06.2018].
4. *A List of Patents Granted by the United States, for the Encouragement of Arts and Sciences, Alphabetically Arranged from 1790 to 1820*, <https://books.google.pl/>.
5. <http://www.galleyrack.com/images/artifice/letters/press/noncomptype/casters/pivotal/literature/us-0006243-1849-03-27-sturgis-choker-valve.pdf> [dostęp: 22.08.2018].
6. <http://souspression.canalblog.com/archives/2008/05/23/8770162.html> [dostęp: 22.06.2018].
7. <http://baltimoreauthors.ubalt.edu/writers/ottomergenthaler.htm> [dostęp: 22.06.2018].
8. Dudek P. 2017. „Zastosowanie technologii prasowania w stanie ciekłym do otrzymywania odlewów ze stopów aluminium / Application of squeeze casting technology to obtain aluminum alloy castings”. *Prace Instytutu Odlewnictwa / Transactions of the Foundry Research Institute* 57 (3) : 211–224.
9. Sobczak J.J. 2016. *Teoria, praktyka, stan aktualny i perspektywy rozwoju odlewania pod ciśnieniem – wybrane zagadnienia*. Kraków: Instytut Odlewnictwa.
10. Li Y., W. Zhang, H. Zhao, D. You, D. Zhang, M. Shao, W. Zhang. 2014. „Research progress on squeeze casting in China”. *China Foundry* 11 (4) : 239–246.
11. <https://www.ubemachinery.co.jp/english/product/diecast/diecast-squeeze.pdf> [dostęp: 21.06.2018].
12. Wiesner S. 2004. „Les techniques avancees dans le domaine de la fonderie sous pression: le Squeeze Casting et le processus structural”. *Hommes&Fonderie* 349 (Novembre 2004) : 10–19.
13. Vinarcik E.J. 2003. *High integrity die casting processes*. John Wiley & Sons, Inc.
14. Iyer A. 2011. *Squeeze Casting: The Future*. Carlton, Australia : ISS Institute. <http://issinstitute.org.au/wp-content/media/2011/05/ISS-FEL-REPORT-A-IYER-low-res.pdf>.
15. *Indirect Squeeze Casting: The Hot Shot Process*. NADCA. 1995.
16. <https://www.buhlergroup.com/global/en/products/cold-chamber-buehlerprince-hv-vv.htm> [dostęp: 21.06.2018].
17. <http://www.reterra.co.jp/eng/squeeze.html> [dostęp: 21.06.2018].
18. Li P., X. Huang, L. He, X. Liu, B. Wang. 2014. „Mechanism and application of a newly developed pressure casting process: Horizontal squeeze casting”. *China Foundry* 11 (4) : 232–238.
19. <https://www.greencarcongress.com/2014/04/20140404-vsc.html> [dostęp 22.03.2019].

20. <http://www.shsanji.com> [dostęp 22.03.2019].
21. <https://www.buhlergroup.com/global/en/products/cold-chamber-buehlerprince-hv-vv.htm> [dostęp 22.03.2019].