

ZAAWANSOWANE MATERIAŁY I TECHNOLOGIE ICH WYTWARZANIA

Projekt POIG.01.01.02-00-015/09

● Zn

● Mg

Kierownik projektu:
prof. dr inż. Zbigniew Śmieszek

● Au



● Mn

● Pt

Instytut Metali Nieżelaznych
Gliwice, 2014



INNOWACYJNA
GOSPODARKA
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO



Z A A W A N S O W A N E MATERIAŁY I TECHNOLOGIE ICH WYTWARZANIA

Projekt POIG.01.01.02-00-015/09

Projekt zrealizowano w latach 2010–2014

Kierownik projektu:

prof. dr inż. Zbigniew Śmieszek

Instytut Metali Nieżelaznych

Gliwice, 2014

„Fundusze Europejskie – dla rozwoju innowacyjnej gospodarki”

Zaawansowane materiały i technologie ich wytwarzania
Projekt POIG.01.01.02-00-015/09

Projekt zrealizowano w latach 2010–2014

„Projekt współfinansowany przez Unię Europejską
z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego”

Redaktor naukowy:

dr inż. Mieczysław Woch, prof. IMN

Recenzenci:

Prof. Elżbieta Kalinowska-Ozgowicz, Politechnika Śląska, Gliwice
Prof. Waław Muzykiewicz, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków
Prof. Joanna Karwan-Baczewska, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków
Prof. Wojciech Ozgowicz, Politechnika Śląska, Gliwice
Prof. Grzegorz Milczarek, Politechnika Poznańska
Prof. Jacek Baranowski, Uniwersytet Warszawski
Prof. Roman Kuziak, Instytut Metalurgii Żelaza, Gliwice
Prof. Leszek Blacha, Politechnika Śląska, Gliwice
Prof. Paweł Zięba, Instytut Metalurgii i Inżynierii Materiałowej PAN, Kraków
Dr inż. Joanna Wojewoda-Budka, Instytut Metalurgii i Inżynierii Materiałowej PAN, Kraków
Dr inż. Anna Korniewa-Surmacz, Instytut Metalurgii i Inżynierii Materiałowej PAN, Kraków

ISBN 978-83-938792-1-2

Skład i druk:

PiS Agencja Wydawniczo-Poligraficzna
Barbara Piątek, Janusz Sieczka
26-110 Skarżysko Kamienna, ul. Paryska 73
tel. 41 252 84 40, e-mail: pisawp@pisawp.com.pl

Wydawca:

Instytut Metali Nieżelaznych
ul. Sowińskiego 5, 44-100 Gliwice, tel. 32 23 80 200
e-mail: imn@imn.gliwice.pl, www.imn.gliwice.pl

„Egzemplarz bezpłatny”

WPROWADZENIE	9
NANOMATERIAŁY NANOMATERIALS	
<i>Określenie warunków otrzymywania nanocząstek metali szlachetnych (Au, Pt i Pd) w układach mikroreaktorów</i> <i>The determination of reaction conditions for noble metal nanoparticles synthesis (Au, Pt and Pd) in microreactor systems</i>	
K. Paclawski, M. Luty-Blocho, B. Streszewski, M. Wojnicki, W. Jaworski, K. Fitzner	13
<i>Charakterystyka własności fizycznych, technologicznych oraz użytkowych proszków i warstw nanokrystalicznych odpornych na ścieranie i erozję</i> <i>Characterization of physical, technological and practical properties of powders and nanostructured coatings resistant to wear and erosion</i>	
G. Moskal, M. Jabłońska, T. Rzychoń, K. Szymański, M. Hetmańczyk, A. Grabowski, H. Myalska, B. Witala, Sz. Polis, S. Jucha, D. Niemiec	27
<i>Otrzymywanie metodą konsolidacji proszków materiałów o stabilnej strukturze nanometrycznej</i> <i>Producing materials with stable nanometric structures using the powder consolidation method</i>	
W. Kaszuwara, M. Kulczyk, T. Giżyński, B. Michalski	47
<i>Wytwarzanie drutów rdzeniowych z nanoproszków stopowych do zastosowań w katalizie</i> <i>Preparation of the core-shell wires for catalysis application, using nanopowder metallurgy</i>	
J. Pura, J. Zdunek, P. Kwaśniak, H. Garbacz, J. Mizera, Z. Laskowski, M. Gierej	55
<i>Styki z proszku AgSnBi wytwarzane metodami dużych odkształceń plastycznych</i> <i>Electrical contacts from AgSnBi produced by severe plastic methods</i>	
M. W. Richert, J. Richert, B. Leszczyńska-Madej, Ł. Kuczek	65
<i>Wpływ manganu na efekt magnetokaloryczny w związkach międzymetalicznych $LaFe_{11.8-x}Mn_xSi_{1.2}$</i> <i>Impact of manganese on magnetocaloric effect of $LaFe_{11.8-x}Mn_xSi_{1.2}$ intermetallic compounds</i>	
P. Włodarczyk, Ł. Hawelek, M. Polak, P. Zackiewicz, A. Chrobak, M. Kamińska, A. Kolano-Burian	75
MATERIAŁY DLA FOTONIKI I ŹRÓDEŁ ENERGII MATERIALS FOR PHOTONICS AND ENERGY STORAGE	
<i>Grafen – własności, technologia, charakteryzacja</i> <i>Graphene – features, technology, characterization</i>	
W. Strupiński	85
<i>Opracowanie technologii otrzymywania materiałów na źródła światła białego</i> <i>Development of the manufacturing technology of materials for white light sources</i>	
M. Rudziński, M. Wesółowski, W. Strupiński	105
<i>Wielozłączowe ogniwa fotowoltaiczne</i> <i>Multijunction solar cells</i>	
E. Dumiszewska, P. Knypys, M. Wesółowski, W. Strupiński, M. Teodorczyk	123
<i>Lekkie stopy na bazie litu jako materiały do bezpiecznego magazynowania wodoru</i> <i>Light alloys on the base of lithium for hydrogen safety storage</i>	
W. Gąsior, A. Dębski	137
<i>Synteza i właściwości kompozytów typu stop metali/nanomateriał węglowy do akumulatorów niklowo-wodorkowych</i> <i>Synthesis and properties of composites metal alloy/carbon nanomaterial for nickel metal-hydride batteries</i>	
A. Sierczyńska, G. Lota, K. Lota, P. Swoboda, I. Acznik, M. Kopezyk	151

<i>Kompozytowe materiały elektrodowe do asymetrycznych kondensatorów elektrochemicznych</i> <i>Composite electrode materials for asymmetric electrochemical capacitors</i>	
K. Lota, G. Lota, A. Sierczyńska, I. Acznik	161
<i>Modyfikacja plazmowa kompozytowych membran polimerowo-ceramicznych do elektrolitów żelowych</i> <i>Plasma modification of composite polymer-ceramic membranes for gel electrolytes</i>	
M. Pokora, M. Walkowiak, J. Kunicki, P. Półrolniczak, A. Martyła, L. Horla	173
<i>Kompozytowe membrany polimerowo-ceramiczne jako elektrolity dla ogniw litowych</i> <i>Composites polymer-ceramic membranes as electrolytes for lithium cells</i>	
P. Półrolniczak, M. Walkowiak, M. Osińska-Broniarz, M. Pokora	187
 MATERIAŁY FUNKCJONALNE O OSNOWIE METALOWEJ METAL MATRIX FUNCTIONAL MATERIALS	
<i>Rozwój technologii i aplikacje powierzchniowej wysokotemperaturowej przeróbki plastycznej</i> <i>The studies on technology and applications of the semi-friction stir processing method</i>	
T. Knych, P. Uliasz, J. Zasadziński, M. Blicharski, B. Smyrak, A. Mamala, A. Kawecki, P. Kwaśniewski, G. Kiesiewicz, M. Walkowicz, M. Jabłoński, M. Piwowarska-Uliasz, J. Wiecheć	207
<i>Nowoczesne warstwowe materiały lutownicze na bazie stopów srebra</i> <i>Modern layered brazing materials based on silver alloys</i>	
L. Ciura, W. Kazana, M. Kamińska, M. Karpiński	221
<i>Funkcjonalne materiały w postaci taśm ze stopów miedzi o ultradrobnej mikrostrukturze do zastosowań w elektrotechnice</i> <i>Functional materials as a strips of copper based alloys with ultrafine microstructure for electric applications</i>	
W. Głuchowski, J. Stobrawa, Z. Rdzawski, J. Domagała-Dubiel, J. Sobota	233
<i>Powłoki niklowe ze zdyspergowanymi cząstkami twardymi submikrometrycznymi na stopach aluminium</i> <i>Series of spectral certified reference materials for new species of ecological alloys</i>	
M. Nowak, A. Najder, M. Karaś, S. Boczek, J. Żelechowski, M. Gawlik	249
<i>Rozwój technologii squeeze casting i tixocasting dla otrzymywania materiałów funkcyjnych i gradientowych oraz odlewów ze stopów metali nieżelaznych zbrojonych lokalnie</i> <i>Development of squeeze casting and thixocasting technology for obtaining functional and gradient materials as well as locally reinforced cast parts from non-ferrous alloys</i>	
T. Reguła, J. J. Sobczak, A. Fajkiel, P. Dudek, K. Saja, P. Darlak, P. Długosz, J. Morgiel, K. Berent	263
<i>Zaawansowane materiały kompozytowe na bazie metali lekkich typu MAGFA i ALFA zbrojone popiołami lotnymi</i> <i>Advanced composite materials MAGFA and ALFA based on light metal alloys reinforced by waste materials – fly ash</i>	
P. Darlak, P. Długosz, R. Krzyżak	279
<i>Opracowanie podstaw technologicznych wytwarzania i przetwarzania nowych tworzyw funkcyjnych na bazie Al z udziałem faz międzymetalicznych</i> <i>Develop the basis technological production and processing of new functional materials based on Al involving intermetallic phases</i>	
M. Jabłońska, M. Hetmańczyk, E. Bernstock-Kopaczyńska, G. Moskal, A. Śmiglewicz	297
 NOWE MATERIAŁY ZE STOPÓW LEKKICH LIGHT METALS AND ALLOYS	
<i>Struktura i właściwości mechaniczne stopów Mg-Al-Ca-Sr</i> <i>Structure and mechanical properties of Mg-Al-Ca-Sr alloys</i>	
T. Rzychoń	313

<i>Właściwości wyciskanych profili ze stopów serii 6xxx z dodatkiem wanadu o zdolności do pochłaniania energii</i> <i>Properties of extruded profiles from 6xxx aluminium alloys with vanadium addition able to absorbing energy</i> M. Lech-Grega, W. Szymański, S. Boczek, B. Płonka, J. Zelechowski, Z. Zamkotowicz, M. Gawlik, M. Bigaj, P. Korczak	329
<i>Technologia wytwarzania wyrobów ze stopów lekkich przeznaczonych do pracy w warunkach ekstremalnych w środkach transportu lądowego, morskiego i powietrznego</i> <i>A technology for the manufacture of light alloy products to be used under the extreme conditions as parts of the land, sea and air transport means</i> M. Szymanek, B. Augustyn, D. Kapinos, W. Szymański, S. Boczek, B. Płonka	345
<i>Wpływ parametrów procesów przeróbki plastycznej na strukturę, właściwości mechaniczne i odporność korozyjną wysoko wytrzymałych stopów magnezu</i> <i>Influence of plastic deformation parameters on the structure, mechanical properties and corrosion resistant of high-strength magnesium alloys</i> B. Płonka, K. Remsak, P. Korczak, M. Lech-Grega, M. Nowak, M. Rajda	361
<i>Ultralekkie kształtowniki wyciskane z nowych stopów magnezowo-litowych</i> <i>Ultralight profiles extruded from new Mg-Li alloys</i> W. Libura, A. Rękas, M. Milczanowski, D. Leśniak	375
<i>Opracowanie podstaw technologii wytwarzania odlewanych elementów specjalnego przeznaczenia ze stopów tytanu</i> <i>Develop the basis of casting technology of titanium alloys for special components</i> J. J. Sobczak, A. Karwiński, W. Leśniewski, P. Wieliczko, M. Wawrylak, M. Małysha, A. Gil, R. Pabiś, R. Żuczek	389
ZAAWANSOWANE TECHNOLOGIE WYTWARZANIA PROSZKÓW I SPIEKÓW ADVANCED TECHNOLOGIES OF MANUFACTURING OF POWDERS AND SINTERED MATERIALS	
<i>Termiczna dekompozycja plazmowa produktów ubocznych z przemysłu miedziowego</i> <i>Thermal plasma decomposition of by-products from copper industry</i> M. Woch, M. Lis, D. Kołacz, M. Kamińska, M. Staszewski, M. Osadnik	407
<i>Zastosowanie techniki spiekania plazmowego do wytwarzania materiałów termoelektrycznych przeznaczonych na termogeneratory o budowie segmentowej</i> <i>Application of spark plasma sintering method for production of thermoelectric materials intended for segmented thermogenerators</i> A. Wrona, J. Mazur, M. Lis, K. Bilewska, M. Kamińska	419
<i>Opracowanie technologii wytwarzania spiekanych elementów ze stopowych proszków aluminium dla instalacji klimatyzacyjnej w samochodzie osobowym</i> <i>Manufacturing technology development of the sintered components made of aluminum alloy powder for the automobile air conditioning system</i> M. Laska, T. Pieczonka, A. Szewczyk-Nykiel, M. Hebda, M. Nykiel, J. Kazior	435
<i>Nowa generacja kształtowników z materiałów proszkowych i włóknowych wyciskanych przez matryce mostkowo-komorowe</i> <i>New generation of profiles made of powder and fiber compositions extruded through a porthole die</i> J. Zasadziński, A. Rękas, A. Kuta, J. Richert	449
STOPY EKOLOGICZNE I ZAMIENNIKI ECOLOGICAL ALLOYS AND SUBSTITUTIONS	
<i>Odlewane stopy i kompozyty na bazie miedzi z udziałem faz zapewniających dobre właściwości łożyskowe</i> <i>Cast lead-free copper-base alloys and composites with lubricating phases ensuring good bearing performance</i> W. Malec, B. Juszczyk, J. Kulasa, S. Malara, Ł. Wierzbicki, B. Cwolek, G. Muzia, J. Gołębiewska-Kurzawska, B. Grzegorzczak	465

<i>Kompozytowe spieki na bazie miedzi o dobrych właściwościach ślizgowych</i> <i>Sintered copper matrix composites with good sliding properties</i> B. Juszczyk, W. Malec, J. Kulasa, M. Czepelak, S. Malara, Ł. Wierzbicki, J. Gołębiowska-Kurzawska, B. Cwolek	481
<i>Opracowanie podstaw elektrolitycznego otrzymywania stopów na bazie Zn-Sn oraz Mn-Sn z domieszką molibdenu lub wolframu zastępujących kadm oraz eliminujących Cr(VI)</i> <i>The development of the basis for electrolytic obtaining of Sn-Zn and Sn-Mn alloys with additive of molybdenum and tungsten, replacement of cadmium and eliminating Cr(VI)</i> P. Ozga, H. Kazimierczak, Z. Świątek, M. Słupska, A. Dębski, E. Bielańska, R. Socha, B. Onderka, M. Michalec	497
<i>Zjawiska zachodzące podczas zwilżania aluminium i miedzi lutami na bazie eutektyki Sn-Zn z dodatkami In, Ag, Cu i Al</i> <i>Wetting related phenomena between al and cu substrates and liquid solders based on eutectic sn-zn with In, Ag, Cu and Al additives</i> J. Pstruś	511
<i>Serie spektralnych certyfikowanych materiałów odniesienia dla nowych gatunków stopów ekologicznych</i> <i>Series of spectral certified reference materials for new species of ecological alloys</i> E. Müller, B. Bolibrzuch, J. Galeczka, B. Cwolek, A. Hrynyszyn, H. Matusiak, E. Szmyd, Ł. Wierzbicki, S. Malara	525
 RECYKLING I UTYLIZACJA MATERIAŁÓW RECYCLING AND UTILISATION OF MATERIALS	
<i>Opracowanie technologii wydzielania składników użytecznych z akumulatorów Ni-MH napędów hybrydowych z przeznaczeniem do przerobu pirometalurgicznego, termicznego i hydrometalurgicznego</i> <i>Development of technology for separation of useful components from the Ni-MH batteries of the hybrid drives intended for pyrometallurgical, thermal and hydrometallurgical processing</i> D. Lewandowski, J. Kozłowski, W. Mikłasz	539
<i>Koncepcja procesu efektywnego odzysku lantanowców oraz niklu i kobaltu z frakcji elektrodowych zużytych baterii Ni-MH</i> <i>A conceptual process for effective recovery of lanthanides and nickel/cobalt from electrode fractions of spent ni-mh batteries</i> K. Becker, M. Pokora, J. Piwonońska, Z. Szolomicki, L. Gotfryd, M. Staszewski, M. Grzegorzczak, M. Osadnik, G. Pietek	553
<i>Recykling komponentów złomu nadstopów zawierających ren</i> <i>Recycling of the superalloy scrap containing rhenium</i> G. Benke, K. Leszczyńska-Sejda, A. Chmielarz	567
<i>Ekologiczne technologie formy i rdzenia dla odlewów z metali nieżelaznych wraz z ich recyklingiem i utylizacją</i> <i>Ecological moulds and core technologies for casting of non-ferrous metals with their recycling and disposal</i> I. Izdebska-Szanda, A. Baliński, M. Angrecki, A. Palma, Z. Stefański, W. Madej, M. Żmudzińska	581
<i>Recykling złomu obiegowego odlewniczych stopów magnezu poprzez zastosowanie innowacyjnej metody endomodyfikacji</i> <i>Recycling process scrap of cast magnesium alloys by an innovative method of endomodification</i> A. Fajkiel, P. Dudek, T. Reguła, E. Czekał, K. Saja, M. Lech-Grega, S. Boczał, M. Bigaj, M. Mitka, M. Gawlik	597

ROZWÓJ TECHNOLOGII SQUEEZE CASTING I TIXOCASTING DLA OTRZYMYWANIA MATERIAŁÓW FUNKCJONALNYCH I GRADIENTOWYCH ORAZ ODLEWÓW ZE STOPÓW METALI NIEŻELAZNYCH ZBROJONYCH LOKALNIE

DEVELOPMENT OF SQUEEZE CASTING AND THIXOCASTING TECHNOLOGY FOR OBTAINING FUNCTIONAL AND GRADIENT MATERIALS AS WELL AS LOCALLY REINFORCED CAST PARTS FROM NON-FERROUS ALLOYS

T. Reguła¹, J. J. Sobczak¹, A. Fajkiel¹, P. Dudek¹, K. Saja¹, P. Darłak¹, P. Długosz¹,
J. Morgiel², K. Berent²

¹Instytut Odlewnictwa, Kraków

²Instytut Metalurgii i Inżynierii Materiałowej PAN, Kraków

Streszczenie

W ramach prowadzonego zadania badawczego podjęto temat rozwoju technologii prasowania w stanie ciekłym (*squeeze casting*) – nowoczesnej metody ciekło-fazowej umożliwiającej wykorzystanie ciśnienia zewnętrznego jako czynnika kreującego wysoki poziom właściwości mechanicznych odlewów. Uruchomiono unikalny w skali środkowoeuropejskiej kompleks technologiczno-doświadczalny – w tym moduł do wytwarzania stropów metali o strukturze tixotropowej. Stosując jako materiał wejściowy stopy na osnowie aluminium wykonano szereg prób technologicznych wytwarzania różnego typu odlewów monolitycznych i kompozytowych przy zmiennych parametrach poszczególnych etapów procesu, ze szczególnym uwzględnieniem oddziaływania na ciekły lub półciekły metal, pozwalających na kreowanie pożądanej struktury na różnych poziomach strukturalnych. Przeprowadzono kompleksowe i systemowe badania materiałowe wytworzonych odlewów, określono fizyczne właściwości w tym gęstość, przewodność elektryczną i cieplną, współczynnik rozszerzalności cieplnej, a także podstawowe charakterystyki mechaniczne. Opracowano rekomendacje, dotyczące doboru parametrów technologicznych procesu prasowania w stanie ciekłym, umożliwiające szybkie wdrożenie procesu w warunkach przemysłowych.

Wyniki uzyskane w ramach realizacji zadania dają unikatową możliwość szerszego i pomyślnego zastosowania technologii prasowania w stanie ciekłym w krajowym przemyśle, a szerzej, w branży wytwarzania części maszyn praktycznie na gotowo (*near net shape*), charakteryzujących się wysokim poziomem właściwości.

Słowa kluczowe: prasowanie w stanie ciekłym, właściwości fizyczne, struktura metalu, materiały funkcjonalne i gradientowe

Abstract

The research task involved a development of squeeze casting – a modern liquid phase technology which utilizes external pressure in order to produce castings characterized by high level of mechanical properties. A unique in central Europe squeeze casting cell with thixocasting

capabilities has been installed. Using casting and wrought aluminium alloys series of mono- and heterogeneous castings were produced under various process parameters, with special consideration for their effect on the liquid or semi-solid metal. Comprehensive examinations of materials were carried out, the thermo-physical and mechanical properties were evaluated. Technological recommendations concerning the selection of squeeze casting process parameters were drawn up, which could considerably help to swiftly implement the process in the industrial conditions. The obtained results give a unique opportunity of a successful application of squeeze casting in the Polish foundry industry.

Wprowadzenie

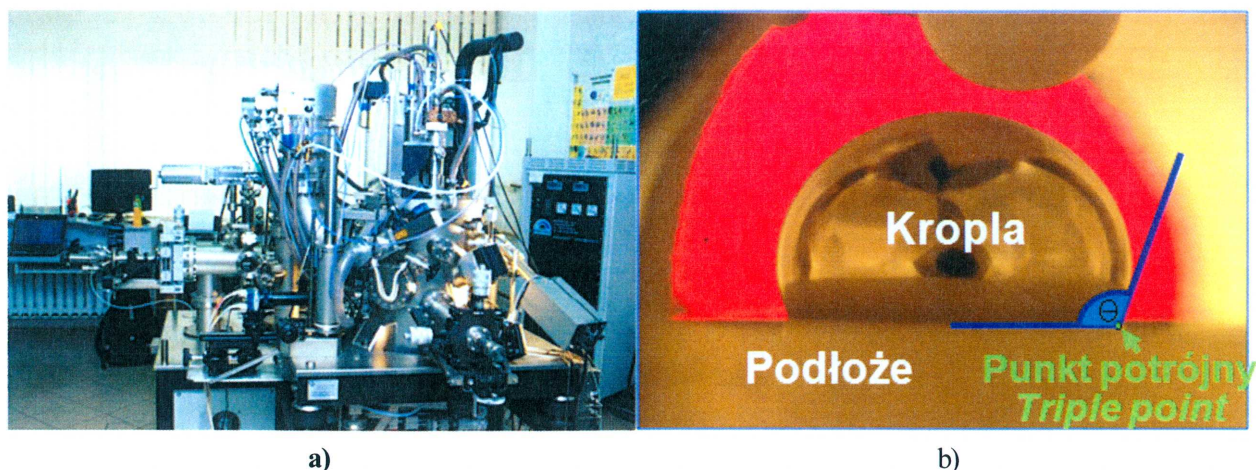
Metody odlewnicze są pod względem racjonalności ekonomicznej jednym z najefektywniejszych sposobów nadawania końcowego kształtu wyrobom metalowym. Dzięki nim można otrzymywać części o skomplikowanych kształtach i rozwiniętej powierzchni. Powszechnie uważa się, że podstawową wadą odlewów w porównaniu z elementami uzyskanymi w procesach przeróbki plastycznej są ich niższe właściwości mechaniczne. Jest to spowodowane przez odlewniczą strukturę materiału w tym dużym rozmiarze ziaren i występowaniem nieciągłości strukturalnych. Ponadto typowe wady powierzchniowe występujące w odlewach, takie jak naderwania i niespawy mogą przyczyniać się do powstawania pęknięć w strukturze odlewu podczas jego użytkowania, znacząco skracając jego trwałość [1–5]. Technologia prasowania w stanie ciekłym (*squeeze casting*) daje możliwość produkcji odlewów z dokładnym odwzorowaniem kształtu i powierzchni, praktycznie „na gotowo” (*near net shape*), z uzyskiem metalu sięgającym powyżej 95%. Elementy wytworzone daną metodą charakteryzują się silnie rozdrobnioną i zwartą strukturą, co umożliwia ich obróbkę cieplną oraz dalszą obróbkę wykańczającą, w tym spawanie. Dodatkowo jest to proces bardzo ekonomiczny, zarówno ze względu na zużycie energii, jak i materiału.

Technologia prasowania w stanie ciekłym jest szeroko stosowana do produkcji odpowiedzialnych części, głównie dla przemysłu motoryzacyjnego i zbrojeniowego. Stanowi najpopularniejszy proces technologiczny wykorzystywany do wytwarzania kompozytów metalowych (*MMC – Metal Matrix Composites*) ze względu na stosunkową łatwość prowadzenia infiltracji ciśnieniowej bez potrzeby istotnych modyfikacji [6–10]. Można w ten sposób wytwarzać kompozyty zbrojone różnorodnymi dyspersyjnymi fazami zbrojącymi, np. cząsteczkami, whiskersami oraz włóknami, a także stosować porowate preformy.

Celem realizacji danego zadania badawczego było opanowanie technologii prasowania w stanie ciekłym w odmianie pośredniej, umożliwiając tym samym skuteczne zastosowanie procesu *squeeze casting* do wytwarzania wysoko wytrzymałych części, w tym także kompozytowych. W tym celu przeprowadzono szereg prób technologicznych wytwarzania różnego typu odlewów monolitycznych i kompozytowych na bazie stopów aluminium przy zmiennych parametrach poszczególnych etapów procesu prasowania w stanie ciekłym.

Charakterystyka materiałów i metodyka badań

Badania nad doбором materiałów ceramicznych na zbrojenie kompozytów na podstawie wybranych stopów aluminium wykonywano przy użyciu kompleksu aparaturowego do badań wysokotemperaturowych, przedstawionego na rys. 1a. Aparatura ta umożliwia ocenę zwilżalności danego podłoża – w tym przypadku ceramiki – przez ciekły metal poprzez pomiar kąta zwilżania θ (rys. 1b). Można również przeprowadzić ocenę reaktywności metalu z podłożem poprzez analizę strukturalną produktów reakcji powstałych na powierzchni międzyfazowej.

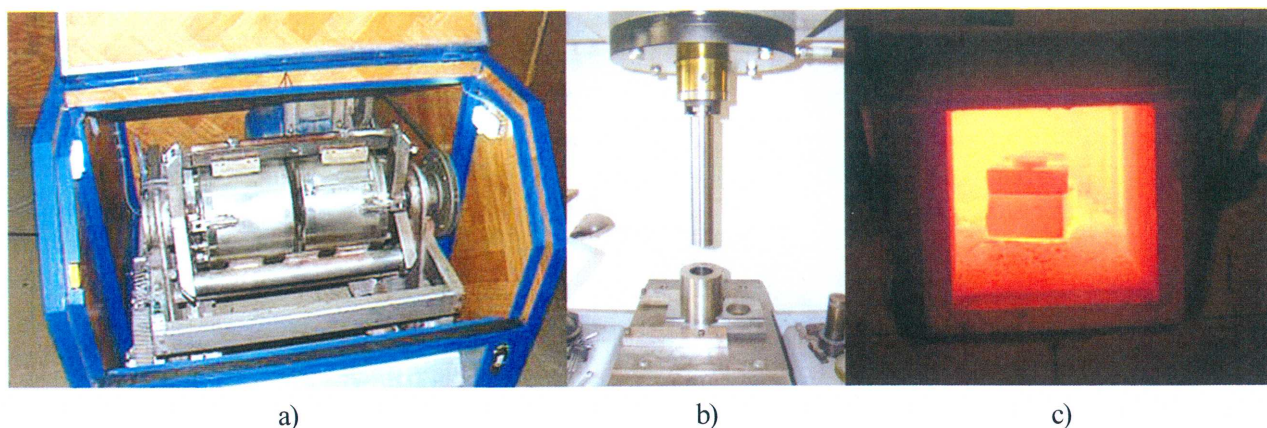


Rys. 1. Kompleks aparaturowy do badań wysokotemperaturowych, a) widok aparatury, b) graficzna ilustracja istoty kąta zwilżania

Do uzyskania porowatych kształtek ceramicznych o wysokim udziale porowatości o charakterze otwartym, wykorzystano szereg metod wytwórczych oraz materiały ceramiczne w postaci proszków Al_2O_3 oraz SiC o różnych wielkościach ziarna oraz cięte włókna Saffil. Odpowiednio przygotowane mieszanki z udziałem czynników porotwórczych (metacelulozy, trójetanoloaminy, alkoholu poliwinylowego), lepiszcza na bazie krzemionki koloidalnej oraz środków przeciwzbrylających w różnych udziałach objętościowych mieszano przy użyciu młyna kulowego (rys. 2a). Do wytwarzania kształtek o zmiennym udziale porowatości na przekroju zastosowano cztery mieszanki cząsteczek Al_2O_3 z metylocelulozą (tab. 1), które wlewano do formy warstwami. Mieszanki podsuszano, a następnie wprowadzano do formy zamontowanej na prasie hydraulicznej (rys. 2b) po czym przy pomocy stempla nadawano im końcowy kształt – prasowano pod różnym ciśnieniem (30, 50 i 100 MPa). Zastosowano cylindryczne formy o średnicy 48 mm i 20 mm. Kształtki poddawano operacji spiekania (rys. 2c), stosując zróżnicowane parametry temperaturowo-czasowe.

Tabela 1. Parametry temperaturowo-czasowe wytwarzania wybranych kształtek

Nr	Materiał wejściowy	Czynniki porotwórczy	Zawartość, % wag.	Ciśnienie prasowania, MPa	Temperatura spiekania, °C	Porowatość całkowita, %	Porowatość otwarta, %
3.1	Al_2O_3 (0,1 +35 μ)	metyloceluloza	10	30	1100	26,2	24,3
3.2		metyloceluloza	30	30	1100	63,5	62,5
3.3		metyloceluloza	40	30	1100	76,1	75,8
4.1		trójetanoloamina	5	30	1200	23,7	20,9
4.2		trójetanoloamina	10	30	1200	29,5	25,2
6	Saffil®			30	1100	69,3	69,1
7	Al_2O_3 gradient	metyloceluloza	5,10,30,40	30	1100	49,6	45,1



Rys. 2. a) Wysokoenergetyczny młyn kulowy b) prasa wraz z formą, c) piec do wypalania kształtek

Prace związane z kompleksowymi badaniami nad zagadnieniami procesu prasowania w stanie ciekłym oraz infiltracji ciśnieniowej prowadzono na unikalnym w stali środkowoeuropejskiej kompleksie do prasowania w stanie ciekłym (rys. 3), składającym się z maszyny UBE VSC 500 posiadającej pionowy układ wlewowy oraz modułu do wytwarzania wlewków o strukturze tiksotropowej – tzw. *slurrymaker*. Stosowane w technologii *squeeze casting* wartości ciśnienia prasowania wpływają m.in. na rozdrobnienie struktury oraz poprawę zwartości strukturalnej wytwarzanych części. Cykl wykonania odlewu składa się z czterech operacji, przedstawionych schematycznie na rysunku 3a. Ciekły metal z pieca topialno-podgrzewczego automatycznie – przy pomocy robota – lub ręcznie, wlewany jest do komory wlewowej, która następnie przechylana jest do pozycji pionowej. Po wykonaniu operacji połączenia komory z układem wlewowym formy przy pomocy ruchu tłoka, następuje wypełnienie wnęki przez ciekły metal. Metal powinien wypełniać wnękę formy w sposób laminarny, bez turbulencji, czyli z niską prędkością, dzięki czemu nie występuje zjawisko okluzji gazów w strukturze odlewów, co w połączeniu z wysokim ciśnieniem, pod którym metal krzepnie, generuje – w odniesieniu do innych metod ciekło-fazowych – korzystne zmiany strukturalne.

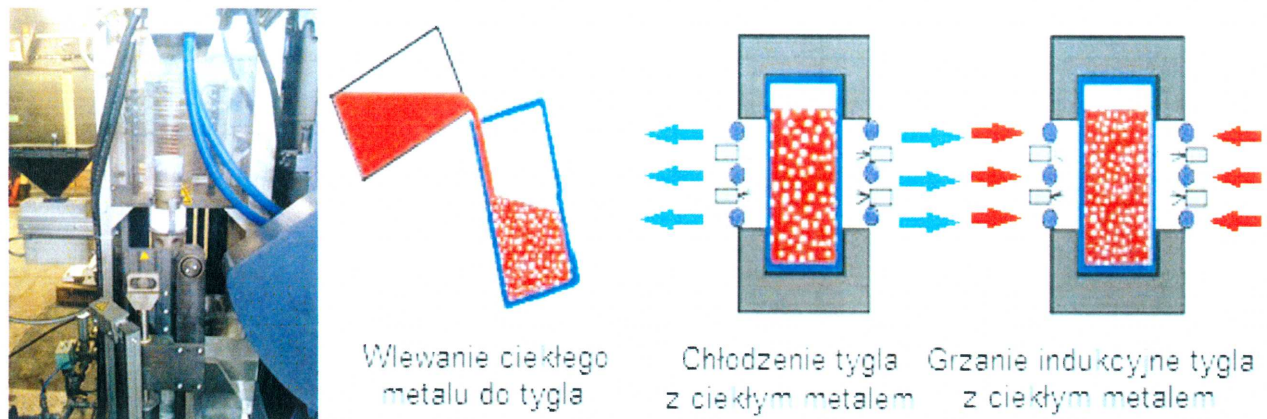
Specyfika i parametry techniczne kompleksu UBE VSC 500 są następujące:

- pionowy układ zwierania (poziomy podział formy),
- maksymalna siła zwierania 500 T,
- ciśnienie prasowania dostępne na całej drodze tłoka,
- maksymalna siła tłoka prasującego: 78 T,
- zakres masy wytwarzanego odlewu (na bazie stopu Al): 1,0 – 8,8 kg.



Rys. 3. Kompleks UBE: a) schemat układu wlewowego, b) widok ogólny kompleksu

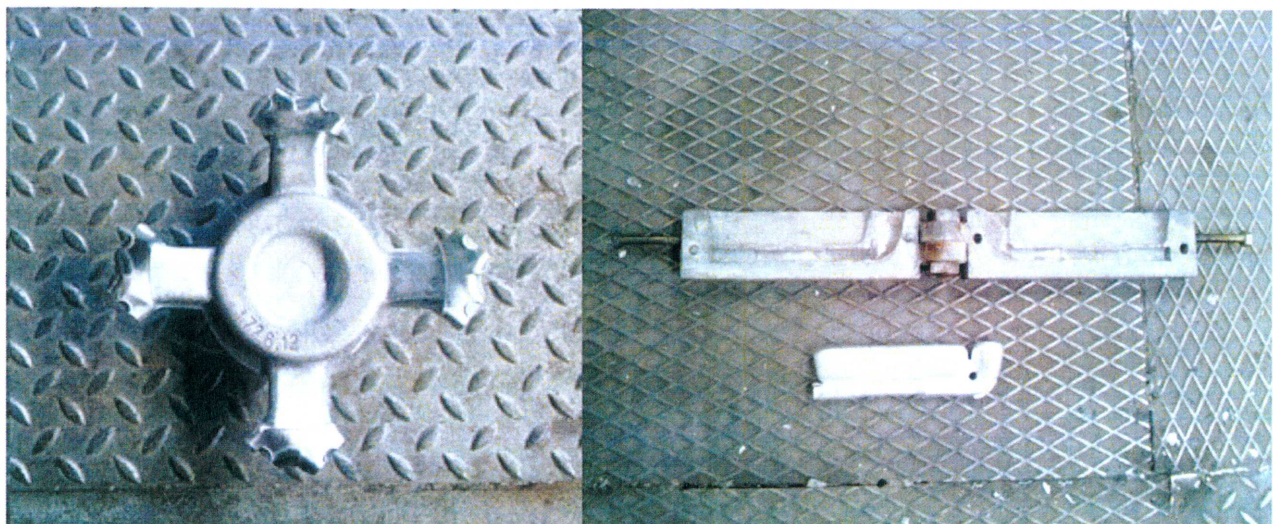
Stopy metali w stanie stało-ciekłym o strukturze globularnej (tiksotropowej) wytwarzane były na unikalnym urządzeniu *slurry maker* (rys. 4a).



Rys. 4. Moduł *slurry maker*,
a) widok ogólny, b) zasada wytwarzania wlewków o strukturze tiksotropowej

Proces przygotowania materiału o strukturze tiksotropowej polega na wykorzystaniu kontrolowanego odbioru ciepła oraz mieszania indukcyjnego, co przy odpowiednim doborze parametrów procesu zapobiega rozrostowi roztworu stałego do postaci dendrytycznej. Proces prowadzono aż do momentu, gdy stop zawiera około 50% udziału fazy stałej. Materiał o globularnych wydzieleniach roztworu stałego α charakteryzuje się znacznym spadkiem jego lepkości. Umożliwia to prawidłowe przeprowadzenie procesu odlewania – „prześciśnięcie” stało-ciekłej zawiesiny przez układ wlewkowy formy.

Materiał do badań stanowiły odlewy grawitacyjne oraz prasowane w stanie ciekłym (rys. 5), ze stopów odlewniczych oraz stopów do przeróbki plastycznej o składach chemicznych, które podano w tabeli 2.



Rys. 5. Wytwarzane odlewy: a) prasowany w stanie ciekłym, b) grawitacyjny

Tabela 2. Składy chemiczne badanych stopów

Stop			Skład chemiczny, % wag.								
Cecha	Norma	Znak	Si	Mg	Fe	Cu	Zn	Mn	Cr	Ti	Al
7075	EN AW-7075	AlZn6Mg2Cu	0,36	2,70	0,31	1,75	6,05	0,25	0,25	0,10	Reszta
6061	EN AW-6061	AlMg1SiCu	0,51	1,09	0,27	0,35	0,19	0,09	0,20	0,01	Reszta
2024	EN AW-2024	AlCu4Mg1	0,03	1,39	0,35	4,22	0,14	0,61	0,02	0,05	Reszta
AK7	AC-42000	AlSi7Mg	6,60	0,45	0,41	0,11	0,05	0,33	-	0,02	Reszta

Metal topiono w oporowym piecu wglębnym STOTEK ALUSMELT 500 z tygłem wykonanym z SiC, uprzednio pokrytym zawiesiną azotku boru (BN). Po stopieniu ciekły metal poddawano zabiegowi odgazowania poprzez przedmuchiwanie Ar przez 5 minut, następnie 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°C +/-5, natomiast formę do prasowania w stanie ciekłym w przedziale od 200 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. Ciśnienie zewnętrzne wywierano przy pomocy tłoka prasującego. Czas przyłożenia ciśnienia wynosił 25 s. Odlewy przygotowano przy zmiennym ciśnieniu, odpowiednio: 0,1 (odlewanie grawitacyjne do kokili), 75 i 150 MPa (prasowanie w stanie ciekłym).

Badania właściwości fizycznych

Badania różnicowej kalorymetrii skaningowej (*Differential Scanning Calorimetry*) oraz ciepła właściwego wykonano za pomocą wysokotemperaturowego różnicowego kalorymetru 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. Ciepło właściwe wyznaczono metodą porównawczą (według normy ASTM E 1269), wykorzystując trzy pomiary krzywych DSC: pusty tygiel, tygiel + standard, tygiel + badana próbka. Badania przeprowadzono z szybkością nagrzewania 20 K/min w tyglu platynowym z wyłożeniem Al₂O₃, jako wzorzec zastosowano szafir. Wykonano obliczenia wartości ciepła właściwego badanych materiałów, wykorzystując specjalistyczne oprogramowanie kalorymetru skaningowego NetzschDSC404C.

Badania dylatometryczne przeprowadzono w dylatometrze Netzsch DIL 402C/4/G, przeznaczonym do pomiarów rozszerzalności cieplnej metali i stopów, materiałów ceramicznych. Badania dylatometryczne przeprowadzono w atmosferze ochronnej argonu z szybkością nagrzewania 5 K/min w zakresie od temperatury otoczenia do 550°C.

Gęstość materiału w temperaturze otoczenia 20°C wyznaczono metodą hydrostatyczną.

Badania właściwości mechanicznych

Statyczne próby rozciągania w temperaturze otoczenia przeprowadzono przy pomocy maszyny Instron 8800M, z szybkością odkształcenia 3 mm/min, zgodnie z normą PN-EN 10002-1:2004. Za materiał do badań posłużyły normatywne próbki okrągłe o średnicy 6 mm i bazie pomiarowej 30 mm pobierane z odlewów. Każdy wynik stanowił średnią z 4 pomiarów.

Badania mikrostrukturalne

Próbki o wymiarach 10x10x20mm poddano obserwacjom na mikroskopie optycznym Leica DM IRM z modułem do cyfrowej rejestracji obrazów JVC TK-C1380 oraz skaningowym mikroskopie elektronowym E-SEM XL30 firmy FEI. Następnie próbki wytrawiono i ponownie poddano obserwacjom na mikroskopie optycznym. Ilościową analizę obrazów uzyskanych mikrografii przeprowadzono z użyciem oprogramowania LeicaQWin oraz Measure IT Olympus SoftImaging Solutions. Obrazy substrukturalne uzyskano z odpowiednio pocienionego materiału poddanego badaniom poprzez analizę transmisyjnym mikroskopem elektronowym Philips CM-20.

Wyniki badań

Odlewy prasowane w stanie ciekłym

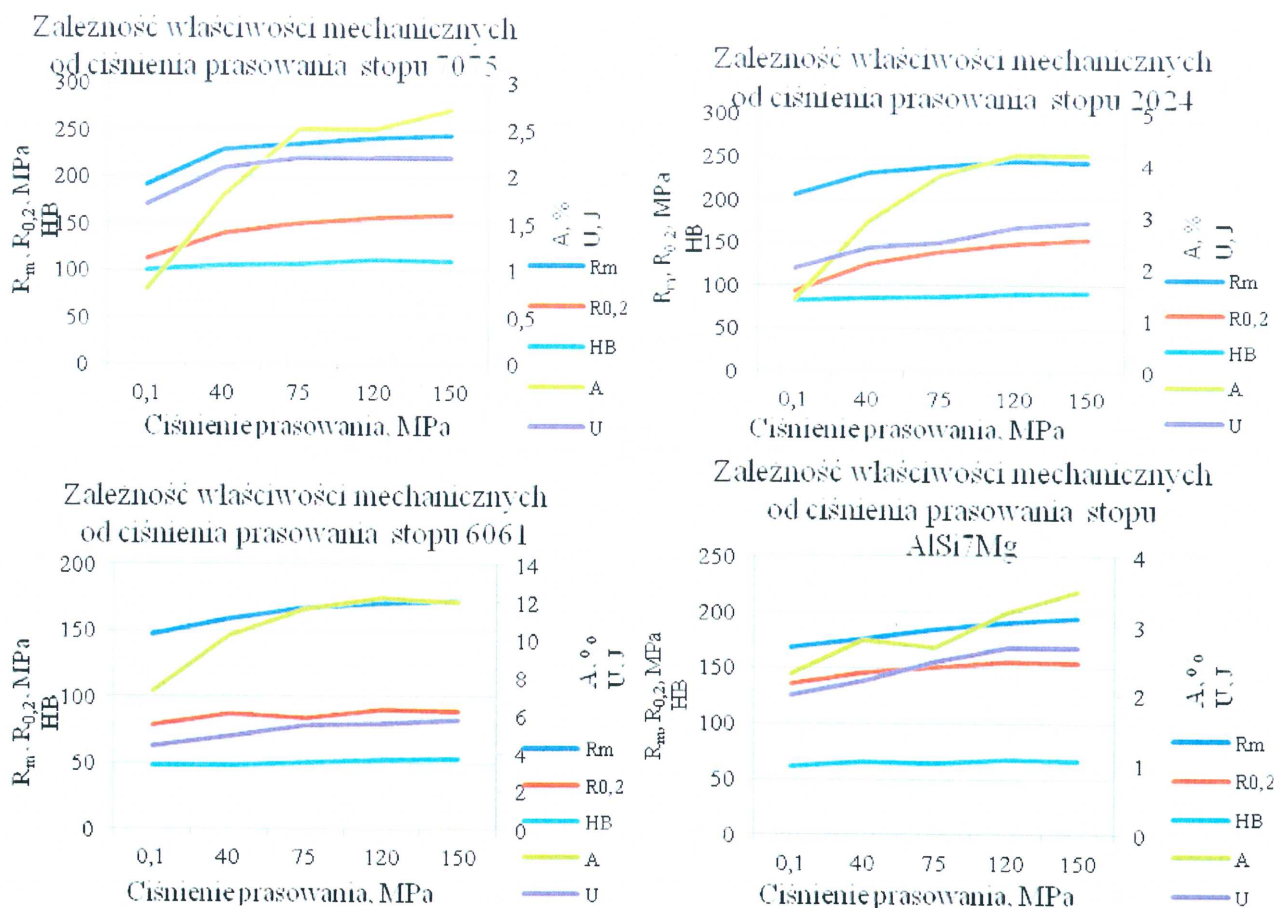
W ramach realizacji zadania badawczego wykonano szereg prób technologicznych wytwarzania różnego typu odlewów monolitycznych i kompozytowych przy zmiennych parametrach poszczególnych etapów procesu, w tym ze stanu stało-ciekłego.

Prace dotyczące procesu *squeeze casting* od strony technologicznej obejmowały pełne opanowanie kompleksu firmy UBE. Jak już wspomniano, jako materiał oprócz stopów odlewniczych wykorzystano stopy przeznaczone do przeróbki plastycznej. Stopy do przeróbki plastycznej, rzadko stosowane w odlewnictwie, wykazują bardzo korzystne właściwości mechaniczne – szczególnie po obróbce cieplnej, jednakże posiadają szereg niekorzystnych cech technologicznych, min. niską lejność oraz skłonność do pęknięcia na gorąco. Uniemożliwia wręcz to ich aplikację w klasycznych technologiach odlewniczych. W przypadku prasowania w stanie ciekłym wysokie ciśnienie oddziałujące na metal pozwala na skuteczne zastosowanie materiału nawet o bardzo niskich właściwościach technologicznych.

W procesie prasowania w stanie ciekłym wyróżnić można szereg parametrów technologicznych wpływających na jakość uzyskiwanych elementów, takich jak: ciśnienie prasowania, temperatura formy, temperatura ciekłego metalu, szybkość przemieszczania się tłoka, czas rozwarcia formy, czas przyłożenia ciśnienia, rodzaj stosowanego pokrycia, czystość metalurgiczna stopu, czas wypełniania wnęki formy. Jednakże to ciśnienie prasowania oraz temperatura metalu i formy odgrywają kluczową rolę, gdyż ich zmiany w największym stopniu oddziałują na końcowy poziom właściwości otrzymywanych elementów.

W pierwszym etapie prac – przy założeniu maksymalizacji ciśnienia prasowania oraz w oparciu o wyniki badań zwartości strukturalnej, wyznaczono optymalne parametry procesu prasowania w stanie ciekłym dla wytwarzanego odlewu o średniej grubości ścianki wynoszącej 20 mm w przypadku wszystkich wariantów materiałowych. Dla badanych stopów (7075, 2024, 6061 i AlSi7Mg) prędkość tłoka w trakcie wypełniania wnęki formy wynosiła odpowiednio: 60, 50 i 40 mm/s, temperatura stopu: 750, 730, 720 i 690°C, temperatura formy: 240, 220, 200°C oraz czas przyłożenia ciśnienia: 25 s. Różnice wynikają z różnych właściwości technologicznych zastosowanych stopów.

W dalszym etapie prac skupiono się na roli ciśnienia prasowania jako czynnika siłowego i termodynamicznego w procesie prasowania w stanie ciekłym. Jego wpływ na właściwości mechaniczne odlewów krzepnących pod ciśnieniem atmosferycznym (0,1 MPa) oraz prasowanych pod ciśnieniem odpowiednio 40, 75, 120 i 150 MPa wykonanych z badanych stopów przedstawiono na rysunku 6. Zauważono korzystny wpływ ciśnienia prasowania na badane właściwości – w szczególności na charakterystyki plastyczności.



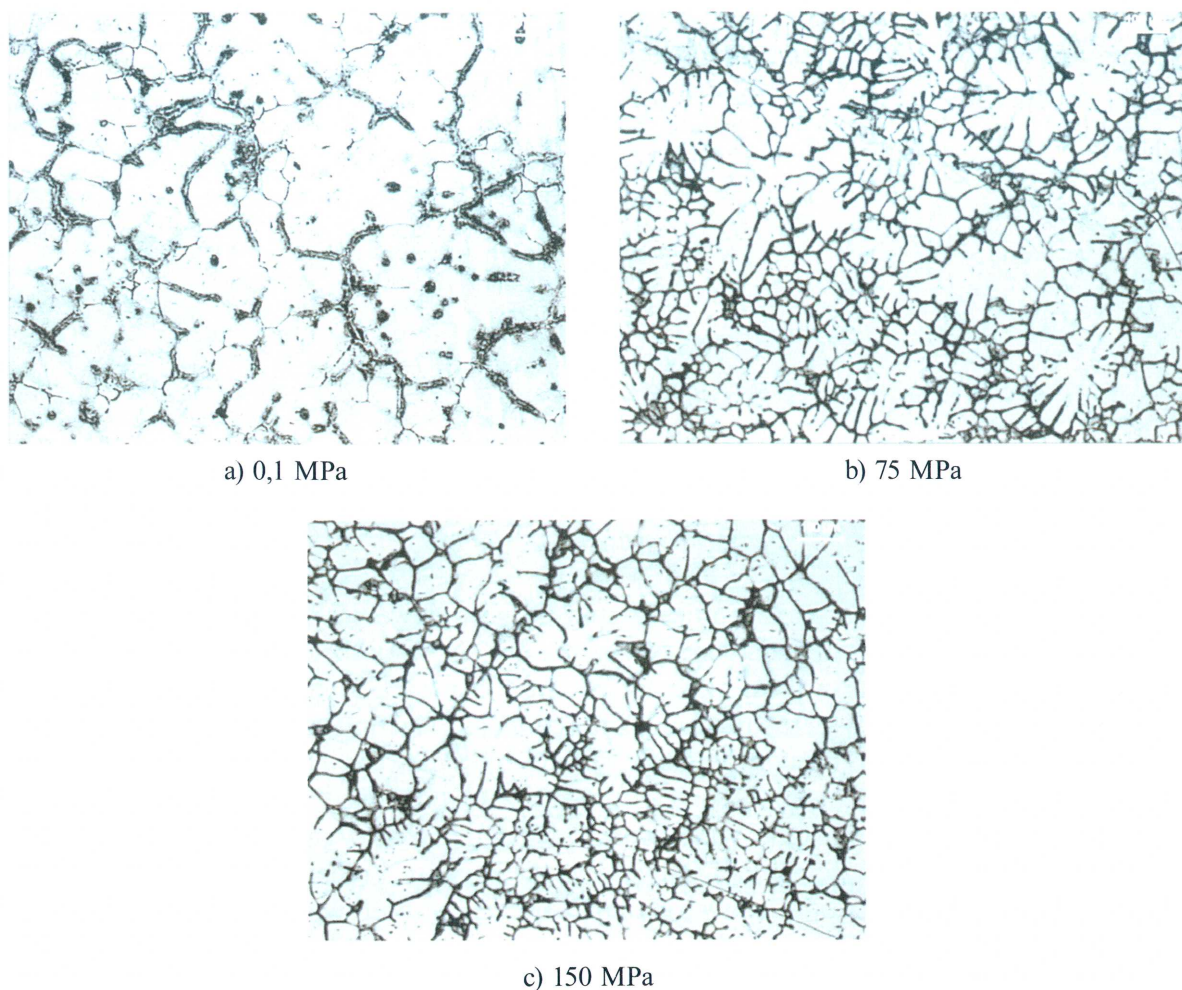
Rys. 6. Zależności właściwości mechanicznych od wartości ciśnienia prasowania dla badanych stopów

W celu zbadania mechanizmu oddziaływania ciśnienia prasowania na właściwości odlewów przeprowadzono szczegółowe badania mikro- i submikrostrukturalne próbek pobranych z wytworzonych odlewów.

Przykładowe obrazy mikrostruktur odlewów krzepnących pod różnym ciśnieniem wykonanych ze stopu 7075 przedstawiono na rysunku 7. Stwierdzono, że zwielokrotnienie ciśnienia w trakcie krzepnięcia powoduje znaczne rozdrobnienie struktury badanych stopów oraz eliminację ewentualnych nieciągłości strukturalnych typu porowatości gazowych i rzadzisz skurczowych w skali makro. Jest to szczególnie ważne przy wytwarzaniu elementów odlewanych ze stopów przeznaczonych do przeróbki plastycznej, które ze względu na szerokie zakresy krzepnięcia wykazują szczególną skłonność do tworzenia pustek strukturalnych.

Poprzez szczegółowe badania metalografii ilościowej potwierdzono korzystny wpływ ciśnienia na badane właściwości mikrostrukturalne odlewów. Intensyfikacja ciśnienia prasowania wpływa silnie na obniżenie średniego rozmiaru ziarna. Przy czym największy efekt otrzymano porównując wyniki uzyskane dla próbek pobranych z odlewów krzepnących pod ciśnieniem odpowiednio 0,1 i 75 MPa, natomiast maksymalizacja ciśnienia do wartości 150 MPa spowodowała tylko nieznaczny spadek średniego rozmiaru ziarna w badanych odlewach.

O silnym wpływie ciśnienia prasowania na rozdrobnienie mikrostrukturalne badanych materiałów świadczy również znaczący spadek wielkości wydzielań analizowanych faz oraz wzrost gęstości obiektów mikrostrukturalnych wraz z intensyfikacją ciśnienia prasowania (tab. 3).

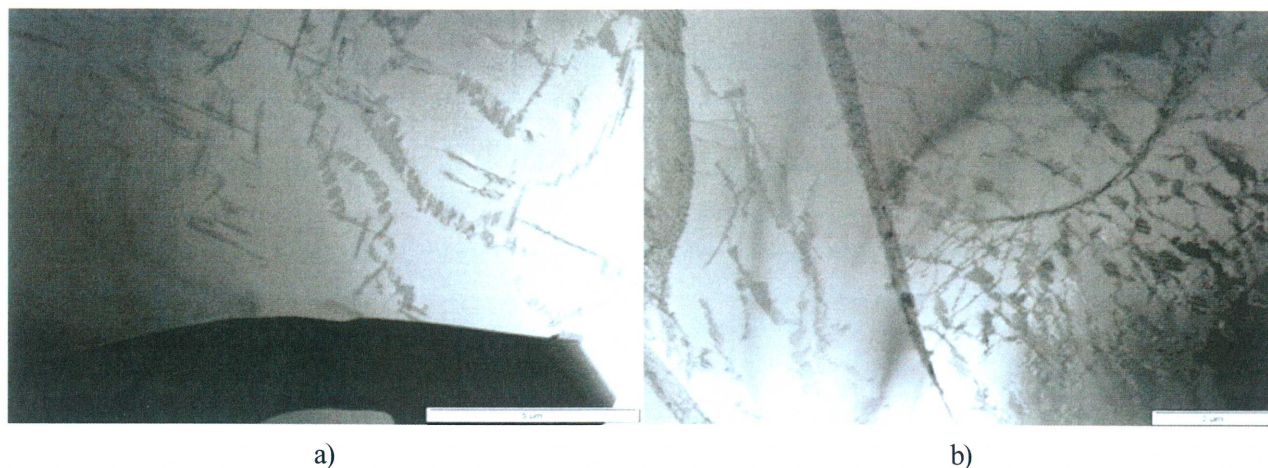


Rys. 7. Typowe mikrostruktury odlewów wykonanych ze stopu 7075, krzepnących pod różnym ciśnieniem: a) ciśnienie atmosferyczne (0,1 MPa), b) 75 MPa, c) 150 MPa

Tabela 3. Wyniki badań metalografii ilościowej próbek pobranych z wytworzonych odlewów

Stop	Ciśnienie prasowania, MPa	Średni rozmiar ziarna, μm	Średnia powierzchnia wydzieleń (Mg_2Si , Si lub Al_2Cu), μm^2	Gęstość obiektów strukturalnych, liczba obiektów/ mm^2
7075	0,1	95,6	15,84	8,0e2
	150	63,5	7,41	2,1e3
2024	0,1	101,3	12,07	4,0e3
	150	67,4	8,21	9,3e3
6061	0,1	107,3	6,13	2,7e2
	150	79,7	5,10	5,3e2
AlSi7Mg	0,1	136,7	20,86	3,4e3
	150	57,2	7,12	4,3e3

Analiza wyników badań przy użyciu mikroskopu transmisyjnego pozwala na stwierdzenie, że w materiałach występują znaczące różnice w charakterze splotów dyslokacyjnych (rys. 8). Odlewy krzepnące pod wysokim ciśnieniem charakteryzuje zwiększona gęstość dyslokacji.



Rys. 8. Sploty dyslokacyjne w odlewach wytworzonych ze stopu 7075 krzepnących pod ciśnieniem: a) atmosferycznym, b) 150 MPa

Stwierdzono, że korzystne zmiany mikrostrukturalne odlewów krzepnących pod ciśnieniem zewnętrznym spowodowane są działaniem mechanizmów, które podzielić można na mechaniczne i termodynamiczne. Pierwsze z powyższych powodują znaczącą intensyfikację szybkości chłodzenia krzepnącego metalu, poprzez mechaniczną redukcję szczeliny pomiędzy odlewem a ściankami formy, zwiększając tym samym prędkość chłodzenia odlewów. Drugie zwiększają szybkość zarodkowania w krzepnącym metalu poprzez wzrost przechłodzenia.

W celu maksymalizacji poziomu właściwości mechanicznych wytworzonych odlewów przeprowadzono operacje obróbki cieplnej. Zauważono, że odlewy krzepące pod wysokim ciśnieniem wymagają zastosowania odmiennych parametrów temperaturowo-czasowych w odniesieniu do odlewów kokilowych. Z tego względu wykonano szereg prób optymalizacyjnych zarówno parametrów przesycania, jak i sztucznego starzenia.

Przeprowadzono badania właściwości mechanicznych próbek w stanie lanym F, przesyconym T4, sztucznie starzonym T5 i umocnionym wydzieleniowo T6. Porównanie wyników właściwości mechanicznych odlewów w stanie lanym oraz umocnionym wydzieleniowo przedstawiono w tabeli 4.

Uzyskano bardzo korzystny kompleks właściwości mechanicznych odlewów prasowanych w stanie ciekłym w odniesieniu do odlewów krzepnących pod ciśnieniem atmosferycznym. Maksymalne wartości uzyskano dla odlewów prasowanych w stanie ciekłym ze stopu 7075. Odnotowano wytrzymałość na rozciąganie na poziomie 483 MPa, granicę plastyczności równą 405 MPa przy wydłużeniu sięgającym prawie 4%.

Badane odlewy w stanie lanym oraz po zabiegach obróbki cieplnej poddano badaniom właściwości fizycznych (pomiarów kalorymetrycznych, ciepła właściwego i zmian wymiarowych wraz z temperaturą).

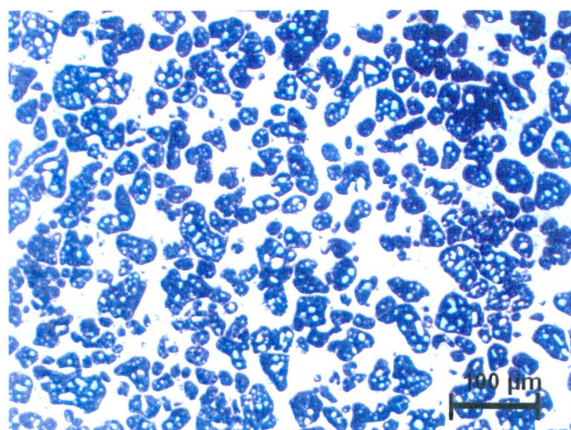
Wykazano, że odlewy wytworzone technologią kokilową oraz prasowane w stanie ciekłym wykazują znaczące różnice w badanych charakterystykach. Stwierdzono większy stopień przesylenia roztworu stałego pierwiastkami wprost z odlewania w odlewach prasowanych w stanie ciekłym ze względu na wzrost szybkości chłodzenia. Odlewy prasowane w stanie ciekłym charakteryzują się również niższym współczynnikiem rozszerzalności cieplnej w odniesieniu do odlewów krzepnących pod ciśnieniem atmosferycznym. Jest to korzystna cecha z punktu widzenia ich zastosowania w konstrukcjach pracujących w zmiennym polu temperatury.

Tabela 4. Wartości właściwości mechanicznych odlewów krzepnących pod ciśnieniem atmosferycznym oraz prasowanych w stanie ciekłym

Stop	Stan	Ciśnienie prasowania MPa	R _m , MPa	R _{0,2} , MPa	A ₅ , %
7075	F	0,1	192	113	0,8
	F	150	243	158	2,7
7075	T6	0,1	341	303	0,3
	T6	150	483	405	3,9
2024	F	0,1	206	93	1,4
	F	150	244	154	4,2
2024	T6	0,1	326	258	2,9
	T6	150	385	326	4,8
6061	F	0,1	147	79	7,3
	F	150	172	89	12
6061	T6	0,1	269	211	4,9
	T6	150	313	257	8,8
AlSi7Mg	F	0,1	181	110	4,8
	F	150	206	122	5,2
AlSi7Mg	T6	0,1	265	187	5,7
	T6	150	292	224	7,6

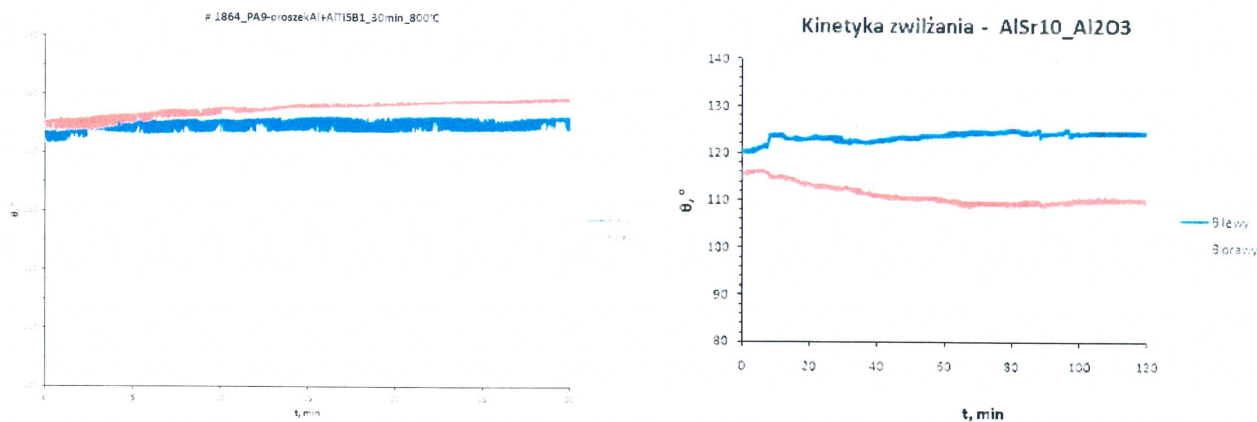
Wytwarzanie materiałów kompozytowych oraz prasowanych w stanie ciekłym o strukturze tiksotropowej

Przy użyciu modułu *slurrymaker* wytworzono szereg materiałów w stanie stało-ciekłym charakteryzujących się strukturą tiksotropową. Na rysunku 9 przedstawiono przykładową mikrostrukturę odlewu tiksotropowego prasowanego w stanie ciekłym pod ciśnieniem 150 MPa wykonanego ze stopu AlSi7Mg. Odlewy tiksotropowe w stanie lanym charakteryzuje nieco lepszy kompleks właściwości w odniesieniu do elementów prasowanych w stanie ciekłym – wytrzymałość na rozciąganie wynosiła 212 MPa, granica plastyczności 131 MPa, natomiast wydłużenie było równe 5,8%. Po przeprowadzeniu zabiegów obróbki cieplnej odnotowano większy wzrost właściwości w stosunku do stanu lanego – niż w przypadku odlewów grawitacyjnych oraz prasowanych w stanie ciekłym. Wytrzymałość na rozciąganie osiągnęła 305 MPa, granica plastyczności 229 MPa oraz wydłużenie 7,4%. Proces odlewania ze stanu stało-ciekłego oprócz lepszej jakości części jest korzystny ze względu na istotną redukcję temperatury procesu co znacząco wydłuża trwałość narzędzi.



Rys. 9. Struktura odlewu tiksotropowego wykonanego ze stopu AlSi7Mg (trawienie odczynikiem Becka)

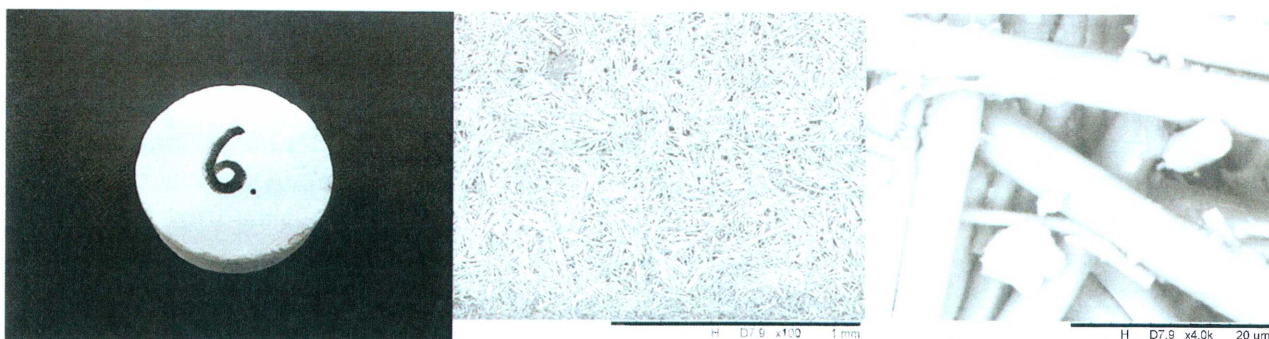
Przeprowadzono kompleksowe prace umożliwiające skuteczne wytwarzanie materiałów heterogenicznych, w tym dokonano doboru kompozycji metal-zbrojenie poprzez wykonanie szeregu badań ich zwilżalności oraz reaktywności z ciekłymi stopami aluminium.



Rys. 10. Przykładowe wyniki badań zwilżalności stopów 7075 oraz AlSr10 z podłożem ceramicznym (Al_2O_3)

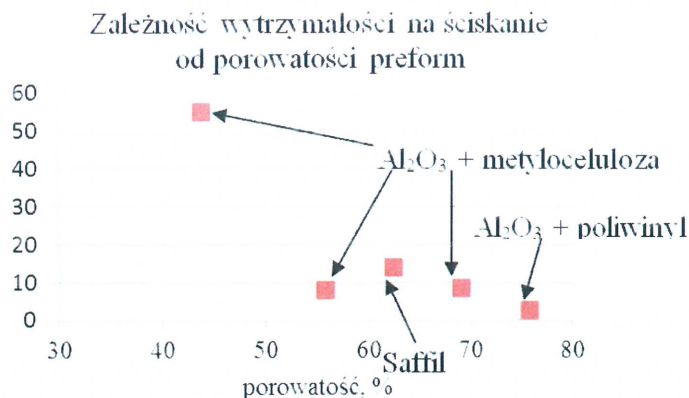
W badaniach skoncentrowano się na analizie zwilżalności par materiałowych metal-ceramika oraz próbach poprawy ich adhezji. Materiałami do badań były przemysłowe stopy używane do wytwarzania odlewów monolitycznych, dwuskładnikowe stopy modelowe, a także podłoża ceramiczne wykonane z tlenku glinu oraz węgla krzemu. Poprzez analizę wyników badań stwierdzono, że dodatek Sr znacząco zwiększa oddziaływanie stopów Al z tlenkiem glinu i skutkuje bardzo dobrą adhezją do podłoża poprzez intensyfikację chemicznego charakteru zwilżalności. W przypadku badań wpływu Sr używano m.in. modelowego stopu AlSr10. Porównanie kątów zwilżania stopu 7075 i modelowego AlSr10 na podłożu z tlenku glinu przedstawiono na rys. 10. Ze względu na szkodliwy wpływ strontu w wysokich ilościach, do stopów wykorzystywanych w procesie infiltracji ciśnieniowej dodawano 0,04% wag Sr.

Porowate kształtki stosowane do infiltracji winny posiadać duży udział porowatości otwartej oraz możliwie wysoką wytrzymałość na ścislenie. Przy pracach wykorzystano szereg materiałów ceramicznych, spoiw oraz czynników porotwórczych, które mieszano oraz przetwarzano przy zmiennych parametrach procesów wytwórczych. Wytworzono szereg kształtek ceramicznych o zróżnicowanych właściwościach. Strukturę przykładowej preformy wytworzonej z krótkich włókien Saffil przedstawiono na rysunku 11. Właściwości wyselekcjonowanych kształtek w formie graficznej pokazano na rysunku 12.



Rys. 11. Struktura preformy typu saffil:

a) fotografia kształtki ceramicznej, b) makrostruktura, c) mikrostruktura kształtki

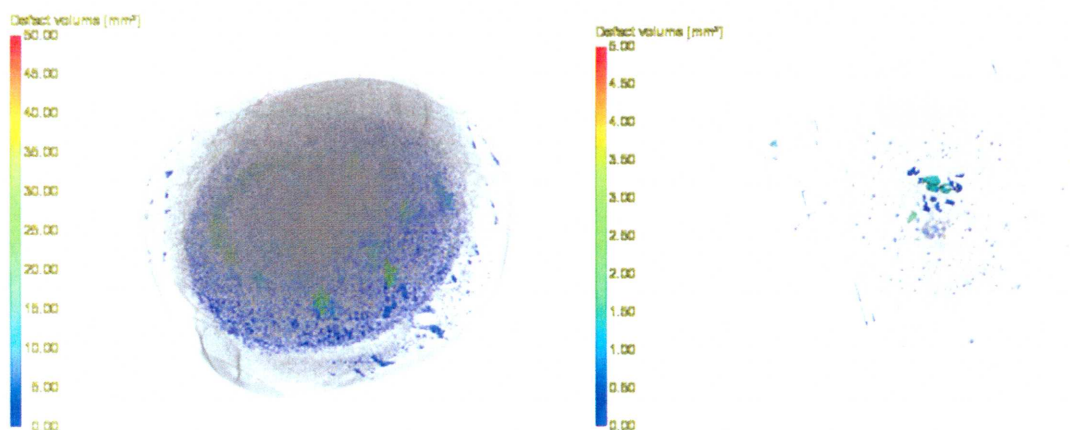


Rys. 12. Wykres zależności wytrzymałości na ściskanie od udziału porowatości wybranych preform ceramicznych

Infiltracja ciśnieniowa stanowi obecnie najszerszej stosowaną technikę wytwarzania materiałów heterogenicznych na osnowie metalowej. Wysokie ciśnienie wywierane na ciekły metal w trakcie procesu infiltracji materiału zbrojącego (preformy ceramicznej) prowadzi nie tylko do wymuszenia wypełniania por preformy, ale również wzmacnia oddziaływanie pomiędzy osnową a zbrojeniem. Umożliwia to skuteczne wytwarzanie materiałów kompozytowych nawet w przypadku zastosowania niezwilżanej ceramiki.

W niniejszej pracy wykonano szereg kompozytów na osnowie metalowej zbrojonych kształtkami ceramicznymi o różnym stopniu porowatości otwartej wytworzonych z Al_2O_3 oraz włókien Saffil metodą infiltracji ciśnieniowej.

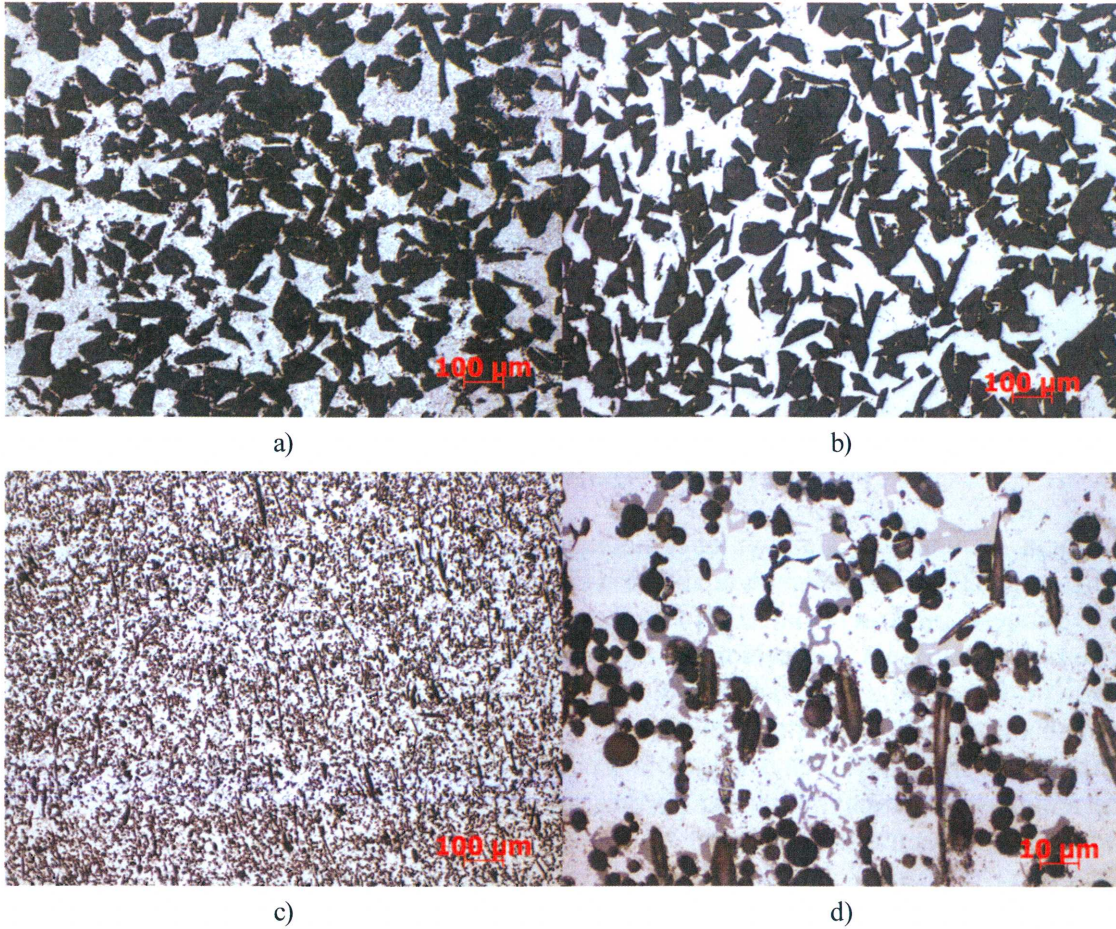
W pierwszym etapie dobrano parametry procesu infiltracji ciśnieniowej w celu maksymalizacji skuteczności wypełniania por preform ceramicznych. Do tego celu wykorzystano technikę tomografii komputerowej.



Rys. 13. Pomiar udziału porowatości odlewu kompozytowego przy pomocy tomografii komputerowej

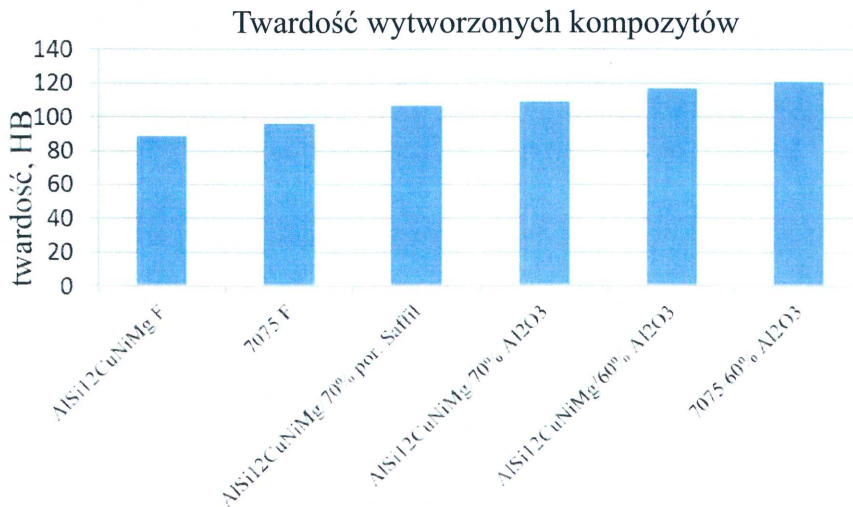
Dokonano optymalizacji parametrów procesu uzyskując odlewy o niskim udziale porowatości, która była konsekwencją obecności pustek zamkniętych w strukturze preform ceramicznych. Preformy nagrzewano do temperatury z przedziału 700-900°C w zależności od materiału oraz porowatości. Metal znacząco przegrzewano – około 140°C powyżej temperatury likwidus.

Dzięki analizie mikrostruktur odlewów kompozytowych pobranych z różnych miejsc odlewów potwierdzono skuteczność procesu infiltracji ciśnieniowej ceramicznych preform stopami odlewniczymi (AlSi12CuNiMg) oraz do przeróbki plastycznej (7075). Metal doskonale wypełnia nawet drobne pustki i nieciągłości strukturalne pod wpływem wysokiego ciśnienia.



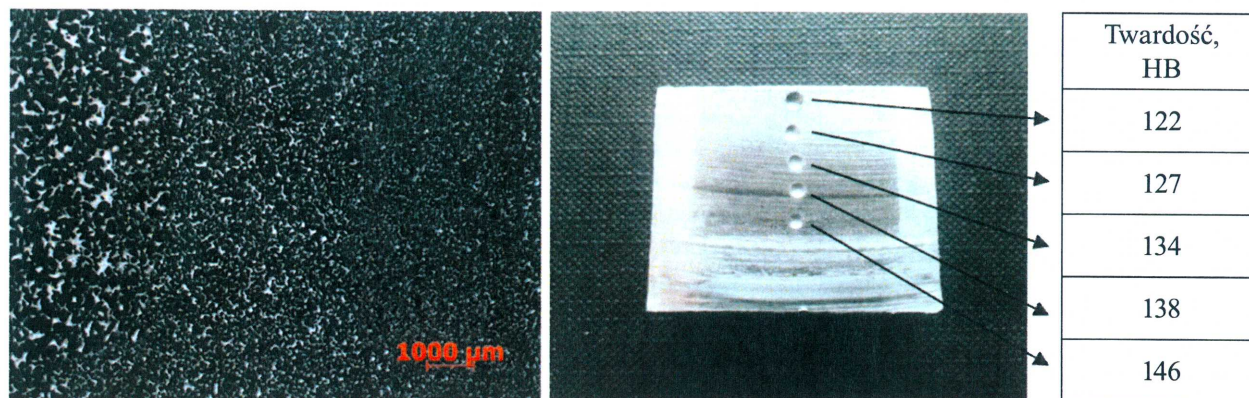
Rys. 14. Przykładowe mikrostruktury wytworzonych materiałów kompozytowych: a) AlSi12CuNiMg/Al₂O₃ 60%, b) 7075/Al₂O₃ 60%, c i d) AlSi12CuNiMg/Saffil70%,

Wyniki badań twardości wytworzonych materiałów kompozytowych przedstawiono na rys. 15. W odniesieniu do odlewów monolitycznych, materiały kompozytowe charakteryzują się znaczącym wzrostem twardości, której wartość jest zależna od zastosowanego zbrojenia i materiału osnowy.



Rys. 15. Przykładowe wyniki twardości wytworzonych kompozytów metalowych

Do wytworzenia kompozytów gradientowych wykorzystano preformy Al_2O_3 o zmiennej dystrybucji pustek na ich przekroju, które zalewano eutektycznym stopem AlSi12CuNiMg. Przykładową makrostrukturę wytworzonego kompozytu wraz z ilustracją zmian twardości na jego przekroju przedstawiono na rys. 16.



Rys. 16. Przykładowa makrostruktura wytworzonego kompozytu gradientowego

Uzyskano materiał charakteryzuje zmienna twardość na przekroju próbki. Podczas prób wytwarzania materiałów gradientowych z zastosowaniem preform o zmiennym rozkładzie porowatości uzyskano średnie wartości twardości w przedziale od 115 do 151 HB.

Podsumowanie i wnioski

Realizacja danego zadania badawczego obejmowała szereg prac mających na celu opanowanie technologii prasowania w stanie ciekłym do wytwarzania odlewów monolitycznych, w tym o strukturze tiksotropowej oraz kompozytów metalowych, posiadających podwyższone właściwości użytkowe. W tym celu określono wartości optymalnych parametrów technologicznych procesu prasowania w stanie ciekłym zarówno dla stopów odlewniczych jak i stopów do przeróbki plastycznej (AlSi7Mg, 7075, 2024 i 6061) oraz scharakteryzowano wpływ ciśnienia prasowania na mikrostrukturę oraz właściwości wytwarzanych odlewów. Opanowano metodę otrzymywania odlewów o strukturze tiksotropowej w oparciu o wykorzystanie modułu *slurrymaker*. Przeprowadzono operację obróbki cieplnej badanych odlewów uzyskując doskonały poziom właściwości mechanicznych.

W celu wytworzenia materiałów kompozytowych przeprowadzono badania oddziaływania wykorzystywanych stopów z podłożami ceramicznymi oraz stopami modelowymi. Doświadczenia płynące z nich wykorzystano do opracowania metodyki wytwarzania porowatych kształtek ceramicznych (Al_2O_3 w tym gradientowe, Saffil) a także przy modyfikacji składów chemicznych wykorzystywanych stopów (dodatek Sr). Metodą infiltracji ciśnieniowej wytworzono szereg materiałów kompozytowych uzyskując elementy o wysokiej twardości, w tym także o zmiennych właściwościach na przekroju poprzecznym.

Możliwe zastosowania

Squeeze casting jest procesem przemysłowym wykorzystywanym do wytwarzania części o wysokim poziomie właściwości użytkowych, dzięki czemu odbiorcami odlewów prasowanych w stanie ciekłym mogą być firmy min. z sektora motoryzacyjnego, lotniczego lub obronności.

W ostatnim czasie występuje duże zainteresowanie polskiego przemysłu omawianą technologią, m. in. ze względu na promocję wyników uzyskanych w ramach zadania badawczego V.5, szczególnie ze strony firm produkujących części motoryzacyjne. W najbliższym czasie skutkować może to wdrożeniem tej technologii w warunkach przemysłowych.

Wyniki uzyskane w ramach realizacji zadania dają unikatową możliwość szerszego i pomyślnego zastosowania technologii prasowania w stanie ciekłym w krajowym przemyśle.

Bibliografia:

- [1] M.C. Flemings, Solidification Processing, McGraw-Hill, New York, New York, 1974.
- [2] W. Kurz, D.J. Fisher, Fundamentals of Solidification, Trans.Tech. Publications, Switzerland, 1989.
- [3] M.C. Flemings, R. Mehrabian, G.E. Nereo. Macrosegregation: Part II. Met. Trans. AIME 242, 1968.
- [4] M.C. Flemings. Principles of control of soundness and homogeneity of large ingots. J. Scan. Met. 5, 1976.
- [5] J.R. Sarazin and A. Hellawell, Channel formation in Pb---Sn, Pb---Sb and Pb---Sn---Sb alloy ingots and comparisons with the system $\text{NH}_4\text{Cl}---\text{H}_2\text{O}$. Metall. Trans. A19, 1988.
- [6] Sobczak J. J. Teoretyczne i praktyczne podstawy procesu prasowania w stanie ciekłym (*squeeze casting*) metali nieżelaznych. PraceInstytutuOdlewnictwa, ZeszytSpecjalny nr 41, Kraków, 1993.
- [7] D.K. Chernov, Reports of the Imperial Russian Metallurgical Society, 1878.
- [8] A. I. Batyshev, E. M. Bazilevskii, Yu. A. Ebstratov and F. A. Martynov, Bush Production by Casting and Solidification Under Piston Pressure and by Liquid Metal Stamping, Russian. Castings Production, Feb. 1972.
- [9] R. F. Lynch, R. P. Olley and P. C. J. Gallagher, Squeeze Casting of Aluminum, AFS Transactions 1975, 83:569-576.
- [10] M.R. Ghomashchi, A. Vikhrov. Squeeze casting: an overview. Journal of Materials Processing Technology 101, 2000.