

Jacek Jackowski<sup>1</sup>

Politechnika Poznańska, Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania, Instytut Technologii Materiałów, Zakład Odlewnictwa, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań

## MECHANIZM KSZTAŁTOWANIA SIĘ POROWATOŚCI W METALOWYCH ODLEWACH KOMPOZYTOWYCH Z NASYCANYM ZBROJENIEM

Przedstawiono efekty analiz i badań związanych z kształtowaniem się porowatości w strukturze odlewów kompozytowych wytwarzanych przez nasycanie porowatego zbrojenia ciekłą osnową metalową. Analiza objęła zjawiska mające miejsce w przedziale czasowym między początkiem nasycania zbrojenia a końcem krzepnięcia osnowy kompozytowej. Przeprowadzona analiza wykazała, że głównymi czynnikami „porotwórczymi” w procesie wytwarzania odlewów są: tworzenie się okluzji gazowych w objętości nasycanej kształtki zbrojenia oraz zjawiska skurczowe towarzyszące stygnięciu w stanie ciekłym i krzepnięciu osnowy kompozytowej. W kształtce nasycanego zbrojenia tworzą się okluzje gazowe, które wykazują brak mobilności, a w miarę wzrostu wartości ciśnienia ulegają kompresji (rys. 1). Stygnięciu w stanie ciekłym i krzepnięciu osnowy kompozytowej towarzyszy ubytek jej objętości, który niekompensowany powoduje dekompresję okluzji i wzrost porowatości materiału kompozytowego (rys. 2). Rozkład porowatości w próbnym odlewie kompozytowym oznaczono metodą grawimetryczną na próbkach uzyskanych z pociętych odlewów (rys. 3). Stwierdzony rozkład przedstawiony na rysunku 4 uwiarygodnia opisany mechanizm tworzenia się porowatości i dowodzi istnienia ewidentnych sfer izolowanych w odlewach próbnym mimo stosowania różnych wartości ciśnienia nasycania zbrojenia. Uzyskanie odlewów kompozytowych (z nasyconym zbrojeniem) o strukturze o niskiej porowatości wymaga zatem działań zapewniających utrzymanie zadanej wartości ciśnienia nasycania w całej objętości tworzącego się odlewu do momentu całkowitego zakrzepnięcia osnowy nasycającej.

Słowa kluczowe: odlewy kompozytowe, struktura, porowatość

## A MECHANISM OF POROSITY FORMATION IN METAL COMPOSITE CASTS WITH SATURATED REINFORCEMENT

The paper presents the results of analyses and studies related to formation of porosity in the structure of composite casts manufactured by saturation of a porous reinforcement with liquid metal matrix. The analysis includes the phenomena undergoing in the time interval between the beginning of the reinforcement saturation and the end of solidification of the composite matrix. The analysis has shown that the main factors leading to porosity during the casting process are as follows: generation of gas occlusions in the volume of a saturated reinforcement profile and shrinkage phenomena accompanying the processes of cooling in liquid state and solidification of composite matrix. In the reinforcement profile under saturation the gas occlusions appear that are initially immobile and, with growing pressure, are subject to compression (Fig. 1). Cooling in the liquid state and solidification of the composite matrix are accompanied by the decrease of its volume that, if not compensated, leads to decompression of the occlusions and growing porosity of the composite material (Fig. 2). Distribution of porosity in trial composite casts has been gravimetrically determined in the samples obtained from cut casts (Fig. 3). The distribution found this way and presented in Figure 4 authenticates the considered mechanism of porosity formation and provides an obvious prove of existence of insulated regions in the trial casts, in spite of using different values of the matrix reinforcement pressure. Hence, in order to obtain composite casts (with saturated reinforcement) of low-porous structure a pre-determined saturation pressure should be maintained in the whole area of the manufactured cast until the time of solidification of the reinforcing matrix.

Key words: composite casts, structure, porosity

### WSTĘP

Struktura odlewów kompozytowych wytwarzanych przez nasycanie porowatego, ceramicznego zbrojenia przez ciekłą osnowę metalową jest szczególnie podatna na wady porowatości [1-3]. O skłonności do tworzenia się porów w strukturze kompozytowej decydują zarówno relacje między właściwościami komponentów [4], jak i warunki ich łączenia [5, 6]. Za celową uznano zatem analizę zjawisk wpływających na porowatość materiału kompozytowego, a mających miejsce w okresie zawartym między momentem początku nasycania zbrojenia a

chwila całkowitego zakrzepnięcia osnowy nasycającej zbrojenie [2, 7]. Jej wyniki uzupełnione oceną efektów obserwacji, doświadczeń i pomiarów wskazują, że dominującą przyczyną porowatości odlewów kompozytowych jest tworzenie się okluzji gazowych w nasyconym zbrojeniu potęgowane skutkiem kurczenia się stygnącej osnowy w powstającej strukturze kompozytowej.

<sup>1</sup> dr inż.

## POWSTAWANIE PORÓW W STRUKTURZE ODLEWU KOMPOZYTOWEGO

Porowatość struktury odlewu kompozytowego powstającego przez nasycenie zbrojenia metalem może być spowodowana:

- niedostatecznym nasyceniem kapilar zbrojenia przez nasycającą osnowę,
- tworzeniem się okluzji gazowych w trakcie nasycania zbrojenia,
- desorpcją gazu wydzielającego się ze stygnącej w stanie ciekłym i krzepnącej osnowy oraz
- zjawiskami skurczowymi towarzyszącymi stygnięciu i krzepnięciu osnowy.

Analiza i badania zagadnień związanych z wymienionymi zjawiskami wykazała, że wpływ niepełnego nasycenia kapilar zbrojenia oraz desorpcji gazu z metalu osnowy (np. wodoru ze stopów aluminium) na całkowitą porowatość odlewów kompozytowych jest znikomy. Stopień wypełnienia kapilar kształtki zbrojącej odlew rośnie proporcjonalnie do trzeciej potęgi ilorazu wartości narastającego ciśnienia nasycania [7], a dobrze przerafinowany metal i utrzymywanie na dostatecznie wysokim poziomie wartości ciśnienia nasycania wyklucza możliwość zarodkowania pęcherzyków gazu [3].

Przepływ ciekłego metalu nasycającego zbrojenie kompozytu nie jest równomierny. W pierwszej kolejności wypełniane metalem zostają kanały (kapilary) zbrojenia zapewniające najmniejsze opory przepływu strugi. Wzrost ciśnienia sprawia, że sukcesywnie napełniane

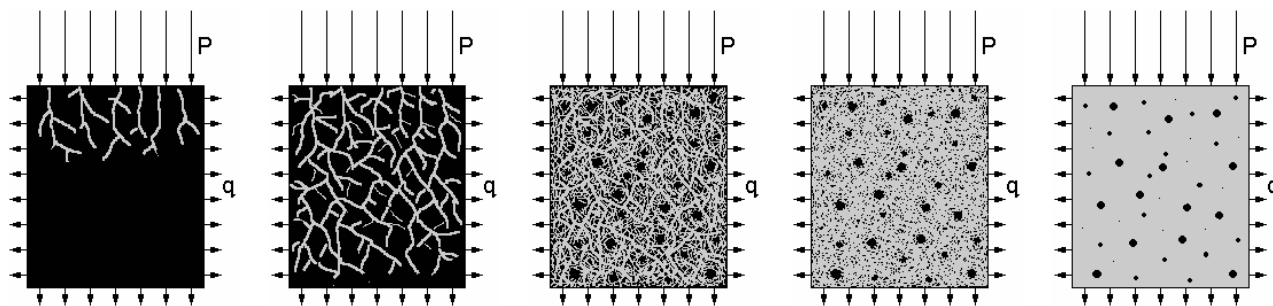
zostają metalem kanały o coraz mniejszych przekrojach. Skutkiem takiego zachowania się powstającego układu kompozytowego w całej objętości kształtki nasycanego zbrojenia zamykane są okluzje gazowe. W przypadku oddolnego nasycania kształtki zbrojącej objętość zamykanych okluzji gazowych wynosi ok. 30% objętości wszystkich porów nasycanego zbrojenia (w temperaturze nasycania i przy wartości ciśnienia niewiele przekraczającej wartość ciśnienia normalnego) [7]. Badania metalograficzne wykazały ponadto, że rozkład okluzji w objętości nasycanego zbrojenia jest równomierny.

## ZACHOWANIE SIĘ OKLUZJI

Wzrost wartości ciśnienia wywieranego na powstający układ kompozytowy sprawia, że okluzje ulegają silnej kompresji. Z chwilą osiągnięcia maksymalnej wartości ciśnienia nasycania objętość okluzji jest najmniejsza. W okresie poprzedzającym początek krzepnięcia osnowy kompozytowej tworzący się układ stanowią trzy fazy:

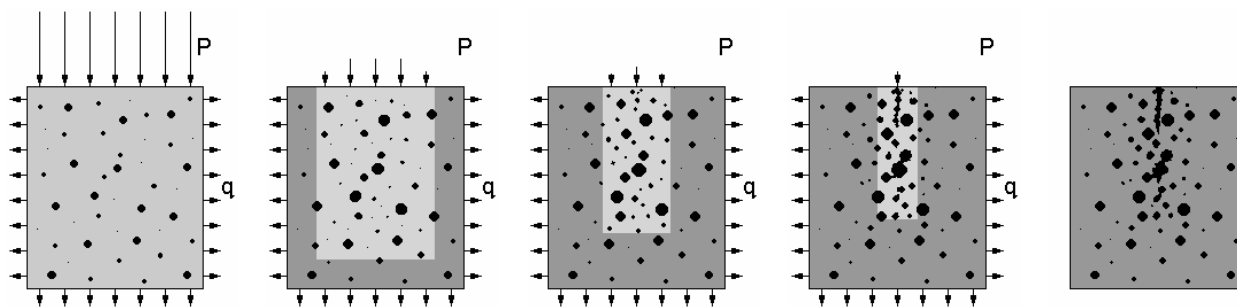
- ✓ stała - materiału kształtki zbrojącej odlew kompozytowy,
  - ✓ ciekła - metalowej osnowy nasycającej, oraz
  - ✓ gazowa - uwieczonych w układzie okluzji,
- przy czym dwie ostatnie stanowią ściśle medium wypełniające kapilary zbrojenia kompozytu. Schemat powstawania opisanego układu przedstawiono na rysunku 1.

W realnych warunkach wytwarzania trudno jest



Rys. 1. Kształtowanie się porowatości w układzie kompozytowym od początku procesu nasycania zbrojenia do momentu osiągnięcia nominalnej wartości ciśnienia nasycania przy całkowicie ciekłej osnowie kompozytu

Fig. 1. Porosity formation in a composite system since the beginning of the reinforcement saturation process until obtaining the rated value of saturation pressure with totally liquid composite matrix



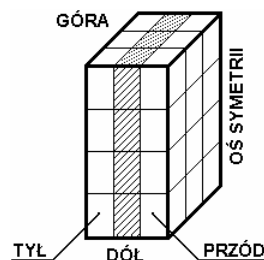
Rys. 2. Kształtowanie się porowatości odlewu kompozytowego w okresie stygnięcia i krzepnięcia metalu osnowy

Fig. 2. Porosity formation of a composite cast material in the period of matrix metal cooling and solidification

uniknąć powstawania stref izolowanych [7, 8] w stygnących odlewach kompozytowych. Strefy izolowane mogą stanowić część lub całkowitą objętość odlewu. Są to obszary (objętości), w których krzepnięcie osnowy kompozytowej odbywa się przy działaniu ciśnienia nasycania o wartości niższej od nominalnej. Powstają one np. na skutek przejścia części (lub całości) nacisku tłoka prasującego przez zakrzepniętą warstwę osnowy, w wyniku czego spada wartość rzeczywistego ciśnienia działającego na tworzący się układ kompozytowy. Spadek lub zanik nacisku wywieranego na niezakrzepniętą część odlewu kompozytowego sprawia, że ubytek objętości stygnącej i krzepnącej osnowy równy jest przyrostowi objętości okluzji w tej części układu. Ścisłość medium, jakie stanowi ciekła osnowa oraz okluzje, bilansuje zmiany objętości faz układu. Postępujące krzepnięcie osnowy kompozytowej petryfikuje lokalne stany występujące w krzepnącym odlewie i sprawia, że porowatość uzyskanego tworzywa kompozytowego w odlewie jest zróżnicowana. Schemat tego procesu (przy upraszczających założeniach) przedstawia rysunek 2.

### OCENA POROWATOŚCI MATERIAŁU ODLEWÓW KOMPOZYTOWYCH

Próbne odlewy kompozytowe wytwarzane były poprzez nasycanie kształtek glinokrzemianowego, włóknistego zbrojenia stopem AlSi11 w specjalnie zaprojektowanej formie ciśnieniowej współpracującej z zimnokomorową maszyną ciśnieniową [6]. Odlewy w kształcie płytek o wymiarach 70 x 60 x 20 mm były rozcinane na dwie symetryczne połowy, po czym jedną z nich dzielono na 36 próbek zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat podziału próbných odlewów kompozytowych do oceny rozkładu porowatości

Fig. 3. Scheme of division of trial composite casts for purposes of porosity distribution assessment

Lp.	Rozkład porowatości [%]			Ciśnienie nasycania Porowatość całkowita odlewu																																													
	przód	środek	tył																																														
1	<table border="1"> <tr><td>0,81</td><td>0,68</td><td>0,78</td></tr> <tr><td>1,26</td><td>1,04</td><td>1,14</td></tr> <tr><td>1,29</td><td>1,03</td><td>1,36</td></tr> <tr><td>1,36</td><td>1,60</td><td>1,76</td></tr> <tr><td colspan="3"><math>\bar{P} = 1,18\%</math></td></tr> </table>	0,81	0,68	0,78	1,26	1,04	1,14	1,29	1,03	1,36	1,36	1,60	1,76	$\bar{P} = 1,18\%$			<table border="1"> <tr><td>0,69</td><td>0,78</td><td>0,97</td></tr> <tr><td>0,81</td><td>1,73</td><td>1,07</td></tr> <tr><td>1,02</td><td>2,32</td><td>2,01</td></tr> <tr><td>1,15</td><td>2,49</td><td>3,79</td></tr> <tr><td colspan="3"><math>\bar{P} = 2,07\%</math></td></tr> </table>	0,69	0,78	0,97	0,81	1,73	1,07	1,02	2,32	2,01	1,15	2,49	3,79	$\bar{P} = 2,07\%$			<table border="1"> <tr><td>1,08</td><td>0,94</td><td>1,04</td></tr> <tr><td>1,46</td><td>1,33</td><td>1,21</td></tr> <tr><td>1,53</td><td>1,47</td><td>1,42</td></tr> <tr><td>1,92</td><td>2,08</td><td>2,11</td></tr> <tr><td colspan="3"><math>\bar{P} = 1,47\%</math></td></tr> </table>	1,08	0,94	1,04	1,46	1,33	1,21	1,53	1,47	1,42	1,92	2,08	2,11	$\bar{P} = 1,47\%$			<p>p = 12,5 MPa</p> <p>P = 1,41%</p> <p><math>\bar{P} = 1,57\%</math></p>
0,81	0,68	0,78																																															
1,26	1,04	1,14																																															
1,29	1,03	1,36																																															
1,36	1,60	1,76																																															
$\bar{P} = 1,18\%$																																																	
0,69	0,78	0,97																																															
0,81	1,73	1,07																																															
1,02	2,32	2,01																																															
1,15	2,49	3,79																																															
$\bar{P} = 2,07\%$																																																	
1,08	0,94	1,04																																															
1,46	1,33	1,21																																															
1,53	1,47	1,42																																															
1,92	2,08	2,11																																															
$\bar{P} = 1,47\%$																																																	
2	<table border="1"> <tr><td>0,72</td><td>0,91</td><td>0,91</td></tr> <tr><td>0,90</td><td>0,77</td><td>0,89</td></tr> <tr><td>1,15</td><td>1,04</td><td>1,15</td></tr> <tr><td>1,43</td><td>1,33</td><td>1,46</td></tr> <tr><td colspan="3"><math>\bar{P} = 1,06\%</math></td></tr> </table>	0,72	0,91	0,91	0,90	0,77	0,89	1,15	1,04	1,15	1,43	1,33	1,46	$\bar{P} = 1,06\%$			<table border="1"> <tr><td>0,70</td><td>0,96</td><td>1,39</td></tr> <tr><td>0,80</td><td>1,66</td><td>3,96</td></tr> <tr><td>0,95</td><td>2,15</td><td>1,25</td></tr> <tr><td>1,03</td><td>1,78</td><td>2,89</td></tr> <tr><td colspan="3"><math>\bar{P} = 1,88\%</math></td></tr> </table>	0,70	0,96	1,39	0,80	1,66	3,96	0,95	2,15	1,25	1,03	1,78	2,89	$\bar{P} = 1,88\%$			<table border="1"> <tr><td>1,15</td><td>0,94</td><td>1,40</td></tr> <tr><td>1,34</td><td>1,20</td><td>1,20</td></tr> <tr><td>1,55</td><td>1,25</td><td>1,72</td></tr> <tr><td>2,07</td><td>1,66</td><td>1,72</td></tr> <tr><td colspan="3"><math>\bar{P} = 1,43\%</math></td></tr> </table>	1,15	0,94	1,40	1,34	1,20	1,20	1,55	1,25	1,72	2,07	1,66	1,72	$\bar{P} = 1,43\%$			<p>p = 25 MPa</p> <p>P = 1,47%</p> <p><math>\bar{P} = 1,48\%</math></p>
0,72	0,91	0,91																																															
0,90	0,77	0,89																																															
1,15	1,04	1,15																																															
1,43	1,33	1,46																																															
$\bar{P} = 1,06\%$																																																	
0,70	0,96	1,39																																															
0,80	1,66	3,96																																															
0,95	2,15	1,25																																															
1,03	1,78	2,89																																															
$\bar{P} = 1,88\%$																																																	
1,15	0,94	1,40																																															
1,34	1,20	1,20																																															
1,55	1,25	1,72																																															
2,07	1,66	1,72																																															
$\bar{P} = 1,43\%$																																																	
3	<table border="1"> <tr><td>0,09</td><td>0,12</td><td>0,08</td></tr> <tr><td>0,11</td><td>0,23</td><td>0,18</td></tr> <tr><td>0,23</td><td>0,23</td><td>0,52</td></tr> <tr><td>0,45</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td colspan="3"><math>\bar{P} = 0,21\%</math></td></tr> </table>	0,09	0,12	0,08	0,11	0,23	0,18	0,23	0,23	0,52	0,45	0	0	$\bar{P} = 0,21\%$			<table border="1"> <tr><td>0</td><td>0,17</td><td>0,52</td></tr> <tr><td>0</td><td>0,82</td><td>3,25</td></tr> <tr><td>0,18</td><td>1,30</td><td>3,09</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td colspan="3"><math>\bar{P} = 0,85\%</math></td></tr> </table>	0	0,17	0,52	0	0,82	3,25	0,18	1,30	3,09	0	0	0	$\bar{P} = 0,85\%$			<table border="1"> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0,03</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0,40</td><td>0,03</td><td>0,15</td></tr> <tr><td>0,55</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td colspan="3"><math>\bar{P} = 0,10\%</math></td></tr> </table>	0	0	0	0,03	0	0	0,40	0,03	0,15	0,55	0	0	$\bar{P} = 0,10\%$			<p>p = 100 MPa</p> <p>P = 0,13%</p> <p><math>\bar{P} = 0,38\%</math></p>
0,09	0,12	0,08																																															
0,11	0,23	0,18																																															
0,23	0,23	0,52																																															
0,45	0	0																																															
$\bar{P} = 0,21\%$																																																	
0	0,17	0,52																																															
0	0,82	3,25																																															
0,18	1,30	3,09																																															
0	0	0																																															
$\bar{P} = 0,85\%$																																																	
0	0	0																																															
0,03	0	0																																															
0,40	0,03	0,15																																															
0,55	0	0																																															
$\bar{P} = 0,10\%$																																																	

Rys. 4. Przykład rozkładu porowatości materiału kompozytowego stwierdzonej w odlewach nasączonych przy nominalnej wartości ciśnienia wynoszącej: 12,5, 25 i 100 MPa

Fig. 4. Example of porosity distribution of a composite material found in the casts saturated under the rated pressure values amounting to: 12.5; 25; and 100 MPa

Porowatość każdej z próbek oznaczona była metodą grawimetryczną, a wybrane płaszczyzny próbek poddane zostały obserwacjom i pomiarom metalograficznym [7].

Przykład rozkładu porowatości w trzech badanych odlewach kompozytowych uzyskanych przy zróżnicowanych wartościach nominalnego ciśnienia nasycania przedstawiono na rysunku 4.

Porowatość całkowita oraz jej rozkład w odlewach kompozytowych uzyskanych przy wartościach ciśnienia nominalnego 12,5 oraz 25 MPa nie różnią się znacząco. Są wyraźnie różne w porównaniu do stwierdzonych w odlewach uzyskiwanych przy wyższych wartościach ciśnienia (100 MPa). Pomiar dowodzą, że strefy izolowane występują w każdym z badanych odlewów mimo prostego ich kształtu i znacznie zróżnicowanych wartości nominalnego ciśnienia nasycania.

Wykonane analizy i wyniki przeprowadzonych doświadczeń pozwoliły na opracowanie modelu kształtowania się porowatości w odlewach kompozytowych wytwarzanych przez nasycanie zbrojenia metalem [9], a komputerowy program prognozowania porowatości w odlewach [10] pozwala na usprawnienie procesów projektowania i korygowania technologii tych odlewów.

## WNIOSKI

1. Okolicznością decydującą o poziomie porowatości w strukturze odlewów kompozytowych wytwarzanych przez nasycanie zbrojenia ciekłą osnową metalową jest współzależny efekt dwóch kolejno po sobie następujących zjawisk: tworzenia się okluzji gazowych w nasycanym zbrojeniu odlewu kompozytowego oraz ubytek objętości stygnącej i krzepnącej metalowej osnowy kompozytowej.
2. Uzyskanie odlewu kompozytowego (nasycanego) pozbawionego porowatości jest niemożliwe, przy czym o niskiej porowatości odlewu bardziej decydują warunki cieplne jego powstawania niż stosowane ciśnienie.
3. Obecność stref izolowanych w odlewach próbnych dowodzi, że stosowanie nawet wysokich wartości ciśnienia nasycania zbrojenia nie gwarantuje uzyskania

- kompozytu o niskiej porowatości. Niską porowatość kompozytu zapewniają działania pozwalające na utrzymanie dostatecznie wysokich wartości ciśnienia nasycania w całej objętości odlewu do czasu całkowitego zakrzepnięcia metalowej osnowy nasycającej.
4. Znajomość mechanizmów tworzenia się porowatości oraz właściwości komponentów i warunków ich łączenia mogą pozwolić na prognozowanie porowatości struktury odlewu kompozytowego.

## LITERATURA

- [1] Gawdzińska K., Jackowski J., Szweycer M., Odmiany porowatości odlewów z metalowych kompozytów nasycanych, *Kompozyty (Composites)* 2001, 1, 1, 68-71.
- [2] Jackowski J., Grabian J., Porosity of metal infiltrated composites - an attempt of the problem analysis, *Science and Engineering of Composite Materials* 2000, 9, 1, 17-24.
- [3] Szweycer M., Gawdzińska K., Jackowski J., Analiza warunków tworzenia się porowatości gazowej w metalowych kompozytach nasycanych, *Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji* 2001, 21, nr specjalny, 171-176.
- [4] Szweycer M., *Zjawiska powierzchniowe w procesach odlewniczych*, Wyd. Instytutu Odlewnictwa, Kraków 1996.
- [5] Grabian J., Nasycanie zbrojenia z ceramicznych włókien nieuporządkowanych podczas wytwarzania odlewów z kompozytów metalowych, Wyd. WSM, Szczecin 2001.
- [6] Jackowski J., Próby wytwarzania nasycanych odlewów kompozytowych z wykorzystaniem maszyny ciśnieniowej, *Kompozyty (Composites)* 2003, 3, 6, 106-109.
- [7] Jackowski J., Porowatość odlewów kompozytowych wytwarzanych przez nasycanie zbrojenia metalem, seria *Rozprawy nr 380*, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2004.
- [8] Jackowski J., Okluzje gazowe w odlewanych kompozytach nasycanych, *Kompozyty (Composites)* 2002, 2, 4, 80-84.
- [9] Jackowski J., Schmeidel E., Model kształtowania się porowatości w nasycanych odlewach kompozytowych, *Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji* 2003, 23, 1, 71-83.
- [10] Jackowski J., Schmeidel E., Schmeidel G., Komputerowy program prognozowania porowatości w metalowych odlewach kompozytowych z nasycaniem zbrojeniem, *Archiwum Odlewnictwa* 2004, 11, 1, 200-208.

Recenzent  
Józef Śleżiona