

Katarzyna Gawdzińska¹

Wyższa Szkoła Morska, Instytut Nauk Podstawowych Technicznych, ul. Podgórna 51/53, 70-205 Szczecin

Jacek Jackowski², Michał Szweycer³

Politechnika Poznańska, Instytut Technologii Materiałów, ul. Piotrowo 5, 61-138 Poznań

ODMIANY POROWATOŚCI ODLEWÓW Z METALOWYCH KOMPOZYTÓW NASYCANYCH

Przedstawiono krótką analizę przyczyn powstawania wad porowatości w strukturze odlewów kompozytowych uzyskiwanych przez nasycanie zbrojeń ciekłą osnową metalową. Ilustracje prezentują opisane wady, a tabela, w której zestawiono cechy charakterystyczne tych wad w połączeniu z przyczynami ich powstawania, może stanowić pomoc dla ich identyfikacji oraz opracowywania technologii nasycanych odlewów kompozytowych o najwyższej jakości.

POROSITY VARIATIONS OF CASTINGS MADE OF SATURATED METAL COMPOSITES

Compactness of structure is a required feature for most of construction materials, inclusive of saturated composite castings. Structural defects of these materials frequently result from the method of their manufacture, i.e. joining two different components: a solid, usually ceramic reinforcement, and a liquid metal matrix. Analysis of porosity defects of structures of the saturated composites [1] has shown that basic reasons of their occurrence are: insufficient filling of reinforcement capillaries with liquid matrix, formation of gaseous occlusions within the composite, liberation of the gas dissolved in the matrix, and shrinkage phenomena accompanying cooling and changing the state of aggregation of the matrix. A short characteristics of the reasons mentioned above and presentation of consequences in the shape of various forms of the castings made of saturated metal composites are presented by the Authors on the ground of results of research performed by the team, composed among others of [1-4, 8], and review of literature [5, 6] related to manufacture and research of structure and properties of the castings made of saturated metal composites. The pictures in Fig. 1 show the porosity forms arising in result of insufficient filling of inter-fibre capillaries of the composite matrix, formed of thin ceramic fibres, due to too low pressure. The form of the defect shown in the picture in Fig. 2 proves that its arose due to premature solidification of saturating matrix. The pictures in Fig. 3 show the fractures of two samples of the same saturated composite, made under different pressures. They prove that too low pressure (30 MPa - Fig. 3b) does not guarantee such a structure to be free of porosity that is shown in Fig. 3a. Formation of gas occlusions in a reinforcement element under saturation is very probable. Their dimensions may be very differentiated: from macroscopic (Fig. 4) to microscopic ones (Fig. 5). However, using e.g. directional solidification of the matrix one may force their occurrence beyond the composite element (casting), as for example in a pressure head (Fig. 4). Similar procedure may be used for the most advantageous location of contraction cavities, when another ways, e.g. pressure feeding, are unfeasible. If the cooling and solidification process of the metal matrix is not accompanied by effective feeding, the shrinkage porosity of the composite casting becomes unavailable. In shrinkage pores of a composite (aluminosilicate reinforcement - Al-Si11 alloy) crystals of solid phase from the matrix have been found, that is a proof of the presence of liquid matrix metal in the reinforcement capillaries and its withdrawal in result of the shrinkage. Specification of characteristic features of the defects of castings made of saturated metal composites is shown in Table 1 that may be helpful e.g. for developing a computer expert program related to defects of these materials.

PRZYCZYNY POWSTAWANIA POROWATOŚCI ODLEWÓW Z METALOWYCH KOMPOZYTÓW NASYCANYCH

Porowatość materiałów kompozytowych uzyskiwanych drogą nasycania zbrojenia ciekłą osnową metalową może być spowodowana [1]:

- niedostatecznym nasyceniem przestrzeni kapilarnych zbrojenia ciekłym metalem osnowy,
- obecnością okluzji gazowych w objętości nasycanego zbrojenia,
- wydzielaniem się gazów rozpuszczonych w ciekłej osnowie nasycającej w trakcie stygnięcia i krzepnięcia tejże osnowy,

- brakiem efektywnego zasilania stygnącej i krzepnącej osnowy.

Analiza wymienionych czynników i zjawisk wykazała, że w przypadku kompozytów złożonych z ceramicznego zbrojenia (glinokrzemianowego) oraz osnowy, będącej stopem aluminium, całkowita porowatość elementu kompozytowego może sięgać wartości 8% [1], co uznać należy za wartość znaczną. Analiza [2] wykazała, że najmniej prawdopodobnym powodem występowania porowatości w metalowych kompozytach nasycanych

¹ mgr inż., ² dr inż., ³ prof. dr hab. inż.

osnową aluminiową jest wydzielanie się gazu (wodoru) ze stygnącej i krzepnącej osnowy. Pozostałe z wymienionych czynników stanowią najczęściej przyczynę porowatości elementów kompozytowych.

Elementy stanowiące zbrojenie nasycanych odlewów kompozytowych mogą posiadać bardzo zróżnicowaną budowę. Jednocześnie, wspólną cechą zdecydowanej większości stosowanych zbrojeń jest zła zwilżalność przez nasycającą osnowę. Fakt ten nie tylko wyklucza możliwość samoczynnego przebiegu procesu nasycania, ale sprawia, że do jego realizacji konieczne jest ciśnienie wymuszające proces.

Analiza ciśnień kapilarnych w stożkowych lub dwuciennych kapilarach o bardzo małym kącie wierzchołkowym [3] wykazuje, że do całkowitego ich wypełnienia konieczne jest bardzo wysokie (dążące do nieskończoności) ciśnienie zewnętrzne. Doświadczenia wykonane z użyciem glinokrzemianowego zbrojenia oraz siluminu eutektycznego [4] dowiodły, że dla skutecznego nasycania zbrojenia (w warunkach stałej i równej temperatury - zbrojenia, ciekłej osnowy oraz przyrzędu, w którym odbywa się proces) wystarcza ciśnienie nieprzekraczające wartości 30 MPa. Badania właściwości mechanicznych podobnych kompozytów nasycanych [5] dowodzą korzystnego wpływu wyższych ciśnień, co należy wiązać między innymi z niższą mikroporowatością, a tym samym pełniejszym nasyceniem kapilar.

Objętość gazów zamkniętych w kapilarach zbrojenia zależy w pierwszej kolejności od sposobu nasycania elementu zbrojącego. Obliczenia wykazują, że objętość okluzji gazowych w elementach kompozytowych (glinokrzemianowe zbrojenie z krótkich włókien - stop aluminium) może osiągać wartość ok. 1%. Udział ten mogą zwiększyć niekorzystne okoliczności związane np. z anomaliami struktury geometrycznej zbrojeń [6], a zmniejszać - wysokie ciśnienie nasycania, powodujące kompresję uwięzionego gazu, ale pod warunkiem, że działać będzie do chwili całkowitego zakrzepnięcia nasycającej osnowy, co nie zawsze jest realne.

Stygnięciu i krzepnięciu metalowej osnowy kompozytów nasycanych towarzyszą te same zjawiska skurczowe, jakie występują w tradycyjnych sposobach odlewania metali i stopów. Zasilanie odlewów kompozytowych (nasycanych) jest zatem oczywistą koniecznością. Skuteczność zasilania odlewów kompozytowych nasycanych ułatwia fakt stosowania ciśnienia w procesie technologicznym, natomiast mogą utrudniać wszystkie czynniki ograniczające lub uniemożliwiające kierunkowe krzepnięcie osnowy, takie jak:

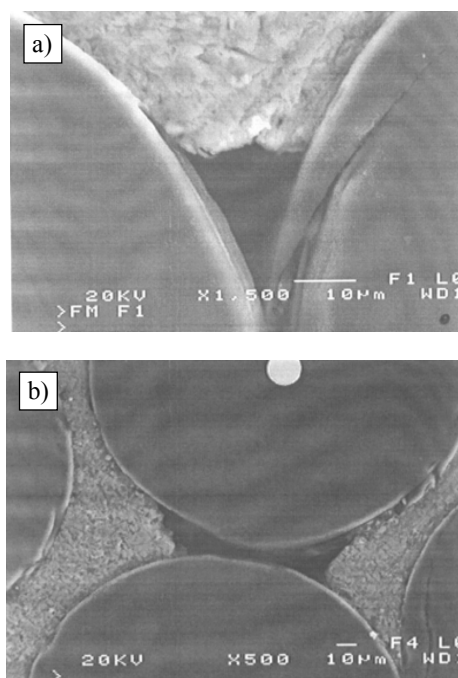
- nietechnologiczna konstrukcja odlewu kompozytowego, uniemożliwiająca jego zasilanie w całości lub poszczególnych fragmentów,
- nietechnologiczna konstrukcja formy (matrycy), w której jest realizowany proces nasycania, wykluczająca lub ograniczająca możliwość kierunkowego krzepnięcia metalu osnowy,

- niewłaściwe parametry termiczno-czasowe procesu nasycania zbrojenia.

Techniczne stopy aluminium, będące najczęściej osnową nasycanych odlewów kompozytowych, posiadają znaczny skurcz zasilania oraz w większości (stopy podeutektyczne) zdecydowanie niekorzystny przebieg krzepnięcia [7], wobec czego możliwość powstawania wad skurczowych w strukturach tych tworzyw jest znaczna, a postać ich występowania może być bardzo zróżnicowana.

PRZEGLĄD ODMIAN POROWATOŚCI STRUKTURY W NASYCANACH ODLEWACH KOMPOZYTOWYCH

Na rysunku 1 przedstawione są struktury kompozytu złożonego z grubych ($\phi 170 \mu\text{m}$) włókien borowych z wolframowym rdzeniem oraz siluminowej osnowy. Widoczne są pojedyncze, niewypełnione osnową przestrzenie międzywłóknowe, a rysunek 1b sugeruje, że połączenie komponentów nie jest najwyższej jakości.



Rys. 1. Przykłady niewypełnionych kapilar międzywłóknowych (włókna borowe z wolframowym rdzeniem) o średnicy ok. $170 \mu\text{m}$

Fig. 1. Examples of unfilled inter-fibre capillaries (boron fibres with tungsten core) of the diameter about $170 \mu\text{m}$

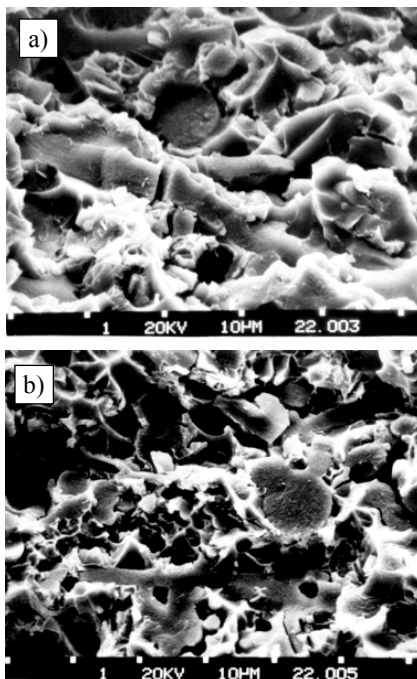
Niewypełnienie kapilar zbrojenia kompozytowego może być także skutkiem krzepnięcia ciekłej osnowy przed całkowitym wypełnieniem kapilar. Przypadek taki przedstawiony jest na rysunku 2 [6]. Wobec wykonanych bilansów cieplnych, zweryfikowanych doświadczalnie [8], przypadek ten należy uznać za mało prawdopodobny.

Rysunek 3 przedstawia struktury przełomów dwóch próbek kompozytowych (nasyconych) złożonych z krótkich włókien SAFFIL oraz osnowy siluminowej [5]. Próbkę były nasycone przy różnych wartościach ciśnienia zewnętrznego, a obecność mikroporów w strukturze przedstawionej na rysunku 3b świadczy, zdaniem autorów, że zastosowane ciśnienie nasycania - 30 MPa jest zbyt niskie, aby uzyskać prawidłowe połączenie, takie jakie widnieje na rysunku 3a.



Rys. 2. Przykład porowatości odlewów kompozytowych nasyconych, spowodowanej zbyt wczesnym zakrzepnięciem osnowy nasycającej [6]

Fig. 2. Example of porosity of saturated composite castings caused by premature solidification of saturating matrix [6]

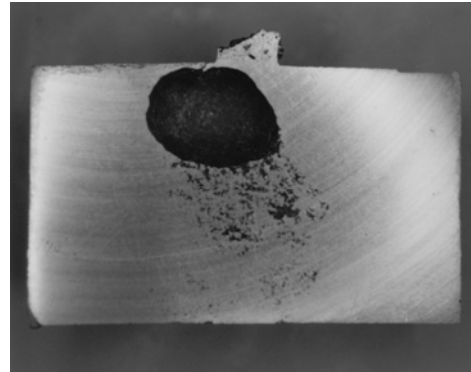


Rys. 3. Przykłady przełomów próbek odlewów kompozytu nasyconego o zwartej i porowatej mikrostrukturze spowodowanej zróżnicowanym ciśnieniem nasycania [5]

Fig. 3. Fractures examples of samples of saturated composite castings having compact and porous microstructure caused by differentiation of saturation pressure [5]

Makroskopową wadę porowatości osnowy metalowej w postaci dużego pęcherza oraz rzadziny skurczowej przedstawiono na rysunku 4. Pęcherz jest efektem okluzji gazowej zamkniętej w nasycanym zbrojeniu. Kierunkowe krzepnięcie osnowy, jakie zapewniono wytwarza-

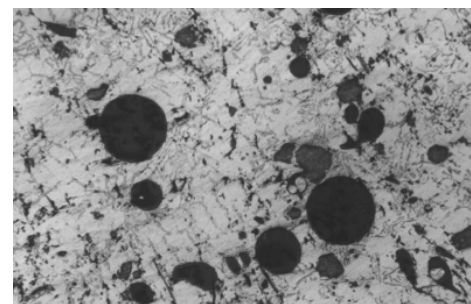
nym próbkom kompozytowym (SIBRAL - stop AK11), spowodowało, że zarówno okluzje, jak i rzadziny skurczowe zostały przemieszczone przez postępujący front krzepnięcia do nadlewów próbek [1].



Rys. 4. Makroskopowa porowatość osnowy nasycającej (duża okluzja gazowa i jama skurczowa) zlokalizowana w nadlewie nasyconych próbek kompozytowych krzepnących kierunkowo

Fig. 4. Macroscopic porosity of saturating matrix (big gas occlusion and contraction cavity) taking place in head of saturated composite samples solidifying directionally

Regularne, sferyczne okluzje gazowe stwierdzone w materiale osnowy próbki kompozytu nasyconego (SIBRAL - stop AK11) są przedstawione na rysunku 5.

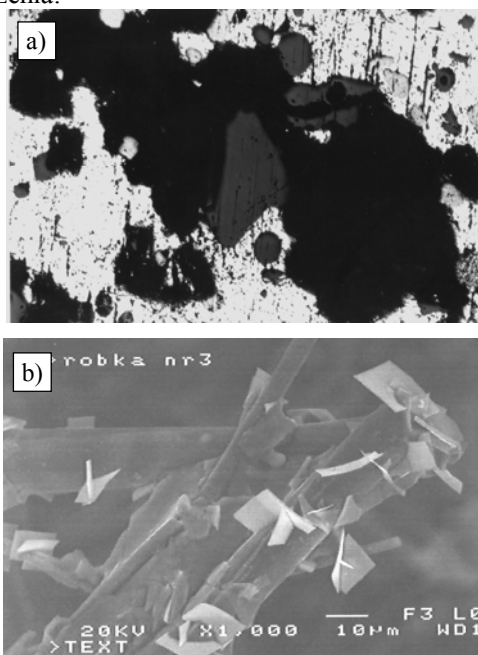


Rys. 5. Przykład drobnych okluzji gazowych w próbce nasyconego odlewu kompozytowego

Fig. 5. Example of small gas occlusions in sample of saturated composite castings

Przykład znacznie mniejszej od przedstawionej na rysunku 4 nieciągłości struktury spowodowanej skurczem osnowy kompozytowej, znaleziony w strukturze odlewu kompozytowego (nasyconego), zaprezentowano na rysunku 6a. Na rysunku 6b przedstawione jest wnętrze mikropory skurczowej stwierdzone w próbce kompozytowej uzyskanej z nasycania tworzywa glinokrzemianowego SIBRAL stopem AK11, która dowodzi wcześniejszej obecności ciekłego metalu osnowy w istniejącej pustce. Na włóknach zbrojenia widoczne są kryształy fazy nieobecnej w zbrojeniu niemających kontaktu z ciekłą osnową. Są to najprawdopodobniej kryształy krzemu, które zdążyły wykrystalizować na fazie zbrojącej przed „cofnieniem się” stygnącego i krzepnącego metalu osnowy i powstaniem przedsta-

wionej mikropory skurczowej. Przypuszczenie to, choć bardzo prawdopodobne, wymaga laboratoryjnego potwierdzenia.



Rys. 6. Przykłady porów skurczowych w strukturze odlewu kompozytu nasyconego (SIBRAL-AISi11): a) 1,9x0,7 mm (pow.75x), b) z widocznymi kryształami wydzielen (krzemu?) na włóknach zbrojenia (pow. 1500x)

Fig. 6. Examples of contraction pores in the structure of saturated composite casting (SIBRAL-AISi11): a) 1.9x0.7 mm (magn. 75x), and b) with visible (silicon?) crystals precipitated on reinforcement fibres (magn. 1500x)

TABELA 1. Charakterystyka wad porowatości w odlewach z metalowych kompozytów nasyconych
TABLE 1. Characteristics of porosity defects in the castings made of saturated metal composites

Typ porowatości	Czynniki identyfikujące				
	Położenie		Kształt	Wielkość	Częstotliwość występowania
	w odlewie	względem elementów zbrojenia			
1. Nienasylenie	Niezależnie od geometrii odlewu	W miejscach najmniejszych odległości między elementami zbrojenia	Wynikający ze struktury zbrojenia	Wynikająca z wymiarów elementów zbrojenia	Występuje powtarzalnie
2. Pory gazowe -zaokcludowane	Przypadkowe	Niezależne	Regularny sferoidalny	Zróżnicowana	Występuje przypadkowo
3. Pory gazowe - wydzielone	W osi odlewu lub węzłach cieplnych	W miejscach sprzyjających zarodkowaniu, na zbrojeniu	Wynikający ze struktury zbrojenia	Porównywalna z wymiarami elementów zbrojenia	Występuje powtarzalnie.
4. Porowatość skurczowa	W osi odlewu lub węzłach cieplnych	Niezależnie (na zbrojeniu ślady obecności metalu)	Nieregularny	Zróżnicowana	Występuje przypadkowo

PODSUMOWANIE

Na podstawie przedstawionych wyżej rozważań na temat typów porowatości odlewów z metalowych kompozytów nasyconych dokonano podziału ich cech charakterystycznych. Zestawiono je w tabeli 1.

Ponieważ każda z odmian porowatości różni się od pozostałych cechami identyfikującymi, dokładne określenie tych ostatnich jednoznacznie wskazuje odmianę porowatości. Zatem, po opisanu przyczyn powstawania wymienionych odmian porowatości i sposobów przeciwdziałania ich występowaniu, przedstawiona tabela może być jedną z podstaw komputerowego programu eksperckiego dotyczącego wad odlewów z metalowych kompozytów nasyconych.

LITERATURA

- [1] Jackowski J., Grabian J., Porosity of metal infiltrated composites - an attempt of the problem analysis, Metal Matrix Composites and Metallic Foams. Euromat 99, Vol. 5, Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim 2000, 133-139.
- [2] Szweycer M., Obliczenia własne, niepublikowane.
- [3] Grabian J., Jackowski J., Szweycer M., Effect of pressure on composite density during reinforcement infiltration and solidification of metal matrix, Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji 1997, 17, 1, 65-74.
- [4] Grabian J., Jackowski J., Szweycer M., Infiltration of AK11 alloy into composite reinforcement of aluminosilicate fibre, Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji 1999, 18, 1, 31-37.
- [5] Naplocha K., Samsonowicz Z., Wpływ parametrów procesu wytwarzania na strukturę i wybrane właściwości mechaniczne materiałów kompozytowych typu AK9 - włókna SAFFIL, Mat. IV Konf. nt. Zjawiska powierzchniowe w procesach odlewniczych, Poznań-Kołobrzeg 1998, 167-174.
- [6] Zhang Z., Long S., Flower H.M., Light alloy composite production by liquid metal infiltration, Composites 1994, 25, 5, 380-392.
- [7] Paterson W., Engler S., Einfluss des Erstarrungsablaufs auf das Speisungsvermögen von Gusslegierungen, Giesserei 1961, 48, Jahrgang, 21.
- [8] Grabian J., Jackowski J., Dobór warunków technologicznych wytwarzania w formie z regulowaną atmosferą odlewów zbrojonych porowatym tworzywem z wykorzystaniem czynników intensyfikujących proces, Sprawozdanie z realizacji projektu badawczego KBN nr 7T08B 027 13, Szczecin 2000 (niepublikowane).

Recenzent
Józef Gawroński