

ZJAWISKO SEDYMENTACJI W TECHNOLOGII KOMPOZYTÓW ZAWIESINOWYCH

Jacek JACKOWSKI, Dorota NAGOLSKA, Michał SZWEYCER
Politechnika Poznańska, Instytut Technologii Materiałów
61-138 Poznań ul. Piotrowo 3

1. Wstęp

Zawiesiny stosowane w technologii metalowych kompozytów odlewanych posiadają cechy typowe dla tych układów i podlegają ogólnym prawom kształującym ich zachowanie. Jednym z podstawowych zjawisk fizycznych występujących w zawiesinach jest ich sedymentacja. W przypadku zawiesin przeznaczonych na metalowe odlewy kompozytowe, zjawisko to jest istotne z dwóch powodów, zlokalizowanych na początku oraz na końcu standardowego cyklu obiegu tworzyw odlewniczych: przygotowania do odlewania i odlewania oraz recyklingu [4,5].

Rozpatrując proces przygotowania zawiesin kompozytowych do odlewania i wypełniania nimi form odlewniczych (np. kokil), sedymentację należy uznać za niepożądaną. Rozpatrując natomiast proces recyklingu złomu kompozytowego, ocena zachowania się zawiesin jest bardziej złożona. Jeśli celem działania jest przetop złomu i powtórne napełnienie formy zawiesiną – sedymentacja jest czynnikiem komplikującym proces. Jeśli celem przetopu złomu jest odzysk metalu osnowy – zjawisko sedymentacji może być tym pożyteczniejsze im szybciej ono zachodzi.

Celem niniejszego tekstu jest przedstawienie wyników analizy zachowania się cząstek fazy zbrojącej w osnowie stopów aluminium, oraz wyników badań laboratoryjnych, mogących być przydatnymi w praktyce technologii kompozytów zawiesinowych.

2. Rozważania teoretyczne

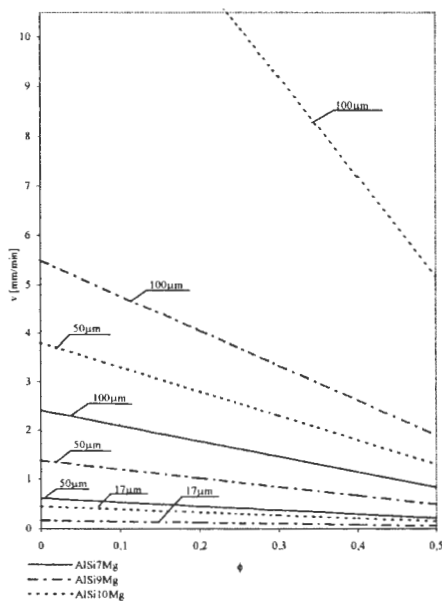
Prędkość opadania pojedynczej, kulistej cząstki w cieczy, wynika z zależności Stokes'a. Niekulistość kształtów (izometryczność) cząstek fazy stałej jest przyczyną występowania oporów hydraulicznych, które zmniejszają prędkość opadających cząstek a duża ich koncentracja w zawiesinie i wynikające z niej zderzenia, także spowalniają ich opadanie [1,2]. Rosnąca, w miarę postępującej sedymentacji, koncentracja fazy stałej w zawiesinie zmienia (zwiększa) jej lepkość co oznacza, że prędkość opadania cząstek jest zmienna – zmniejsza się w miarę spadku wysokości słupa sedymentu.

Do wykonania obliczeń przyjęto układy trzech stopów aluminium (AlSi10Mg, AlSi9Mg, AlSi7Mg) z cząstkami SiC o zróżnicowanej ziarnistości (17; 50 i 100 μ m), przy czym o wyborze najmniejszej z nich, zdecydował fakt, iż materiał kompozytowy przeznaczony do badań weryfikacyjnych, zbrojony był cząstkami o tej właśnie średniej wielkości.

Prędkość opadania cząstki stałej w cieczy będącej osnową zawiesiny, obliczono ze wzoru Stokes'a:

$$v = \frac{g \cdot d^2 \cdot \Delta\rho}{18 \cdot \eta_0} \quad (1)$$

w którym: g – przyspieszenie ziemskie;
 d – średnica cząstki;
 $\Delta\rho$ - różnica gęstości faz tworzących zawiesinę;
 η_0 – lepkość dynamiczna fazy ciekłej (osnowy).



Rys.1. Prędkości opadania cząstek SiC (17 μ m, 50 μ m, 100 μ m) w stopach aluminium i zawiesinach o różnej koncentracji SiC

Fig.1. Settling velocities of SiC particles (17 μ m, 50 μ m, 100 μ m) in aluminum alloys and in suspensions of different concentrations of SiC

Do obliczeń prędkości opadania cząstek w zawiesinach o zróżnicowanej koncentracji fazy stałej, wykorzystano zależność Eilers'a [3], zalecaną dla koncentracji fazy stałej w cieczy nie przekraczającej wartości 50% ($\phi=0,5$). Uwzględnia ona lepkość dynamiczną zawiesiny η_z , której wartość wynosi:

$$\eta_z = \eta_0 \left[1 + \frac{2,5 \cdot \phi}{2(1 - 1,35 \cdot \phi)} \right] \quad (2)$$

gdzie: ϕ - koncentracja fazy stałej w zawiesinie.

Zależność, określająca prędkość opadania cząstek w zawiesinach o zróżnicowanej koncentracji fazy stałej, przyjmie postać:

$$v = \frac{g \cdot d^2 \cdot \Delta\rho}{18 \cdot \eta_0 \left[1 + \frac{2,5 \cdot \phi}{2(1 - 1,35 \cdot \phi)} \right]} \quad (3)$$

Lepkość dynamiczna stopów będących osnową zawiesin przeliczono z wartości lepkości kinematycznej tych stopów, zaczerpniętych z bazy danych MAGMA. Wyliczone prędkości ruchu (opadania) cząstek SiC o zróżnicowanej średnicy w czystych stopach osnowy i zawiesinach o różnej koncentracji zbrojenia, zestawiono w tablicy I oraz przedstawiono graficznie na wykresach rysunku 1.

Tablica I

Prędkości opadania cząstek SiC o różnej ziarnistości w stopach aluminium i zawiesinach o zróżnicowanej koncentracji fazy stałej [mm/min]

Table I

Settling velocities of SiC particles of various granularities in aluminum alloys and in suspensions of different concentrations of solid phase [mm/min]

Stop osnowy	Koncentracja fazy stałej [%]	Lepkość osnowy* lub zawiesiny** $\cdot 10^{-3}$ [kg/m·s]	Wielkość ziarna fazy stałej		
			17 μ m	50 μ m	100 μ m
AlSi10Mg	0	17,20	0,44	3,80	15,20
	20	23,05	0,33	2,80	11,20
	30	32,55	0,27	2,30	9,20
	40	35,95	0,21	1,80	7,20
	50	50,22	0,15	1,30	5,20
AlSi9Mg	0	47,50	0,16	1,37	5,50
	20	63,65	0,12	1,02	4,06
	30	89,89	0,10	0,84	3,34
	40	99,27	0,075	0,67	2,61
	50	138,70	0,054	0,49	1,90
AlSi7Mg	0	108,00	0,07	0,61	2,40
	20	144,72	0,052	0,45	1,77
	30	204,39	0,042	0,37	1,46
	40	225,72	0,033	0,29	1,14
	50	315,36	0,024	0,21	0,83

* - wg danych MAGMA

** - wyliczonej z zależności Eilers'a

Wyliczone i przedstawione na rys.1 prędkości, opisane są zależnościami [w mm/min]:

– dla osnowy AlSi10Mg

$$v_{17} = -0,58\phi + 0,44 \quad (4a)$$

$$v_{50} = -5,0\phi + 3,8 \quad (4b)$$

$$v_{100} = -20\phi + 15,2 \quad (4c)$$

– dla osnowy AlSi9Mg

$$v_{17} = -0,212\phi + 0,16 \quad (5a)$$

$$v_{50} = -1,76\phi + 1,37 \quad (5b)$$

$$v_{100} = -7,2\phi + 5,5 \quad (5c)$$

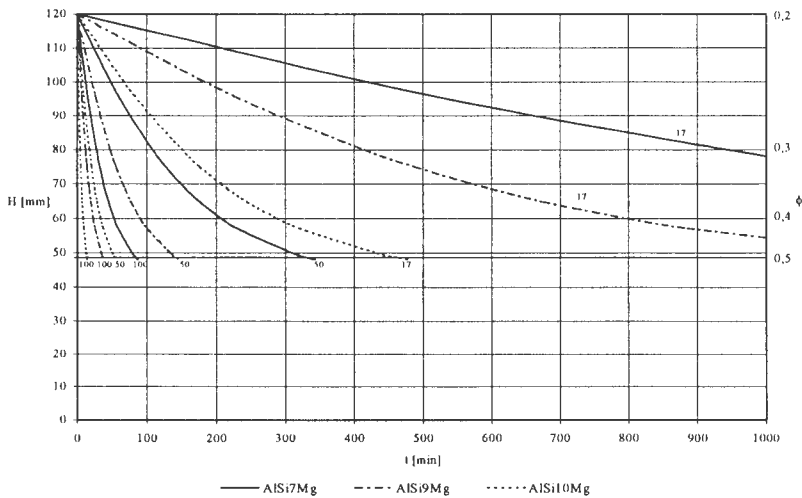
– dla osnowy AlSi7Mg

$$v_{17} = -0,092\phi + 0,07 \quad (6a)$$

$$v_{50} = -0,80\phi + 0,61 \quad (6b)$$

$$v_{100} = -3,14\phi + 2,40 \quad (6c)$$

przy czym indeksy (17;50 i 100) oznaczają ziarnistość sedimentujących cząstek SiC.



Rys. 2. Zmiany wysokości sedimentu i koncentracji w nim fazy zbrojącej, wyliczone dla zawiesin złożonych ze stopów aluminium i SiC o zróżnicowanej ziarnistości, dla przedziału czasu $0 \div 1000$ min, początkowej wysokości słupa $H_0=120$ mm oraz początkowej koncentracji fazy zbrojącej $\phi_0=0,2$ (20%)

Fig. 2. Changes in settling level and its reinforcing phase concentration calculated for the suspensions composed of aluminum alloys and SiC of various granularities for time range $0 \div 1000$ min, initial height of column $H_0=120$ mm and initial reinforcing phase concentration $\phi_0=0,2$ (20%)

Cechą zawiesin o jednorodnej ziarnistości fazy stałej jest wyraźna granica sedimentu. Znając, zależną od koncentracji fazy zbrojącej w zawiesinie, prędkość opadania cząstek, możliwym było obliczyć zmiany w czasie wysokości sedimentu tworzącego się w słupach zawiesiny o początkowej koncentracji ϕ_0 i założonej wysokości początkowej H_0 . Zakładając, że w słupie zawiesiny o jednostkowym

przekroju poprzecznym i wysokości początkowej H_0 , oraz początkowej koncentracji fazy zbrojącej ϕ_0 , po upływie czasu t , wytworzy się sedyment o wysokości H i koncentracji (fazy zbrojącej) ϕ - można przyjąć, że średnia prędkość opadania cząstek w zawieszynie wynosi:

$$v = \frac{H_0}{t} \left(1 - \frac{\phi_0}{\phi} \right) \quad (7)$$

Porównując zależność (7) z zależnościami (4), (5) i (6), można wyliczyć czas jaki jest konieczny aby z zawiesziny o dowolnej wysokości (początkowej) słupa H_0 i koncentracji początkowej ϕ_0 , wytworzył się sedyment o zadanej koncentracji ϕ i odpowiadającej jej wysokości słupa sedymentu H . Rezultaty przeprowadzonych obliczeń, dla rozpatrywanych układów, przedstawione są na wykresach rysunku 2.

3. Badania weryfikacyjne

Do wykonania badań użyty został materiał kompozytowy (gąska) oznaczony cechą F3S.20S., wyprodukowany przez firmę ALCAN [4]. Skład chemiczny stopu osnowy przedstawiono w tabelicy II, a fazę zbrojącą stanowił SiC o średniej wielkości ziarna (sprawdzonej na zgładzie metalograficznym) $17\mu\text{m}$ i udziale objętościowym 21,6 %. Strukturę gąski kompozytowej przedstawia fotografia rysunku 3.

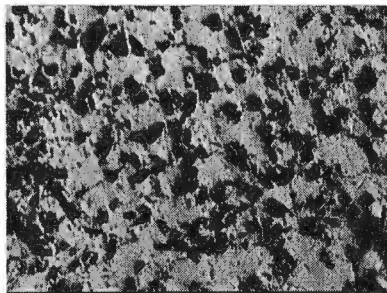
Tablica II

Skład chemiczny osnowy kompozytu F3S.20S.

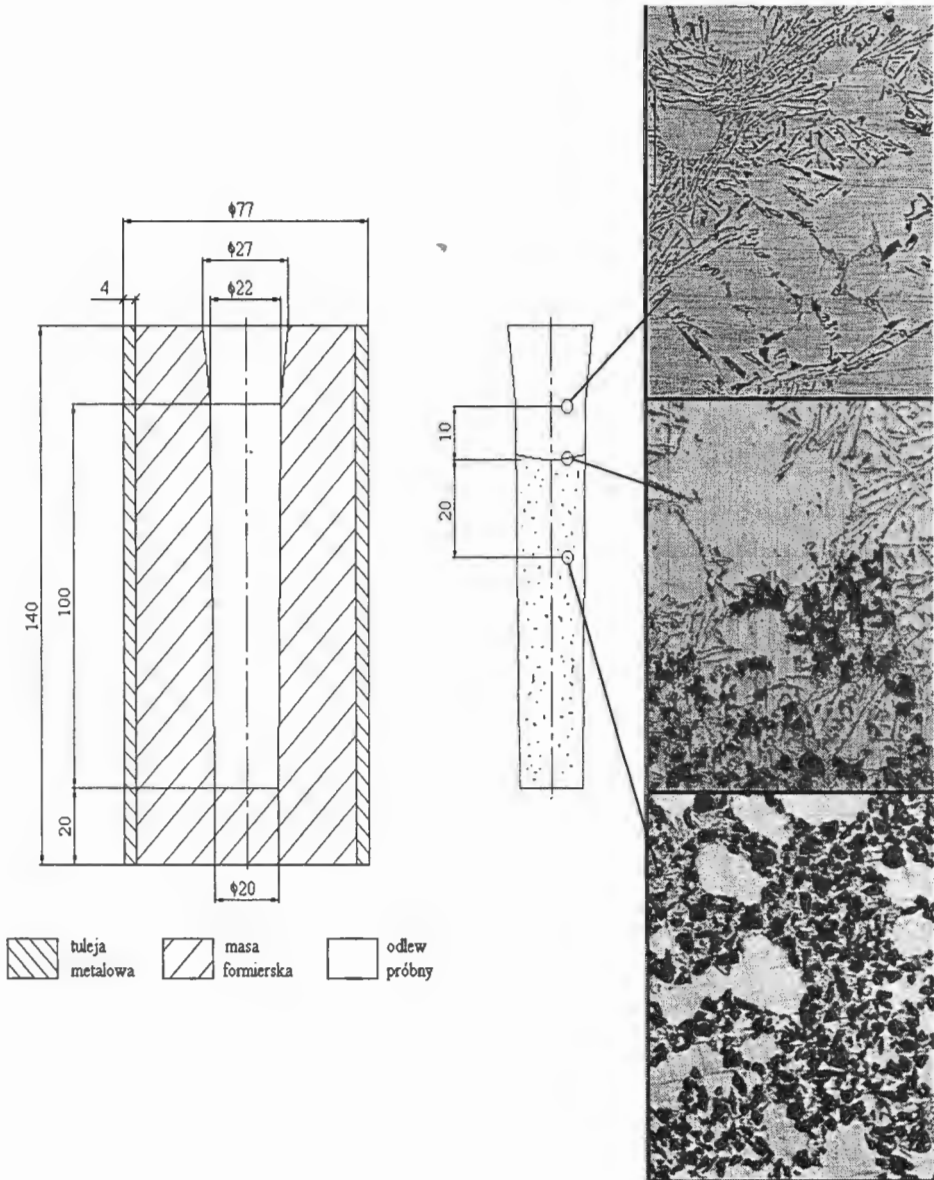
Table II

Chemical composition of composite matrix F3S.20S.

Si	Mg	Cu	Mn	Zn	Ti	Fe	Al
9,2%	0,6%	0,01%	0,00%	0,02%	0,11%	0,14%	reszta

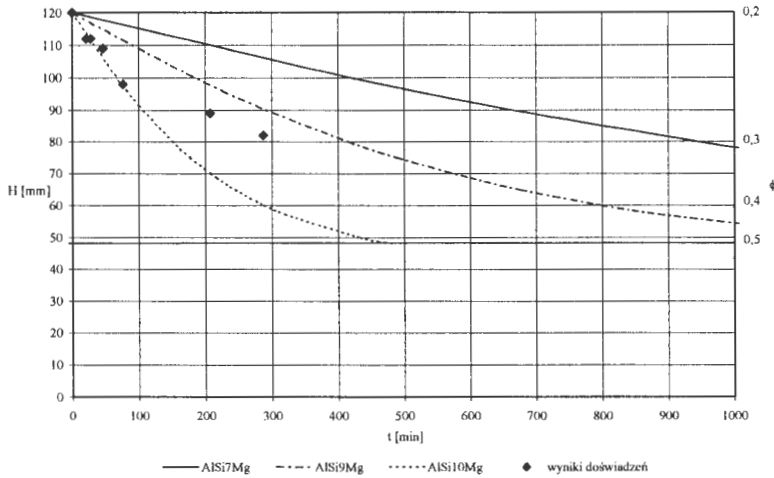


Rys. 3. Fotografia mikrostruktury gąski kompozytowej F3S.20S. (pow. 100x)
Fig. 3 Picture of microstructure of composite pig sow F3S.20S (magn. 100x).



Rys. 4. Szkic form użytych do badań weryfikacyjnych, uzyskanych wlewków z zaznaczonymi miejscami oceny ich struktury oraz stwierdzone struktury (pow. 100x)
 Fig. 4. A draft of forms used for verification examinations of obtained ingots with marked places of appraisal of their structure, with the structures found (magn. 100x).

Próby weryfikacyjne polegały na stopieniu materiału kompozytowego i wypełnieniu nim form przedstawionych na rysunku 4, wygrzewanych do temperatury 750°C. Zalane formy przetrzymywane były w komorze pieca muflowego w tej samej temperaturze (750°C) przez zróżnicowane okresy czasu. Wyjmowane kolejno z pieca, formy były studzone a uzyskane odlewy przecinane wzdłużnie. Obserwacjom i pomiarom poddane były zglądy metalograficzne przekrojów. Wszystkie obserwowane przekroje posiadały wyraźnie widoczną granicę sedymentu. Struktury stwierdzone na przekrojach próbek przedstawione są na rysunku 4 a wyniki pomiarów przedstawione zostały na wykresie rysunku 5, sporządzonym w takich samych współrzędnych jak na rys.2.



Rys. 5. Zmiany wysokości sedymentu w próbkach kompozytu F3S.20S, stwierdzone w wyniku przeprowadzonych doświadczeń na tle fragmentu zależności z rys. 2

Fig. 5. Changes in settling level in the samples of F3S.20S composite found in the experiments on the background of the dependence illustrated in Fig. 2.

4. Omówienie wyników

Wyniki przedstawionych obliczeń wskazują na bardzo silną a w praktyce niezmiernie istotną zależność trwałości zawiesin kompozytowych od wielkości cząstek zbrojących (rys. 2). Widoczna tendencja do zbrojenia zawiesinowych materiałów kompozytowych na podstawie stopów aluminium, cząstkami o coraz mniejszej ziarnistości, posiada zatem ważkie uzasadnienie.

Drugim ważnym, lecz mniej istotnym czynnikiem, decydującym o trwałości zawiesin kompozytowych jest skład chemiczny stopu osnowy. Dla stopów uwzględnionych w obliczeniach (w przybliżeniu odpowiadających znormalizowanym w PN stopom AK7, AK9 i AK11), stwierdzić można regułę, w myśl której, im skład

chemiczny stopu osnowy jest bliższy składowi eutektycznemu, tym stabilność zawiesin jest mniejsza.

Wpływ koncentracji fazy zbrojącej na prędkość opadania cząstek w zawieszynie (rys.1) zdecydowanie spada w miarę zmniejszania się ich ziarnistości. Dla cząstek o kilkunasto- mikrometrowej średnicy jest on praktycznie nieistotny.

Badania stabilności zawiesin kompozytowych F3S.20S w pełni potwierdziły zgodność zachowania się cząstek zbrojących z wynikami przeprowadzonych obliczeń (rys.5). Świadczy o tym fakt, że wszystkie punkty uzyskane w wyniku pomiarów próbek mieszczą się w obszarze objętym krzywymi zależności wyliczonymi dla stopów osnowy AlSi9Mg i AlSi10Mg.

5. Wnioski

Wykonane obliczenia i badania dotyczące zachowania się zawiesin kompozytowych pozwalają na sprecyzowanie wniosków ściśle związanych z praktyką technologii zawiesinowych odlewów kompozytowych. Stwierdzić należy, że:

- w każdej typowej odlewni stopów aluminium, możliwe jest topienie i odlewanie tych tworzyw, nawet do form piaskowych;
- złom obiegowy może być z powodzeniem utylizowany (przetapiany ponownie) w odlewni ale pod warunkiem absolutnie pewnej i skutecznej segregacji (pojemniki, przegrody, tablice informacyjne itp.);
- możliwości utylizacji metalu osnowy oddzielonej od zbrojenia w stanie ciekłym metodą sedymentacji, uznać należy za mało realną a ewentualne próby takich poczynań należy przeprowadzić z wykorzystaniem innych sposobów rozdzielania faz np. ekstrakcji lub filtrowania.

LITERATURA

- [1] Pikoń J.: *Aparatura chemiczna*. cz II, skrypt Politechniki Śląskiej, nr 338, Gliwice 1972.
- [2] *Zadania rachunkowe z inżynierii chemicznej*, praca zbiorowa pod redakcją Zarzyckiego R., skrypt Politechniki Łódzkiej, Łódź 1972.
- [3] Stręk Fr.: *Mieszanie i mieszalniki*, WNT, Warszawa 1981.
- [4] Jackowski J., Nagolska D., Szweycer M.: *Analiza możliwości recyklingu kompozytów metalowych zbrojonych cząstkami drogą sedymentacji*, tekst zgłoszony i przyjęty do druku w materiałach Seminarium pt. „Kompozyty i ich wykorzystanie w technice” planowane na dzień 03.03.2000 r. w Politechnice Śląskiej w Katowicach.
- [5] Jackowski J., Szweycer M., Grabian J.: *Physical modelling in metal matrix cast composites engineering*, II Cast Composites Conference'98, Polanica Zdrój 04-06.06.1998 r.

Recenzował: dr hab. inż. Andrzej Modrzyński, prof. nadzw.