

Jacek Jackowski, Magdalena Suchora*, Paweł Szymański

Politechnika Poznańska, Instytut Technologii Materiałów, ul. Piotrowo 3, 61-138 Poznań, Poland

* Corresponding author. E-mail: magdalena.suchora@put.poznan.pl

Otrzymano (Received) 03.02.2009

WŁAŚCIWOŚCI ŻUŻLA PORECYKLINGOWEGO W PROCESIE RECYKLINGU METALOWYCH MATERIAŁÓW KOMPOZYTOWYCH ZBROJONYCH CZĄSTKAMI

Najbardziej racjonalny recykling metalowych materiałów kompozytowych wytwarzanych metodami odlewniczymi polega na rozdzieleniu składników. Istnieje, co prawda, możliwość przetapiania zawieszonych materiałów kompozytowych i ponownego odlewania zawiesiny, ale jest to szczególny przypadek recyklingu. W przypadku drobnych i zanieczyszczonych odpadów zawieszonych materiałów kompozytowych, a także materiałów z nasycanym zbrojeniem recykling może być dokonany tylko przez rozdzielenie składników. Proces rozdzielenia składników zawiesiny recyklowanego materiału kompozytowego wymaga stosowania dodatkowej fazy ciekłej w układzie recyklingowym, zwanej ośrodkiem. Jest nią stopiona mieszanina soli, która przejmuje cząstki fazy zbrojącej recyklowanej zawiesiny. Proces zamiany zawiesin (przejście cząstek zbrojących z osnowy do ośrodka) wymaga mieszania układu w celu jego zemułgowania. Powstały żużel porecyklingowy to zawiesina cząstek fazy zbrojącej w ciekłym ośrodku. Jego właściwości, a szczególnie gęstość, decydują o jego zachowaniu się po zakończeniu procesu, a zatem o możliwości rozdzielenia składników układu złożonego z odzyskanej osnowy kompozytowej i żużla porecyklingowego. Doświadczenia wykonywano w piecu - mieszalniku, stosując wsad złożony z porcji materiału kompozytowego (F3S.20S), głównie w postaci wiórów oraz zmiennych ilości mieszaniny soli (ośrodka). Wskutek takich działań uzyskiwano próbki żużla porecyklingowego o zróżnicowanej zawartości w nim cząstek fazy zbrojącej wyjściowy materiał kompozytowy. Na fotografiach przedstawione zostały przykłady zakrzepniętych układów porecyklingowych stwierdzonych na przekrojach tygielka po zakończeniu procesu. Dokonane obserwacje zachowania się żużla w trakcie procesu recyklingu w połączeniu z analizą zawartości cząstek zbrojących w pobranych próbkach żużli pozwoliły na ustalenie zależności przedstawionej na wykresie. Wykres ten wyjaśnia przyczynę zaobserwowanego zjawiska tonięcia żużla porecyklingowego podczas trwania procesu. Przyczyną tego zjawiska jest zmiana (wzrost) gęstości żużla spowodowana przyrostem zawartości cząstek zbrojących. Zjawisko to powoduje niekorzystne skutki. Utrudnia koagulację kropli emulsji recyklowanego układu (kropli osnowy kompozytowej / kropli żużla porecyklingowego), spowalnia ich sedimentację po zakończeniu procesu i utrudnia rozdzielenie składników układu porecyklingowego, czyli odzyskanej osnowy kompozytowej i żużla porecyklingowego.

Słowa kluczowe: kompozyty zbrojone cząstkami, recykling, technologia

THE PROPERTIES OF AFTER-RECYCLING SLAG IN THE RECYCLING PROCESS OF THE PARTICLE-REINFORCED METAL COMPOSITE MATERIALS

The most reasonable recycling of the metal composite materials manufactured with casting methods consists in separation of the components. The suspended composite materials may be indeed remelted and the suspension recasted again, nevertheless, this would be rather a particular case of recycling. In case of fine and contaminated suspension wastes of the composite materials and the materials with saturated reinforcement, the recycling process consists in separation of the components. The process of separation of the suspension components of the composite material under recycling requires the use of an additional liquid phase of the recycling system, that is called a medium. It is a melted salt mixture that intercepts the particles of the reinforcing phase of the suspension under the recycling process. The process of interchange of the suspensions (i.e. the transfer of the reinforcing particles from the matrix to the medium) requires mixing of the system in order to emulsify it. The after-recycling slag formed this way is a suspension of the reinforcing phase particles in the liquid medium. Its properties, particularly the density, are decisive for its behaviour after the process termination and, in consequence, for possible separation of the components of the system composed of the recovered composite matrix and the after-recycling slag. The experiments have been performed in a furnace-mixer, with the use of a charge composed of the composite material batch (F3S.20S), mainly in the form of chips and varying amount of the salt mixture (the medium). In result of such an approach the after-recycling slag samples have been obtained, of differentiated contents of the phase particles that reinforce the composite material. The pictures show the examples of the solidified after-recycling systems found in the crucible sections upon the process termination. The observations of the slag behaviour during the recycling process, together with the analysis of the contents of the reinforced particles derived from the slag samples, enabled formulating the relationship shown in the diagram. The diagram explains the reason of the phenomenon of slag "disappearance" during the process. It is due to the change (growth) of slag density caused by the increase in the reinforcing particles contents. This gives rise to disadvantageous consequences, resulting in more difficult coagulation of the recycled system emulsion drops (the drops of the composite matrix/ the drops of after-recycling slag), their slower sedimentation after the process termination, and more difficult separation of the after-recycling system components, i.e. the recovered composite matrix and after-recycling slag.

Keywords: particle-reinforced composites, recycling, production technology

WSTĘP

Dwie dominujące grupy metalowych materiałów kompozytowych wytwarzanych metodami odlewniczymi to:

- kompozyty zawiesinowe złożone z metalowej osnowy oraz zróżnicowanych, ale luźnych cząstek fazy zbrojącej oraz
- kompozyty z nasycanym zbrojeniem, złożone także z metalowej osnowy oraz porowatej i sztywnej kształtki zbrojącej, odpowiadającej w całości lub częściowo kształtowi odlewu.

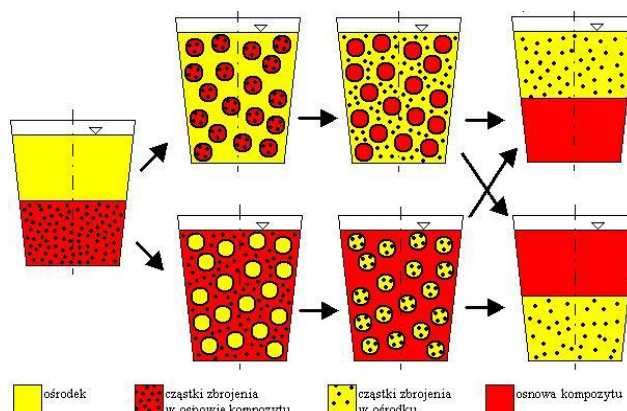
Recykling tych materiałów był przedmiotem analiz [1, 2], z których wynika, że proces ten w zdecydowanej liczbie przypadków musi polegać na rozdzieleniu składników recyklowanego materiału. Wykorzystanie zawiesiny kompozytowej uzyskanej z roztopienia np. grubego złomu kompozytowego i odlanie z niej kolejnych elementów stanowi bardzo szczególny przypadek recyklingu i nie zawsze jest możliwy do przeprowadzenia. Recykling polegający na rozdzieleniu składników (np. zawiesiny powstałej z roztopienia odpadów kompozytowych, np. wiórów) jest najbardziej racjonalnym działaniem, a w przypadku materiałów kompozytowych z nasycanym zbrojeniem - jedynym.

Ponieważ każdy proces rozdzielania składników metalowych materiałów kompozytowych, zarówno zawiesinowych, jak i z nasycanym zbrojeniem, wymaga użycia tzw. ośrodka recyklingowego - układ recyklingowy na początku procesu składa się z trzech faz: stałej zbrojenia kompozytowego i dwóch ciekłych - roztopionej osnowy kompozytowej oraz ośrodka. Ośrodek ten winien być fizycznie i chemicznie obojętny względem roztopionej osnowy kompozytowej. Rozdzielenie składników recyklowanego materiału kompozytowego w obu przypadkach (kompozyty zawiesinowe i z nasycanym zbrojeniem) polega na zastąpieniu metalu osnowy ciekłym ośrodkiem, co w przypadku zawiesin kompozytowych oznacza przeprowadzenie cząstek fazy zbrojącej ze stanu zawiesiny w ciekłej osnowie do stanu zawiesiny w ciekłym ośrodku [1, 3]. Przebieg i sprawność procesu recyklingu zależy też od nieskomplikowanego rozdzielenia produktów procesu, to znaczy ciekłej osnowy kompozytowej oraz powstałej zawiesiny cząstek fazy zbrojącej w ośrodku, czyli żużla poroekologicznego.

MECHANIZM ROZDZIELANIA SKŁADNIKÓW RECYKLOWANEJ ZAWIESINY KOMPOZYTOWEJ

Mechanizm procesu rozdzielania składników zawiesiny kompozytowej przedstawiony jest na rysunku 1 [4].

Jak zasygnalizowano we wstępie, układ recyklingowy i jego stan początkowy składa się z ciekłej zawiesiny kompozytowej i ciekłego ośrodka. Ośrodkiem jest roztopiona mieszanina soli, której właściwości muszą spełniać m.in. warunek samoczynnego przechodzenia cząstki fazy zbrojącej przez granicę międzyfazową: osnowa kompozytowa-ośrodek recyklingowy [1].



Rys. 1. Mechanizm procesu rozdzielania składników recyklowanej zawiesiny kompozytowej [4]

Fig. 1. Mechanism of separation of the components of the recycled composite suspension [4]

Ponieważ gęstość roztopionej mieszaniny soli jest mniejsza od gęstości zawiesiny kompozytowej przeznaczonej do recyklingu, w początkowym stadium układu recyklingowego słup zawiesiny znajduje się poniżej warstwy ciekłego ośrodka. Sedymentacja warstwy zawiesiny sprawia, że jej cząstki oddalają się od powierzchni rozdziału faz: osnowa-ośrodek. Aby kontakt cząstek fazy zbrojącej z powierzchnią międzyfazową mógł zaistnieć, konieczne jest zemulgowanie układu. Proces ten wymaga mieszania [3], skutkiem którego uzyskać można emulsję złożoną z:

- kropli zawiesiny kompozytowej w ośrodku będącym fazą ciągłą (lub odwrotnie),
- kropli ośrodka recyklingowego w zawieszynie kompozytowej będącej fazą ciągłą.

Mieszanie uzyskanej emulsji umożliwia i ułatwia kontakt cząstek fazy stałej recyklowanej zawiesiny z ciekłym ośrodkiem, a zatem przechodzenie ich do ośrodka. Skutkiem tego procesu jest „odwrócenie” wytworzonego pierwotnie układu i uzyskanie:

- kropli metalu osnowy kompozytowej w zawieszynie cząstek w ośrodku, czyli żużla poroekologicznego, lub
- kropli zawiesiny cząstek w ośrodku (żużla poroekologicznego) w metalu osnowy kompozytowej.

Po zakończeniu mieszania układu następuje koagulacja kropli tworzących emulsję (metal osnowy lub żużla poroekologicznego) i ich sedymentacja. W wyniku sedymentacji układ recyklingowy może odpowiadać schematom pokazanym na rysunku 1, tzn. składać się z warstwy żużla nad lustrem osnowy kompozytowej lub odwrotnie - warstwy metalu nad żużlem.

Podczas prób recyklingu zawiesin kompozytowych stwierdzono przypadki zatapiania się żużla poroekologicznego pływającego początkowo na powierzchni układu, a ponieważ celem procesu jest oddzielenie odzyskanej osnowy kompozytowej od żużla poroekologicznego, określenie warunków pożądanego zachowania się żużla w tym procesie jest bardzo istotne.

PRÓBY RECYKLINGU ODPADÓW KOMPOZYTOWYCH

Próby recyklingu zawieszinowego materiału kompozytowego wykonano w piecu - mieszalniku, zaopatrzonego w niewielkie tygielki o pojemności ok. 200 cm³ [1, 3]. Do prób użyto materiału kompozytowego w postaci kawałków odlewów lub wiórów pochodzących z obróbki odlewów. Materiał ten o symbolu F3S.20S posiadał osnowę o składzie chemicznym zbliżonym do stopu AK9, a zbrojenie w postaci cząstek SiC o granulacji ok. 20 μm i udziale masowym 21,6% (wg atestu). W charakterze ośrodka recyklingowego użyta została mieszanina soli o składzie masowym: NaCl - 46%, KCl - 45%, NaF - 5%, CaF₂ - 3% i 3NaAlF₃ - 1%, stosowana w odlewniach aluminium pod nazwą Pokal. Instalowane w piecu - mieszalniku tygielki wykonane były ze stali (zabezpieczone pokryciem grafitowym) oraz ceramiki. Stosowanie tygielków stalowych pozwalało na ich rozcinanie (wraz z zawartością) i obserwowanie zakrzepniętego układu porecyklingowego.

Poszczególne próby wykonywano, stosując zróżnicowane udziały masowe materiału kompozytowego i ośrodka recyklingowego. Stosowano także zróżnicowaną procedurę roztopiania układu: dozując stały wsad kompozytowy do roztopionego ośrodka lub roztopiając równocześnie porcję stałego wsadu kompozytowego i stałej mieszaniny soli ośrodka. Z chwilą gdy układ przeznaczony do próby osiągnął temperaturę ok. 750°C, rozpoczynano mieszanie, czyli emulgowanie układu, jednocześnie obserwując jego zachowanie się. Stwierdzono, że znakiem świadczącym o postępującym procesie przechodzenia cząstek fazy stałej ze stanu zawiesiny w osnowie do ośrodka jest ciemnienie i mętnienie (jasnego i przezroczystego początkowo) ciekłego ośrodka. Zmieniała się również konsystencja żużła porecyklingowego, tworzącego się z ciekłego ośrodka przejmującego cząstki fazy zbrojącej. Żużel uzyskany w próbie z użyciem dużej ilości ośrodka był bardziej ciekły niż uzyskany z mniejszej ilości ośrodka w porównywalnej temperaturze. Zauważono także zmienne zachowanie się żużła porecyklingowego na powierzchni odzyskanej osnowy metalowej. Żużel ten albo pływał na powierzchni osnowy, albo gromadził się pod jej lustrem na dnie lub ściankach bocznych tygielka. Zaobserwowano także, że pływający na początku procesu żużel „znikał” pod powierzchnią osnowy w trakcie trwania procesu. Po zakończeniu procesu wyłączano mieszadło, a zawartość tygielka studzono powoli wewnątrz pieca. Po ostygnięciu układu do temperatury otoczenia rozcinano tygielki wraz z zawartością. Na rysunku 2 przedstawiono przykłady wybranych przekrojów. Pobierano również próbki żużła porecyklingowego w celu określenia w nim zawartości cząstek fazy zbrojącej. Grudki pobranego żużła mielono w młynku, a uzyskany miał przesiewano przez sito o wymiarze oczka 0,4 mm. Z odsiewu pobierano próbkę o masie ok. 10 g w celu oznaczenia w niej zawartości cząstek SiC. Oznaczeń dokonywano metodą gravimetryczną po roz-

puszczeniu w wodzie mieszaniny soli stanowiącej ośrodek recyklingowy.

Każda z wykonanych prób była dokumentowana. Powstały raport zawierał dane: ilość i rodzaj użytych materiałów wsadowych, datę i warunki przeprowadzenia próby oraz efekty w postaci fotografii lub szkicu przekroju tygielka po próbie, sprawdzenia obecności cząstek fazy zbrojącej w osnowie, wyników pomiarów zawartości fazy zbrojącej w żużlu porecyklingowym (z podaniem miejsca pobrania każdej próbki żużla) itp.

W tabeli 1 przedstawione zostały wyniki przeprowadzonych prób zestawione w kolejności rosnącego stosunku masy cząstek SiC we wsadzie kompozytowym do masy użytego ośrodka recyklingowego (mieszaniny soli). W środkowej kolumnie tabeli podane są zbadane zawartości SiC w próbkach żużła porecyklingowego z określeniem miejsca ich poboru.

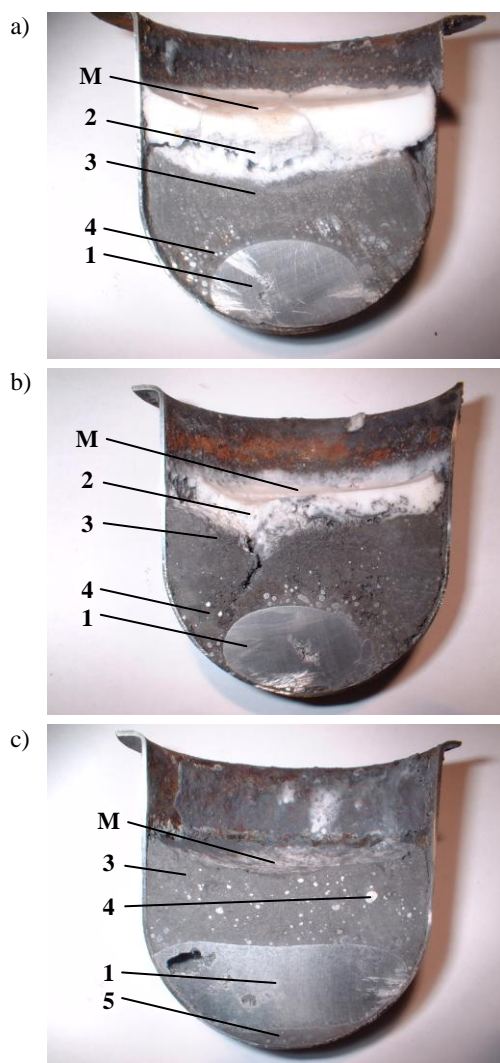
TABELA 1. Zawartość SiC w żużlu i jego stan po zakończeniu procesu recyklingu [4]

TABLE 1. Contents of SiC in after-recycling slag and his state [4]

Lp.	Stosunek masy SiC we wsadzie kompozytowym do masy użytego ośrodka	Zawartość SiC w żużlu *) %	Postać i zachowanie się żużla w czasie i po zakończeniu próby
1	0,05	11,52 a 11,58 a	na powierzchni, rzadki, sedimentuje
2	0,05	9,50 a g 17,24 a d	jw.
3	0,05	10,50 a 10,50 a	na powierzchni, bardzo rzadki, sedimentuje
4	0,10	14,90 a 15,39 a	na powierzchni, ciekły
5	0,10	12,47 a g 18,24 a d	
6	0,10	13,70 a 15,16 a	na powierzchni, rzadki, sedimentuje
7	0,10	13,25 a 16,63 a	jw.
8	0,10	16,22 a 15,37 a	jw.
9	0,10	15,68 a 13,88 a	
10	0,13	19,56 a g 18,53 a d	
11	0,20	25,01 a g 24,16 a g	na powierzchni, ciekły, bez oznak sedimentacji
12	0,27	26,26 a g 25,90	na powierzchni, ciekły
13	0,32	29,24 a 30,50 a	na powierzchni, gęsty, część na dnie tygielka
14	0,40	29,94 a 34,49 b d	częściowo na powierzchni, gęsty, próbka b - z dna tygielka
15	0,40	44,33 b 43,29 b	czarny sypki żużel na powierzchni, bryła metalu osnowy zanurzona w mazistym żużlu
16	0,53	42,70 b 43,50 b	żużel „znika” z powierzchni układu, gęsta maź na dnie tygielka
17	0,53	37,12 b 37,57 b	maź na dnie tygielka
18	0,80	50,44 a 50,48 b	sypki na powierzchni, spieczony na dnie i ściance tygielka
19	0,80	58,50 d 66,01 d	gęsta maź z tkwiącą w niej bryłą metalu osnowy
20	2,00	- -	sypki, czarny popiół na powierzchni

*) miejsce pobrania próbki żużła porecyklingowego: a - znad warstwy odzyskanej osnowy, b - spod warstwy odzyskanej osnowy, g - z przypowierzchniowej warstwy żużla, d - z przydennej warstwy żużla

Na rysunku 2 przedstawione są trzy przykłady ilustrujące strukturę zakrzepniętego układu poroeklingowego. Na każdym z przekrojów widać wyraźną granicę między metalem odzyskanej osnowy kompozytowej oraz żużlem poroeklingowym. Ponieważ stosowano zróżnicowane (względem masy recyklowanego materiału kompozytowego) ilości osrodka recyklingowego, na przekrojach widoczne są zmiennej jakości warstwy żużli poroeklingowych. Na rysunkach 2a i 2b widoczne są białe warstwy wysedimentowanego żużla, a pod nimi szary żużel zawierający cząstki fazy stałej przejęte z zawiesiny kompozytowej. Zmniejszający się udział osrodka w układzie recyklingowym powodował zmniejszanie się grubości wysedimentowanej warstwy żużla aż do jego całkowitego zaniku (rys. 2c). Na zglądach osnowy kompozytowej widocznej na dnie tygielków nie stwierdzono obecności cząstek fazy zbrojącej, co dowodzi skuteczności procesu recyklingu.



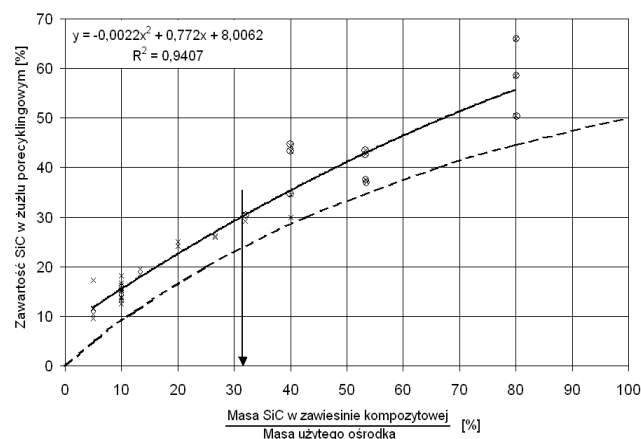
Rys. 2. Przykładowe struktury zakrzepniętych układów poroeklingowych: 1 - odzyskana osnowa metalowa; 2 - warstwa wysedimentowanego żużla; 3 - żużel (zawiesina cząstek w osrodku); 4 - krople osnowy zawieszona w żużlu; 5 - żużel na dnie tygielka; M - menisk

Fig. 2. Example structures of solidified after-recycling systems: 1 - recovered composite matrix; 2 - layer of sediment slag; 3 - slag (suspension of the reinforcing particles in medium); 4 - drops of the composite matrix in slag; 5 - slag on the crucible bottom; M - meniscus

Uwagę zwracają dwa fakty widoczne na przedstawionych przekrojach: różna liczba i wielkość kropli osnowy metalowej zawieszonych w żużlu poroeklingowym (rys. 2a-c) oraz obecność żużla pod warstwą odzyskanej osnowy (rys. 2c). Oba fakty wskazują na zmieniające się relacje gęstości tworzącego się (powstałego) żużla poroeklingowego i gęstości odzyskanej osnowy kompozytowej. Rosnąca zawartość fazy zbrojącej w żużlu poroeklingowym zwiększa jego gęstość, wskutek czego znaczna początkowo różnica gęstości osrodka recyklingowego i osnowy kompozytowej maleje, a prędkość sedymentacji kropli spada.

INTERPRETACJA WYNIKÓW PRÓB

W trakcie przedstawionych doświadczeń zebrano zbiór obejmujący 38 wyników analiz zawartości cząstek SiC w pobranych próbkach żużli poroeklingowych (tab. 1). Wyniki te podzielono na 9 grup, przy czym każda z nich posiadała inny stosunek masy cząstek SiC zawartych w recyklowanej próbce materiału kompozytowego do masy użytego osrodka w badanym układzie recyklingowym. Najniższa wartość tego stosunku wynosiła 5%, a najwyższa - 80% (tab. 1). Wyliczoną zależność wiążącą zawartość cząstek SiC w żużlu poroeklingowym z masą tych cząstek w porcji recyklowanego materiału oraz masą użytego osrodka przedstawiono linią ciągłą na rysunku 3.



Rys. 3. Zależność zawartości SiC w żużlach poroeklingowych od ilości cząstek w próbce recyklowanego materiału i ilości użytego osrodka

Fig. 3. Dependence of SiC contents of after-recycling slags on the number of the particles in a sample of the recycled material and the amount of the used medium

Na tym samym rysunku linią przerywaną przedstawiono zmiany teoretycznej zawartości SiC w żużlu poroeklingowym uzyskanym przy zróżnicowanych ilościach zastosowanego osrodka. Leży ona poniżej linii oznaczającej rzeczywistą zawartość SiC stwierdzoną w próbkach żużla. Obie linie są niemal równoległe, co wskazuje na prawie stałą wartość różnicy teoretycznej i rzeczywistej zawartości SiC w żużlu. Różnica ta wynika prawdopodobnie z parowania roztopionej mieszaniny

solu stanowiącej ośrodek recyklingowy. Ubytek masy ośrodka w trakcie procesu musi powodować wzrost koncentracji SiC w pozostałej jego części. Na rysunku 3 oznaczono kółkami te wartości SiC w próbkach żużła porecyklingowego, przy których zaobserwowano opadanie żużła w układzie recyklingowym po zakończeniu mieszania i stwierdzono jego obecność np. na dnie tygielka (tab. 1). Przyczyną obecności sypkiego żużła na powierzchni układu recyklingowego (tab. 1, lp. 15 i 20) o bardzo wysokiej zawartości SiC jest jego trójfazowość. „Pływalność” takiego żużła spowodowana jest obecnością fazy gazowej w jego strukturze. Fakt ten może jednocześnie wskazywać na niedostateczną ilość użytego ośrodka, a zatem niecałkowite przejście fazy zbrojącej z recyklowanej zawiesiny kompozytowej do ośrodka [6].

Dla skutecznego, łatwego do obserwacji i wygodnego rozdzielania składników porcji recyklowanej zawiesiny kompozytowej masa użytego ośrodka musi zapewnić uzyskanie żużła porecyklingowego o gęstości mniejszej od gęstości odzyskanej osnowy kompozytowej. W przedstawionym przypadku masa ta nieznacznie przekracza 30% masy cząstek SiC obecnych w recyklowanym materiale kompozytowym. Jest to graniczna ilość, powyżej której obserwowano obecność żużła pod warstwą odzyskanej osnowy kompozytowej, a zatem technologiczny udział ośrodka w układzie recyklingowym powinien być zawsze większy.

PODSUMOWANIE

Ostatni etap recyklingu zawieszinowych materiałów kompozytowych drogą rozdzielania składników spro-

wadza się do oddzielenia ciekłego metalu osnowy kompozytowej od żużła porecyklingowego, będącego zawiesziną cząstek fazy zbrojącej w ciekłej mieszaninie soli (ośrodku). Zdecydowane, łatwe i szybkie rozdzielanie tych faz ma duże znaczenie dla praktyki technologicznej. Przedstawione zagadnienie i sposób jego rozwiązania stanowi istotną wskazówkę technologiczną dla projektowania procesu recyklingu, szczególnie gdy dotyczy on zawieszinowych materiałów kompozytowych na osnowie stopów aluminium.

LITERATURA

- [1] Jackowski J., Nagolska D., Szymański P., Szweycer M., Warunki recyklingu rozdrobnionych kompozytów metalowych zbrojonych dyspersyjnie i z nasycanym zbrojeniem, [w:] Innowacje w odlewnictwie - cz. I, Instytut Odlewnictwa, Kraków 2007, 259-266.
- [2] Jackowski J., Nagolska D., Suchora M., Szweycer M., Szymański P., Recycling of composite scrap, Archives of Foundry Engineering 2008, 8, 1, 143-149.
- [3] Jackowski J., Nagolska D., Szymański P., Szweycer M., Analiza warunków recyklingu odlewów i odpadów kompozytowych, [w:] Innowacje w odlewnictwie - cz. II, Instytut Odlewnictwa, Kraków 2008, 303-308.
- [4] Szymański P., Recykling odlewów z metalowych kompozytów zawieszinowych, Praca doktorska (w przygotowaniu).
- [5] Jackowski J., Suchora M., Szymański P., Ruch cząstek fazy zbrojącej w zemulgowanych kroplach zawiesiny kompozytowej, Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji 2008, 1, 28, 73-82.
- [6] Witczak D., Mechanizm zagęszczania żużła ekstrahującego stałe wtrącenia niemetaliczne z aluminium i jego stopów, Praca doktorska, WBMiZ, Politechnika Poznańska, Poznań 1998, niepublikowana.