

# Mikrostruktura i trwałość zmęczeniowa po wielokrotnym przetopie stopu A359 i kompozytu na bazie stopu A359 zbrojonego cząsteczkami SiC

Microstructure and fatigue life after the multiple remelting of alloy A359 and A359-based composites reinforced with SiC particles

KRYSTYNA PIETRZAK  
ADAM KLASIK  
MARIA MAJ  
ANDRZEJ WOJCIECHOWSKI \*

DOI: 10.17814/mechanik.2016.5-6.68  
Międzynarodowa Konferencja IMT 2016

Mikrostrukturę stopu A359 i kompozytu na bazie stopu A359 zbrojonego cząsteczkami SiC poddano metalograficznej ocenie ilościowej. Przedstawiono charakterystyki mechaniczne tych materiałów wyznaczone w oparciu o oryginalną zmodyfikowaną próbę niskocyklową. Zaproponowano wielokrotny przetop jako alternatywę dla innych metod recyklingu.

**SŁOWA KLUCZOWE:** stop, kompozyt, mikrostruktura, właściwości, recykling

*The microstructure of alloy A359 and A359-based composite reinforced with SiC particles was quantitatively assessed. The mechanical characteristics determined by means of the modified low cycle fatigue method on these materials were disclosed. The multiple remelting process was proposed as an alternative for the other recycling methods.*

**KEYWORDS:** alloy, composite, microstructure, properties, recycling

Proces komercjalizacji metalowych kompozytów wymaga zapewnienia możliwości ich recyklingu i ponownego zastosowania w produkcji gotowych wyrobów. W przypadku metalowych materiałów kompozytowych zwykle stosuje się dwie podstawowe metody rozdzielania fazy zbrojącej od osnowy metalowej: rozdzielanie mechaniczne i chemiczne [1, 2]. Wprowadzenie techniki DMDT (*Disintegrated Melt Deposition Technique*) poszerzyło znacznie te możliwości [3]. Innym sposobem stosowanym w tym celu jest oddzielenie osnowy metalowej od fazy zbrojącej w kompozytach utworzonych przez infiltrację preform [4] lub „wypychanie” osnowy metalowej ze stopionego kompozytu [5]. Odrębny problem stanowi recykling odpadów, takich jak układy wlewowe, nadlewowe i odlewy wadliwe czy wióry po obróbce skrawaniem mogące stanowić osnowę metalową wytwarzanych później kompozytów [6]. W artykule przedstawiono efekty bezpośredniego wielokrotnego przetopu stopu A359 zawierającego: 8,6% Si; 0,12% Fe; 0,3% Cu; 0,007% Mn; 0,46% Mg; 0,01% Zn; 0,11% Ti i resztę Al oraz kompozytu F3S.20S, o osnowie stopu A359 zbrojonego objętościowo cząsteczkami SiC (20% wag.), jako metodę recyklingu [7], w odniesieniu do trwałości zmęczeniowej.

## Wielokrotny przetop

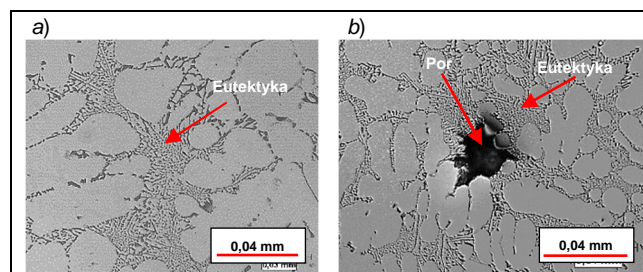
Wielokrotny (dziewięciokrotny) przetop stopu A359 i kompozytu F3S.20S przeprowadzono metodą klasycznego

\* Dr hab. inż. Krystyna Pietrzak, (krystyna.pietrzak@imp.edu.pl), dr hab. inż. Andrzej Wojciechowski – Instytut Mechaniki Precyzyjnej; dr inż. Adam Klasik (adam.klasik@its.waw.pl) – Instytut Transportu Samochodowego; dr hab. inż. Maria Maj (mmaj@agh.edu.pl) – Wydział Odlewnictwa, Akademia Górniczo-Hutnicza

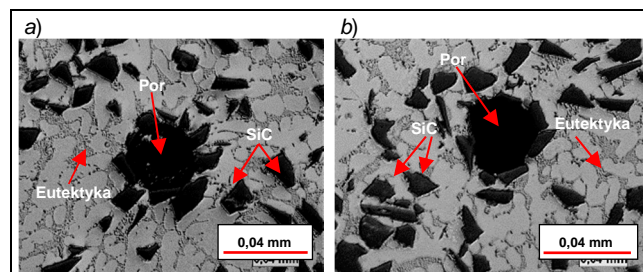
odlewania kokilowego. Przyjęto następujące parametry technologiczne odlewania: temperatura kąpieli – 720 °C ± 5 °C, temperatura kokili – 190 °C ± 10 °C. Po wielokrotnym przetopie przeprowadzono kontrolę jakości otrzymanych odlewów metodą rentgenowską w celu wyeliminowania odlewów wadliwych.

## Ilościowe badania metalograficzne

Zgłady do badań metalograficznych przygotowano w oparciu o opracowaną metodykę szlifowania i polerowania. Ilościowe badania mikrostruktury stopu A359 i kompozytu F3S.20S (rys. 1, 2) przeprowadzono w zakresie mikroskopii świetlnej metodą komputerowej analizy obrazu, wyznaczając dla każdego przetopu zespół parametrów geometrycznych wydzieleni eutektycznych (łącznie) dla stopu A359 i kompozytu oraz cząsteczek zbrojenia (SiC) dla kompozytu.



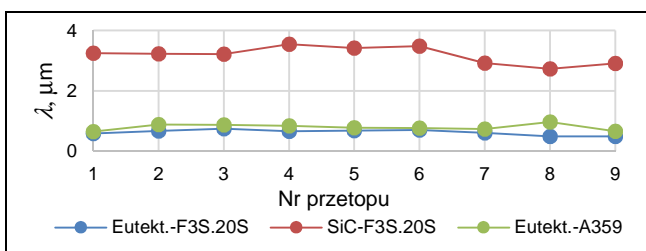
Rys. 1. Mikrostruktura stopu A359 po: a) pierwszym przetopie, b) po dziewiątym przetopie (pow. 500x)



Rys. 2. Mikrostruktura kompozytu F3S.20S po: a) pierwszym przetopie, b) po dziewiątym przetopie (pow. 500x)

W wyniku metalograficznych ilościowych badań i analiz za najistotniejszy parametr geometryczny mikrostruktury uznano średnią odległość swobodną (parametr  $\lambda$ ) między wydzieleniami eutektycznymi w stopie A359 i kompozycie F3S.20S oraz między cząsteczkami zbrojenia. Parametr ten uwzględnia zarówno udział objętościowy, jak i rozmiary mierzonych obiektów. Z przedstawionych wykresów (rys. 3) wynika, że liczba przetopów praktycznie nie wpływa ani na

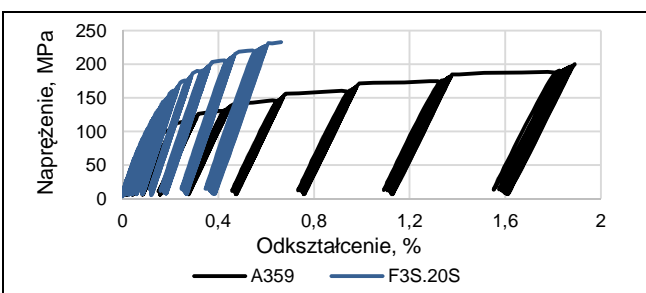
udział objętościowy, ani na morfologię zarówno wydzieleni eutektycznych, jak i cząstek zbrojenia. Stwierdzone niewielkie różnice należy przypisać porowatości gazowo-skurczowej (rys. 1 i 2) charakterystycznej dla odlewania grawitacyjnego. Zastąpienie odlewania grawitacyjnego odlewaniem metodą *squeeze casting* (prasowanie w stanie ciekłym) powinno praktycznie wyeliminować ten problem.



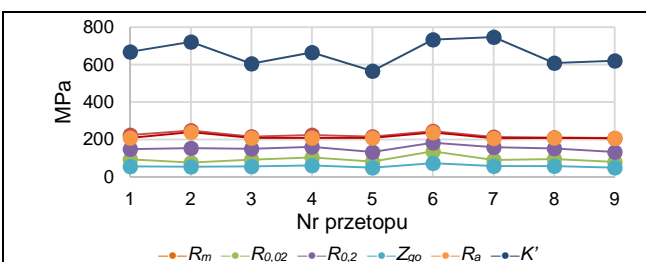
Rys. 3. Rozmieszczenie wydzieleni eutektycznych w stopie A359 i kompozycie oraz cząstek SiC w zależności od liczby przetopów

### Badania mechaniczne

Badania mechaniczne przeprowadzono metodą zmodyfikowanej próby niskocyklowej (MLCF) [8]. Próbkę obciążano cyklami odzermowymi, sterując naprężeniem. Program badawczy składał się z  $N_p$  „serii”. W każdej kolejnej „serii” złożonej z 20 cykli ( $N_c$ ) o stałej amplitudzie naprężenia rozciągającego zwiększano naprężenie. Dla poszczególnych poziomów naprężeń stosowano 20-krotne obciążanie – odciążanie (cyklowanie) z częstotliwością 0,25 Hz. Przykładowe krzywe naprężenie – odkształcenie (rys. 4) ilustrują pozytywny wpływ fazy zbrojącej, bowiem dla kompozytu, w porównaniu ze stopem bez zbrojenia, uzyskano większe wartości naprężenia. Należy podkreślić, iż pozytywny efekt uzyskano dzięki prawidłowej zawartości Si w osnowie stopu A359. W przypadku kiedy zawartość ta jest zbyt mała (poniżej 8%), wówczas na granicach zbrojenie/osnowa metalowa powstaje węgiel glinu ( $Al_4C_3$ ), którego wydzielenia powodują gwałtowne pogarszanie się charakterystyk mechanicznych [9]. Potwierdzenie braku niekorzystnych wydzieleni uzyskano drogą rentgenowskiej analizy fazowej.

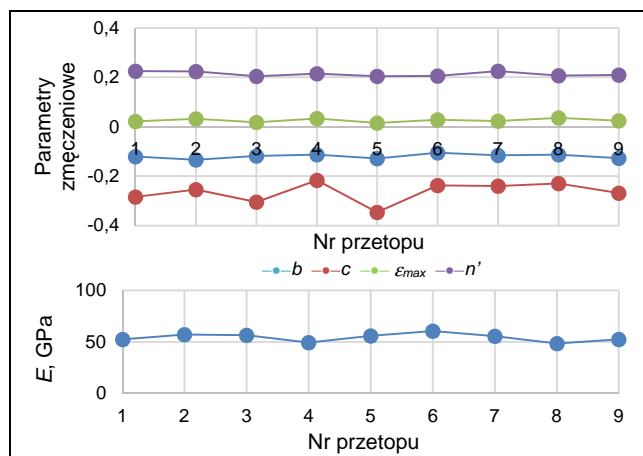


Rys. 4. Przykładowe wykresy naprężenie – odkształcenie dla stopu A359 i kompozytu F3S.20S



Rys. 5. Parametry mechaniczne (wyznaczone w próbie MLCF) w zależności od nr. przetopu (kompozyt F3S.20S):  $R_m$  – wytrzymałość na rozciąganie,  $R_{0,02}$  – umowna granica proporcjonalności,  $R_{0,2}$  – umowna granica plastyczności,  $Z_{go}$  – oceniona wytrzymałość zmęczeniowa,  $R_a$  – granica akomodacji,  $K'$  – współczynnik wytrzymałości przy obciążeniach cyklicznie zmiennych

Ponadto na podstawie wykonanych badań i analiz przeprowadzonych metodą MLCF [8] stwierdzono, że 9-krotny przetop nie zmienia istotnie wyznaczonych w tej próbie następujących parametrów mechanicznych:  $R_m$ ,  $R_{0,02}$ ,  $R_{0,2}$ ,  $Z_{go}$ ,  $R_a$ ;  $K'$  (rys. 5) oraz  $b$ ,  $c$ ,  $n'$ ,  $\epsilon_{max}$ ,  $E$  (rys. 6).



Rys. 6. Parametry mechaniczne wyznaczone w próbie MLCF w zależności od nr. przetopu (kompozyt F3S.20S):  $b$  – współczynnik Basquina,  $c$  – wykładnik odkształcalności zmęczeniowej,  $\epsilon_{max}$  – maks. dopuszczalne odkształcenie,  $n'$  – wykładnik umocnienia w odkształceniach cyklicznych,  $E$  – moduł Younga

### Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz można stwierdzić, co następuje:

- mikrostruktura stopu A359 i kompozytu F3S.20S aż do 9-krotnego przetopu pozostaje praktycznie taka sama;
- metoda MLCF pozwala na szybkie szacowanie właściwości mechanicznych w zakresie zarówno statycznych, jak i niskocyklowych badań zmęczeniowych;
- bezpośredni przetop badanych materiałów może stanowić alternatywę dla innych kosztownych metod recyklingu.

### LITERATURA

1. Ravi K.R., Pillai R.M., Pai B.C., Chakraborty M. „Separation of matrix alloy and reinforcement from aluminum metal matrix composites scrap by salt flux addition”. *Bulletin of Materials Science*. Vol. 30, No. 4 (2007): pp. 393-398.
2. Nishida Y., Izawa N., Kuramasu Y., Sakai Y. „Recycling of aluminum matrix composites” *Metallurgical and Materials Transactions A*. Vol. 30, No. 13 (1999): pp. 839-844.
3. Ling P.S., Gupta M. „Recycling of aluminium based metal matrix composite using disintegrated melt deposition technique”. *Materials Science and Technology*. Vol. 16, No. 5 (2000): pp. 568-574.
4. Jackowski J. „Rola napięć międzyfazowych w recyklingu metalowych tworzyw kompozytowych z nasyceniem zbrojeniem”. *Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji*. R. 26, nr 1 (2006): s. 39-46.
5. Mizumoto M., Ohgai T., Agawa A. „Separation of PRMMC into Matrix Alloy and Reinforcements by Nozzle Filtering Method”, *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 209, No. 9 (2009): pp. 4264-4267.
6. Jackowski J., Szymański P. „Recykling drobnych odpadów metalowych materiałów kompozytowych”. *Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji*. R. 27, nr 1 (2007): s. 57-64.
7. Klasik A., Wojciechowski A., Sobczak J., Sobczak N. „Effect of multiple remelting on selected properties of dispersed reinforced aluminum matrix composite”. *Journal of KONES*. Vol. 15, No. 3 (2008): pp. 233-238.
8. Maj M., Klasik A., Pietrzak K., Rudnik D. „Modified low-cycle fatigue (LCF) test”. *Metalurgija*. Vol. 54, No. 1 (2012): pp. 207-210.
9. Labib A. „L'effet des niveaux de refroidissement (température de du moule) et des traitements Thermiques sur les propriétés mécaniques et sur la Microstructure des deux alliages composites Al-Si-Mg/SiC/10p”. Québec: Université du Québec à Chicoutimi 1993.