

**ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК КРЕМНИЯ НА СТРУКТУРУ И ТРИБОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
СПЕЧЕННЫХ КОМПОЗИТОВ Al-40Sn**

В.Е. Караваев<sup>1</sup>, А.Л. Скоренцев<sup>1,2</sup>

Научный руководитель: к.т.н. Н.М. Русин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050;

<sup>2</sup>Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН (ИФПМ СО РАН), Россия,

г. Томск, пр. Академический, 2/4, 634055

E-mail: [vladimirkaravaev1994@yandex.ru](mailto:vladimirkaravaev1994@yandex.ru)

**EFFECT OF SILICON ADDITIONS ON STRUCTURE AND TRIBOMECHANICAL PROPERTIES  
OF SINTERED Al-40Sn COMPOSITES**

V.E. Karavaev<sup>1</sup>, A.L. Skorentsev<sup>1,2</sup>

Scientific Supervisor: Ph. Dr. N.M. Rusin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, pr. Lenina, 30, 634050

<sup>2</sup>Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch Russian Academy of Sciences (ISPMS

SB RAS), Russia, Tomsk, pr. Akademicheskii 2/4, 634055

E-mail: [vladimirkaravaev1994@yandex.ru](mailto:vladimirkaravaev1994@yandex.ru)

**Abstract.** *The structure, mechanical and tribological properties of sintered (Al-Si)-40Sn composites were investigated in the present study. The composite materials were obtained by the sintering of the briquettes made from mixtures of tin and aluminum (Al, Al-0.5Si or Al-12Si) powders. It was found that the hot densification of the sintered composites substantially increases strength and also makes much higher their wear resistant under dry friction against a steel counterbody.*

**Введение.** Сплавы системы Al-Sn широко применяются в качестве антифрикционных материалов в подшипниках скольжения. С увеличением содержания Sn износостойкость и давление схватывания таких сплавов со сталью возрастают [1]. Однако содержание в них олова не превышает 20% вес, поскольку оно снижает несущую способность алюминиевой матрицы вследствие фрагментации её прослойками на отдельные зёрна. Уменьшить фрагментацию матрицы и за счёт этого довести содержание олова в композитах до 40% вес. удалось путём спекания их из смеси элементарных порошков [2]. Износостойкость таких композитов возросла, но снизилась несущая способность. Повысить ее можно, например, путем введения в Al матрицу твердых частиц типа кремния, которые, как известно, улучшают износостойкость алюминиевых сплавов, и при этом не растворяются в олове, сохраняя его смазочные свойства. Целью настоящей работы было исследование влияния режима спекания и последующего горячего доуплотнения на структуру, механические и трибологические свойства композита Al-40Sn с различным содержанием кремния в матрице.

**Материалы и методы исследования.** В качестве исходного материала использовались порошки олова марки ПО 2, мелкодисперсные порошки алюминия АСД-4, и порошки сплавов Al-0,5Si и Al-12Si ( $d < 80$  мкм). Из смеси указанных порошков прессовали брикеты пористостью  $\approx 10$  % и спекали их в

вакуумной печи. Механические свойства спечённых композитов определяли путем испытания на сжатие со скоростью 0,5 мм/мин на машине Walter+BaiAGLFM-125. Триботехнические испытания проводили на триботестере фирмы «Tribotechnic» (France) по схеме «палец – диск» при сухом трении образцов по стали со скоростью скольжения 0,6 м/с и давлении 1–5 МПа.

**Результаты.** Известно, что неизменным условием получения беспористых материалов при жидкофазном спекании является хорошее смачивание и растворение твёрдых частиц жидкой фазой. Однако непрерывный каркас из таких частиц формируется, если жидкость не препятствует их сращиванию, то есть угол смачивания больше нуля. В системе Al-Sn полное смачивание наступает при  $T \sim 620$  °С. Спечённые при указанной температуре композиты с матрицей из чистого Al или сплава (Al-0,5Si) содержали малое число пор. Однако Sn при этом проникает на границы зёрен и дезинтегрирует алюминиевую матрицу на мелкие несвязанные частицы, из-за чего несущая способность материала сильно снижалась. 600 °С оказалась той оптимальной температурой спекания, при которой частицы твёрдой фазы частично растворялись в жидкой, выходили из зацепления и могли перегруппировываться в более плотную конфигурацию под действием капиллярных сил. Одновременно, частицы с обновлённой поверхностью при столкновении срастались и формировали развитый высокопрочный каркас (рис. 1а, б).

Эвтектика (Al-12Si) плавится при 577 °С, поэтому композит (Al-12Si)-40Sn спекали при 570 °С, предварительно выдержав его в течение одного часа при 550° С. Поскольку угол смачивания алюминия жидким оловом при этом большой, то усадка образцов была меньше, чем в предыдущем случае и с увеличением длительности спекания почти не росла (таблица 1).

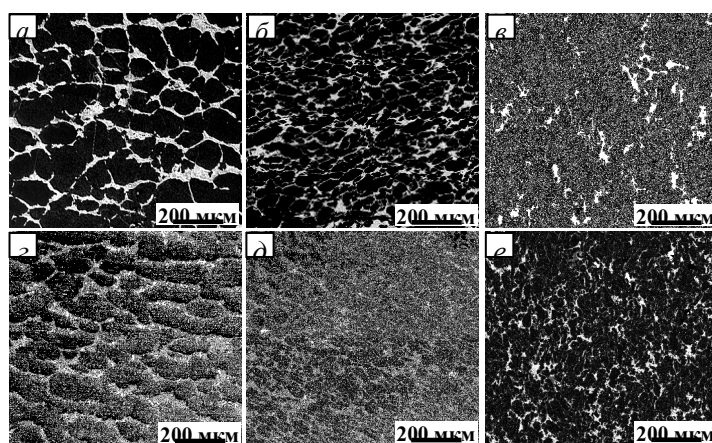


Рис. 1. Структура композитов Al-40Sn (а), (Al-0,5Si)-40Sn (б) и (Al-12Si)-40Sn (в) после спекания и доуплотнения при 200 °С (г-е), соответственно. Режим спекания: а, б, г, д – (600 °С; 1 час); в, е – (550 °С; 1 час + 570 °С; 10 мин)

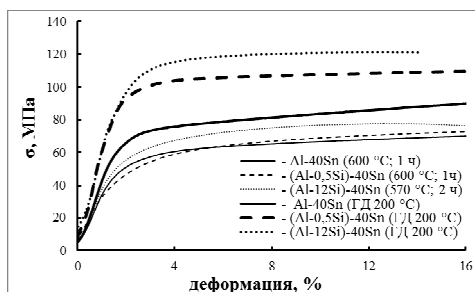
С целью устранения остаточной пористости, спеченные брикеты были подвергнуты последующему горячему доуплотнению (ГД) при температуре 200 °С. Из приведённых на рис. 2 кривых сжатия следует, что упрочнение алюминиевой матрицы кремнием мало сказывается на механических свойствах спеченных композитов (Al-Si)-Sn, поскольку нивелируется соответствующим приростом их пористости. Однако горячее прессование композитов в закрытой пресс-форме практически полностью устраняет их остаточную пористость, и сразу же проявляется упрочняющий эффект частиц кремния на алюминиевую матрицу, как следует из данных в Табл. 1 и рис. 2. Как и следовало ожидать, с увеличением концентрации кремния его

упрочняющий эффект проявляется сильнее. Что не маловажно, пластичность композитов при этом не ухудшается или даже возрастает, хотя их прочность после осадки образцов на 4% практически не растёт.

Таблица 1

*Характеристики структуры и трибологические свойства спеченных композитов (Al-Si)-40Sn*

Композит	Режим получения	Пористость, %	Напряжение течения $\sigma_{0.2}$ , МПа	Интенсивность изнашивания $I_h$ , мкм/м		
				1 МПа	3 МПа	5 МПа
Al-40Sn	(600 °C; 1 ч)	0,8	65	0,10	0,18	0,24
	(600 °C; 1 ч) + ГД 200 °C	0,1	80	0,10	0,18	0,22
(Al-0,5Si)- 40Sn	(600 °C; 1 ч)	4,5	63	0,11	0,22	0,33
	(600 °C; 1 ч) + ГД 200 °C	0,1	107	0,10	0,17	0,20
(Al-12Si)- 40Sn	(570 °C; 10 мин)*	6,5	62	0,26	0,53	0,74
	(570 °C; 2ч)*	6,2	72	0,10	0,20	0,26
	(570 °C; 10 мин)* + ГД 200 °C	0,1	119	0,10	0,14	0,18



*Рис. 2. Кривые сжатия композитов (Al-Si)-40Sn после спекания и горячего доуплотнения*

Испытания в условиях трения без смазки показали, что устранение пор сказывается также положительно и на износостойкости спеченных композитов (Al-Si)-40Sn, особенно с большим содержанием кремния в матрице. Так, уплотнение образца Al-40Sn с чистой алюминиевой матрицей привело лишь к 10 % улучшению его износостойкости, и то только при высоком давлении 5 МПа (таблица 1). Тогда как износостойкость композита (Al-12Si)-40Sn после той же обработки с устранением пор возрастает в 4 раза, и почти на 30% превышает износостойкость доуплотнённого композита с чистой Al матрицей.

**Закключение.** Из проделанной работы следует вывод, что метод спекания брикетов из смеси порошков сплава (Al-Si) и олова с последующим их горячим доуплотнением является перспективным способом получения прочных и износостойких антифрикционных композитов с высоким содержанием твердой смазки.

Работа выполнена в рамках проекта СО РАН (программа III.23.2.4) при частичном финансировании по проектам РФФИ № 16-08-00603 и №16-38-00236.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Abed E.J. Study of Solidification and Mechanical Properties of Al-Sn Casting Alloys // Asian Transaction on Engineering. – 2012. – Vol. 02. – № 3. – P. 89-98.
2. Rusin N.M., Skorentsev A.L., Kolubaev E.A. Structure and Tribotechnical Properties of Al-Sn Alloys Prepared by the Method of Liquid-Phase Sintering // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 1040. – P. 166-170.