

JOURNAL OF ELECTROCHEMICAL SCIENCE. – 2016. – Т. 11. – №. 4. – С. 3164-3178.

4. Patka P, Wolke JGC, et al. Long term in vivo study of plasma-sprayed coatings on titanium alloys of tetracalcium phosphate, hydroxyapatite and  $\alpha$ -tricalcium phosphate // Biomaterials. - 1994. – Т.15 – С.146–150.
5. Белявская О. А. и др. Перспективы синтеза тетракальцийфосфата и применения для биопокровов // Новые технологии создания и применения биокерамики в восстановительной медицине: материалы IV Международной научно-практической конференции, 13-15 октября 2016 г. – 2016. – С. 11-17.
6. Токкита М. Настоящее и будущее технологий спекания керамики в связи с разработкой метода электроимпульсного плазменного спекания (ЭИПС) // Российские нанотехнологии. – 2015. – №. 3-4. – С. 80-85.

### ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СПЕЧЕННЫХ КОМПОЗИТОВ Al-Si-Sn

*Н.А. РЕДИНСКИЙ<sup>1</sup>, А.Л. СКОРЕНЦЕВ<sup>2,3</sup>, Н.М. РУСИН<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Томский государственный университет

<sup>2</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

<sup>3</sup>Томский политехнический университет

E-mail: insait.tomsk@gmail.com

Детали аэрокосмических аппаратов должны отличаться малым удельным весом, высокой прочностью и не терять работоспособности в условиях периодического нагрева и охлаждения до низких температур. Указанным условиям отвечают материалы на основе алюминия, в частности, они могли бы применяться в узлах трения аэрокосмических агрегатов, где использование жидкой смазки исключается или ограничено. С этой целью возможно использовать самосмазывающиеся материалы системы Al-Sn, при условии, что удастся снизить их высокий коэффициент термического расширения ( $\alpha$ ) и затормозить быстрое их размягчение при нагреве выше 100 °С. Обе указанные цели можно достичь введением в алюминиевую матрицу твёрдых тугоплавких частиц, таких как кремний. Тем более, что они существенно улучшают износостойкость Al при сухом трении [1].

Проблема получения таких материалов литьевым способом заключается в том, что составляющие их элементы склонны к расслоению при затвердевании расплава по причине отсутствия взаимной растворимости в твёрдой фазе, большой разности в плотности и температуре кристаллизации. Порошковая металлургия позволяет избежать указанных трудностей, поскольку для формирования изделий можно использовать порошки быстро закристаллизованных сплавов, в которых кремний равномерно распределён по объёму. Данные порошки при смешивании с порошками олова в широком концентрационном интервале образуют непрерывные цепочки, которые при спекании трансформируются в прочный непрерывный каркас, то есть формируется композит матричного типа состава Al-Si-Sn [2].

*Целью настоящей работы* является исследование влияния режима спекания порошковых прессовок и последующего горячего их прессования на результирующую плотность, структуру и механические свойства композитов (Al-12Si)-Sn.

В качестве исходного материала в работе использовались промышленные порошки олова марки ПО 2 с размером частиц менее 45 мкм и порошки распылённого сплава эвтектического состава Al-12Si с размером частиц менее 80 мкм. После механического

смешивания данных порошков из них прессовались брикеты пористостью  $\approx 10\%$ , которые затем спекались в вакуумной печи. Содержание олова в исследуемых материалах составляло 10-40 вес.%. Механические свойства композитов определяли путем испытания на сжатие (ГОСТ 25.503-97) со скоростью 0,5 мм/мин на машине Walter+BaiAGLFM-125. Пористость образцов определяли методом их гидростатического взвешивания в дистиллированной воде.

Было установлено, что спекание брикетов Al-12Si-Sn при температуре выше эвтектической (577 °C) приводит к потере их формы и выпотеванию значительного количества жидкого олова. Поэтому спекание исследуемых композитов проводили при более низких температурах, отвечающих лишь частичному смачиванию алюминия оловом.

Обнаружено, что олово растекается по поверхности алюминиевых порошинок не в момент его расплавления, а при более высокой температуре и также не сразу, а в течение некоторого инкубационного периода. Поэтому порошковые брикеты подвергали предварительной выдержке в течение одного часа при 550 °C, при которой олово практически не выпотевает, но распространяется по прессовке. Не полное смачивание приводит к тому, что расплав не проникает на контакты между алюминиевыми частицами, но каркас из них оставался слабым, поскольку из-за низкой температуры шейки спекания практически не образовывались и медленно росли.

С целью упрочнения контактов за счёт ускорения диффузии атомов алюминия в твёрдой фазе и перекристаллизации их через жидкую фазу, брикеты нагревали до 570 °C. Одновременно, нагрев также приводил к уменьшению угла смачивания твердых частиц жидким оловом, и в результате их перегруппировки под влиянием возросших капиллярных сил пористость композитов (Al-12Si)-Sn снизилась на 2-3 % и практически более не менялась с увеличением времени выдержки при указанной температуре. Несмотря на это, прочность и пластичность спечённых длительное время образцов заметно увеличиваются, потому что между соседними твёрдыми частицами формируются и растут мостики сварки. За счет их образования возможности частиц твёрдой фазы к более плотной переукладке под действием капиллярных сил ограничиваются, но зато матричный каркас становится более прочным и связанным. Следовательно, спечённые образцы будут иметь тем меньше пор, чем плотнее будут их исходные сырые заготовки, однако этому препятствует высокая твёрдость порошков с большим содержанием кремния (Al-12Si).

Для повышения плотности спечённых брикетов (Al-12Si)-Sn они были подвергнуты горячему уплотнению при 200°C. Как результат, поры в композитах практически исчезли, что привело к значительному повышению прочности и пластичности материала (рис. 1). При этом механические свойства полученных материалов снижаются с увеличением концентрации в них мягкого олова, но остаются на достаточно высоком уровне и превышают свойства промышленных самосмазывающихся сплавов марок АО 20.

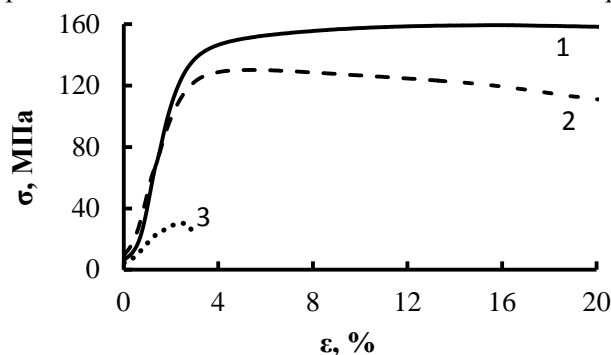


Рисунок 1 –Кривые сжатия композитов (Al-12Si)-Sn, спеченных по режиму: 550 °C; 1 ч + 570 °C; 10 мин. Концентрация олова, % вес.: 1 – 10; 2, 3 – 30. Образцы 1 и 2 доуплотнены при 200 °C под нагрузкой 10 т

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 пластичных антифрикционных композитов (Al-12Si)-XSn 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. Yuan G.-C., Zhang X.-M., Lou Y.-X., Li Z.-J. Tribological characteristics of new series of Al-Sn-Si alloys // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2003. – Vol. 13. – № 4. – P. 774–780.
2. Русин Н.М., Скоренцев А.Л., Криницын М.Г. Структура и механические свойства спечённого композита (Al-0,5 Si)-40 Sn // Перспективные материалы. – 2017. – № 2. – С. 30–38.

## **ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ Al-Ni, ПОЛУЧЕННЫХ ВОЗДУШНО-ПЛАЗМЕННЫМ НАПЫЛЕНИЕМ**

*О.А. РУБЦОВА*

Новосибирский государственный технический университет

E-mail: oksana.rubtsova@ya.ru

Эффективным методом нанесения покрытий является плазменное напыление. При помощи данной технологии можно напылять любые порошковые материалы. Использование в качестве рабочего газа воздуха (воздушно-плазменное напыление), позволяет не только удешевить технологию, но и получать качественные покрытия. Ранее было показано, что плазменные покрытия, сформированные из порошка  $Ni_3Al$ , характеризуются пористостью не менее 5...6 % [1]. Известно, что повысить плотность керамических и интерметаллидных покрытий можно, обеспечив более высокие скорости частиц в плазменной струе [2]. В настоящей работе представлены результаты структурных исследований покрытий из порошка ПН85Ю15 ( $Ni_3Al$ ), полученных воздушно-плазменным напылением на дозвуковом и сверхзвуковом режимах.

Материалом для формирования покрытий являлся порошок марки ПН85Ю15 размерами 40...100 мкм. Микрорентгеноспектральным анализом установлено, что количество никеля в исследуемом порошке около 70 ат. %, что соответствует двухфазной области диаграммы состояния Ni-Al. Воздушно-плазменное напыление выполняли в ИТПМ СО РАН. Ранее были определены оптимальные режимы напыления для выбранного порошка: ток дуги - 200 А; напряжение - 223 В; транспортирующий, фокусирующий и плазмообразующий газы – воздух, защитный газ - смесь воздуха и пропан-бутана. Дистанция напыления - 170 мм [3]. После напыления, для снижения уровня остаточных напряжений, проводили отжиг стальных труб с покрытиями при температуре 300 °С в течение 1 часа.

Изображение покрытий, полученных на дозвуковом и сверхзвуковом режимах, представлено на рисунке 1, а и б, соответственно. Видно, что дефектов в виде трещин и отслоений не наблюдается. Покрытия, полученные на дозвуковом режиме (рис. 1, а), характеризуются значительным количеством недеформированных частиц. Кроме того, наблюдаются выкрошившиеся в процессе приготовления шлифа частицы, что свидетельствует о слабой когезии. Пористость покрытий около 6 %.