

## ПОДАВЛЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ КАРБИДНОЙ ФАЗЫ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ УГЛЕАЛЮМИНИЕВОГО КОМПОЗИТА

А. И. Гомзин<sup>1</sup>, Р. Ф. Галлямова<sup>2</sup>, С. Н. Галышев<sup>3</sup>, Н. Г. Зарипов<sup>4</sup>

<sup>1</sup> andre-gomzi@yandex.ru

<sup>1-4</sup> ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

<sup>2</sup> ФГБУН «Уфимский институт химии РАН» (УФИХ)

<sup>3</sup> ФГБУН «Институт физики твердого тела РАН» (ИФТТ)

**Аннотация.** Рассматриваются способы, снижающие интенсивность образования карбида алюминия  $Al_4C_3$  при контакте углеродных материалов и жидкого алюминия, а именно углеродных волокон с алюминиевым расплавом при изготовлении углеалюминиевых композитов. Показана взаимосвязь между прочностью при изгибе и характером разрушения образцов композита, являющиеся следствием формирования карбидов алюминия.

**Ключевые слова:** композитный материал; алюминий; углеродное волокно; карбид алюминия; прочность при изгибе; инфильтрация; магний.

Композитные материалы на основе алюминиевых сплавов и углеродных волокон обладают высоким потенциалом для большого числа различных конструктивных применений, однако изготовление таких материалов осложнено, во-первых, отсутствием смачивания углеродных материалов расплавом алюминия, и, во-вторых, образованием карбидной фазы на границе «волокно–матрица». Карбид алюминия  $Al_4C_3$ , образующийся в результате химического взаимодействия углеродных волокон с расплавом алюминиевого сплава, обладает физическими и механическими свойствами, существенно отличающимися от свойств обоих компонентов композита, что приводит к значительному снижению прочностных характеристик углеалюминиевого композита [1–3]. И если проблема отсутствия смачивания углеродных волокон алюминиевым расплавом решается технологическими приемами (например, принудительной инфильтрацией под давлением), то подавление

образования карбидов в композите является одной из актуальных задач при создании таких материалов.

К настоящему времени известно несколько методов, ведущих к уменьшению количества карбида алюминия, формирующегося при изготовлении углеалюминия. Можно выделить 4 наиболее перспективных способа.

Первый способ – это легирование алюминиевого сплава элементами, препятствующими образованию  $Al_4C_3$  [4, 5]. К примеру, такими элементами могут являться магний и кремний. Однако легирование только в некоторой степени замедляет процесс образования карбидов, и хотя оно является одним из наиболее действенных приемов, применение исключительно данного метода не приведет к максимально возможным механическим свойствам композитного материала.

Другой способ предполагает использование в композите менее реакционноспо-

собного углеродного волокна. Судя по ряду работ, таким является волокно с повышенным модулем упругости. Высокомодульное углеродное волокно обладает большей степенью ориентации базисных атомных плоскостей углерода вдоль оси волокна (по крайней мере, в поверхностном слое), за счет чего на его поверхности находится меньше готовых зародышей для роста кристаллов карбида алюминия по сравнению с обычным волокном [2, 6, 7]. В данной работе высокомодульное волокно не использовалось.

Еще один метод борьбы с карбидом алюминия – это защитные покрытия, наносимые на углеродные волокна. Существует множество исследований, связанных с нанесением металлических покрытий на углеродные волокна из газовой фазы или электролитическим методом, однако это не самые эффективные способы ввиду сложности оборудования и других факторов [8, 9]. Перспективным является нанесение керамического покрытия на волокна с использованием золь-гель технологии, которая не требует специального дорогостоящего оборудования и создания особых условий [10]. В рамках данной работы этот метод не применялся, однако в целом исследования по золь-гель процессу ведутся.

Одним из основных способов уменьшения химического взаимодействия между матрицей и волокном является управление параметрами изготовления углеалюминиевого композитного материала (давление, температура, время контакта). Время контакта волокна с расплавом является одним из наиболее важных технологических параметров. Температура взаимодействия так же влияет на реакционную способность компонентов, однако ее нижний порог ограничен температурой кристаллизации алюминиевого сплава. Таким образом, необходимо стремиться к уменьшению времени взаимодействия расплава и углеродного волокна при изготовлении композита.

Получая волокнистый композит традиционным методом, при котором пропитка волокна происходит под действием давления, уменьшение времени взаимодействия трудноосуществимо, т.к. необходимо предварительно уложить волокно и алюминиевый сплав в форму, затем нагреть их и

выдерживать при повышенной температуре до момента расплавления сплава, а после – проводить операцию прессования и выдерживать заготовку некоторое время под давлением. Уменьшить время взаимодействия удастся методом, при котором происходит протягивание жгута из непрерывных углеродных волокон через расплав алюминиевого сплава под воздействием ультразвука [11]. При этом время контакта сокращается до нескольких десятков секунд и менее, что благоприятно сказывается на свойствах композита.

В данной работе сравнивались однонаправленные углеалюминиевые композиты, полученные двумя способами: традиционным методом жидкофазной инфильтрации под давлением и методом протягивания углеродного волокна через расплав под воздействием ультразвука. В случае инфильтрации под давлением в качестве матрицы был использован технически чистый алюминий, а в случае протягивания – расплав алюминия, легированный 6 % магния. В качестве армирующего компонента в обоих вариантах было использовано углеродное волокно марки УМТ49-12К-EP с обычным модулем упругости. В обоих случаях объемная доля волокна в композите составляла 30 %.

На снимках микроструктуры образцов углеалюминиевых композитов, полученных вышеупомянутыми методами, не наблюдалось каких-либо дефектов или непропитанных участков. И в том, и в другом случаях образцы в поперечном сечении имеют типичную для однонаправленного композита структуру (рис. 1).

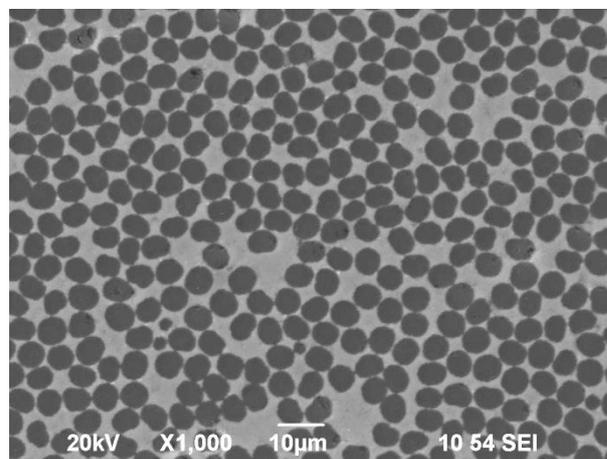


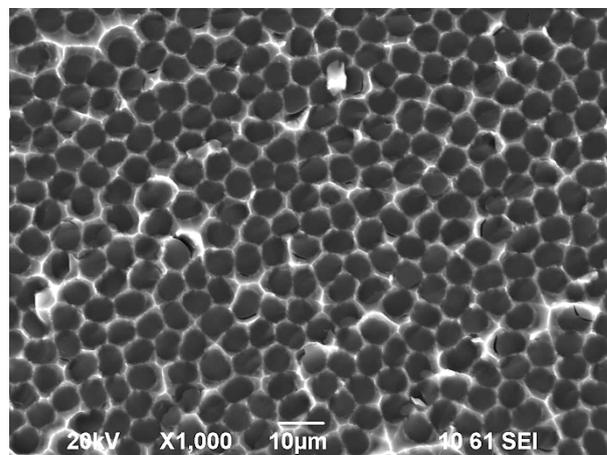
Рис. 1. Изображение микроструктуры углеалюминиевого композита в поперечном сечении (РЭМ)

После проведения механических испытаний на трехточечный изгиб было установлено, что образцы углеалюминиевой проволоки, полученные методом протягивания, показывают значительный рост прочностных характеристик по сравнению с образцами, полученными методом инфильтрации под давлением. Максимальная прочность образцов на изгиб, полученных при инфильтрации под давлением, составила 150 МПа, а при протягивании волокна через расплав с ультразвуком – 760 МПа. При этом фрактографические исследования показали, что характер изломов образцов композита коррелирует со значениями прочности. Так плоская поверхность разрушения указывает на большое количество карбидов при получении углеалюминия методом инфильтрации под давлением (рис. 2, а). Слишком высокая адгезия между волокном и матрицей приводит к легкому распространению трещины, являясь причиной хрупкого разрушения композитного материала (brittle fracture) и его низкой прочности. Развитая поверхность углеалюминиевых композитов (рис. 2, б), полученных протягиванием, косвенно указывает на образование лишь небольшого количества карбида алюминия на границе волокна и матрицы. Тип излома приближен к т.н. разрушению пучками (bundle fracture), который является показателем высокой диссипации энергии трещины, приводящей к росту прочностных характеристик [2, 11].

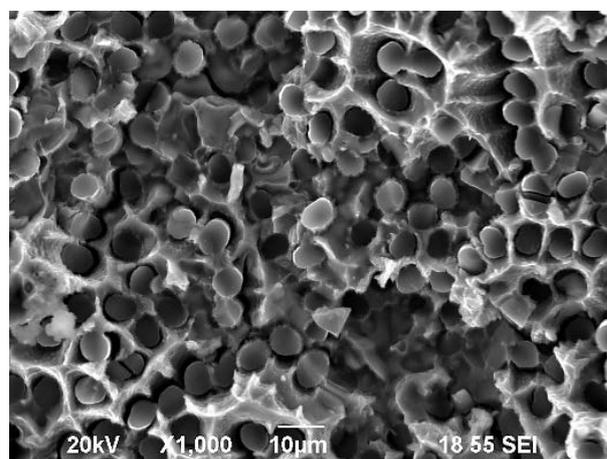
Однако метод протягивания волокна через расплав имеет и недостатки, одним из которых является то, что этим способом можно получать только проволоку. Хотя в дальнейшем из данной проволоки возможно создание углеалюминиевого композита с «иерархической» структурой, где в качестве армирующего компонента будут использоваться данные композитные проволоки, а в качестве матрицы можно использовать сплав того же или другого состава.

Тем не менее, уменьшение времени контакта и легирование сплава магнием приводит к существенному росту прочности композита. И здесь появляется необходимость оценки вклада каждого из методов подавления образования карбида алюминия в по-

вышение прочности углеалюминия. Для этого необходимо проведение дополнительных экспериментов с варьированием только одного из оцениваемых методов.



а



б

Рис. 2. Поверхности изломов образцов, полученных методами: а – инфильтрации под давлением; б – протягиванием волокна через расплав с УЗ-обработкой

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, развитие композитных материалов на основе углеродных волокон и алюминиевых сплавов является перспективным направлением, однако необходимо учитывать множество факторов и механизмов при их изготовлении, главным образом влияющих на формирование карбидной фазы на границе волокна и матрицы. В данной работе было показано, что изменение двух параметров (уменьшение времени контакта и легирование сплава магнием) может способствовать повышению прочности материала в 5 раз – со 150 до 760 МПа. Поэтому

при изготовлении углеалюминиевых композиций целесообразно комбинировать методы, способствующие подавлению образования карбида алюминия, в связи с чем в следующих исследованиях будут применены и другие способы подавления образования карбидов, такие как защитное покрытие и армирование сплава высокомолекулярным углеродным волокном, а также будут оцениваться относительные вклады в повышение прочности каждого из способов подавления в отдельности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vidal-Se'tif M. H., Lancin M., Marhic C., Valle R., Raviart J.-L., Daux J.-C., Rabinovitch M. On the role of brittle interfacial phases on the mechanical properties of carbon fibre reinforced Al-based matrix composites // *Materials Science and Engineering A*, 1999, vol. 272, pp. 321-333;
2. Feldhoff A., Pippel E., Woltersdorf J. Interface Engineering of Carbon Fiber Reinforced Mg-Al Alloys // *Advanced Engineering Materials*, 2000, vol. 2, no.8, pp. 471-480;
3. Yamaguchi S., Mikuni J., Mizoguchi I., Matsunaga T., Shinozaki K., Yoshida M. Influence of high temperature holding on tensile strength of PAN-based carbon fiber reinforced aluminum-magnesium alloy composites fabricated by ultrasonic infiltration method // *Journal of Japan Institute of Light Metals*, 2009, vol. 59, No. 5, pp. 241-247;
4. Revzin B., Fuks D., Pelleg J. Influence of alloying on the solubility of carbon fibers in aluminium-based composites: non-empirical approach // *Composites Science and Technology*, 1996, vol. 56, pp. 3-10;
5. Pelleg J., Ashkenazi D., Ganor M. The influence of a third element on the interface reactions in metal-matrix composites (MMC): Al-graphite system // *Materials Science and Engineering A*, 2000, vol. 281, pp. 239-247;
6. Yunhe Z., Gaohua W. Comparative study on the interface and mechanical properties of T700/Al and M40/Al composites // *Rare Metals*, 2010, vol. 29, no. 1, pp. 102-107;
7. Galyshev S. N., Gomzin A. I., Gallyamova R. F., Nazarov A. Yu., Vardanyan E. L., Musin F. F. On the strength of carbon-fiber/aluminum-matrix composite wire // *Composites & nanostructures*, 2018, vol. 10, no. 3, pp. 129-133;
8. Suzuki T., Umehara H., Hayashi R., Watanabe S. Mechanical properties and metallography of aluminum matrix composites reinforced by the Cu- or Ni-plating carbon multifilament // *Journal of Materials Research*, 1993, vol. 8, no. 10, pp. 2492 - 2498;
9. Hackl G., Gerhard H., Popovska N. Coating of carbon short fibers with thin ceramic layers by chemical vapor deposition // *Thin Solid Films*, 2006, vol. 513, pp. 217-222;
10. Gallyamova R. F., Galyshev S. N., Musin F. F., Badamshin A. G., Dokichev V. A. Investigation of protective coatings for carbon fibers by the sol-gel // *Solid State Phenomena: Materials Engineering and Technologies for Production and Processing IV*, 2018, pp. 1242-1247;

11. Matsunaga T., Ogata K., Hatayama T., Shinozaki K., Yoshida M. Infiltration mechanism of molten aluminum alloys into bundle of carbon fibers using ultrasonic infiltration method // *Journal of Japan Institute of Light Metals*, 2006, vol. 56, no. 4, pp. 226-232.

## ОБ АВТОРАХ

**ГОМЗИН Андрей Игоревич**, аспирант, инженер-исследователь каф. МифМ УГАТУ.

**ГАЛЛЯМОВА Рида Фадисовна**, аспирант УФИХ РАН, инженер-исследователь каф. МифМ УГАТУ.

**ГАЛЫШЕВ Сергей Николаевич**, канд. техн. наук, н.с. УГАТУ и ИФТТ РАН.

**ЗАРИПОВ Наиль Гарифьянович**, д-р физ.-мат. наук, проф. каф. МифМ, г.н.с. УГАТУ.

## METADATA

**Title:** Suppression of carbide phase formation during the Cf/Al composite fabrication

**Authors:** A. I. Gomzin <sup>1</sup>, R. F. Gallyamova <sup>2</sup>, S. N. Galyshev <sup>3</sup>, N. G. Zaripov <sup>4</sup>

**Affiliation:**

<sup>1-4</sup> Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia;

<sup>2</sup> Ufa Chemistry Institute of RAS, Russia;

<sup>3</sup> Institute of Solid State Physics of RAS, Russia.

**Email:** andre-gomzi@yandex.ru <sup>1</sup>

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 2 (21), pp. 34-37, 2019. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract:** Authors discusses methods that reduce the intensity of the aluminum carbide Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> formation during the contact of carbon materials and liquid aluminum, namely carbon fibers with aluminum melt at the fabrication of Cf/Al composites. The relationship between the bending strength and the fracture behavior of composite samples, which is a consequence of the aluminum carbides formation, is shown.

**Key words:** composite material; aluminum; carbon fiber; aluminum carbide; bending strength; infiltration; magnesium.

**About authors:**

**GOMZIN, Andrey Igorevich**, postgraduate student, engineer-researcher of the Department of Materials science and physics of metals, Ufa State Aviation Technical University

**GALLYAMOVA, Rida Fadisovna**, postgraduate student of Ufa Chemistry Institute of RAS, engineer-researcher of the Department of Materials science and physics of metals, Ufa State Aviation Technical University

**GALYSHEV, Sergey Nikolaevich**, candidate of technical Sciences, research scientist of Ufa State Aviation Technical University and Institute of Solid State Physics of RAS

**ZARIPOV, Nail Garifyanovich**, doctor of Physical and Mathematical sciences, professor of Department of Materials science and physics of metals, principal research scientist of Ufa State Aviation Technical University