

ISSN 0023-1118

# ХИМИЧЕСКИЕ ВОЛОКНА

Полимеры • Волокна • Текстиль • Композиты

**KHIMICHESKIE VOLOKNA**

**POLYMERS • FIBRES • TEXTILES • COMPOSITS**

[www.khimvol.su](http://www.khimvol.su)



2024

УДК 539.216:669.018.95

## ИССЛЕДОВАНИЕ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ СОЕДИНЕНИЯ В СЛОЕ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА СИСТЕМЫ АЛЮМИНИЙ – УГЛЕРОДНОЕ ВОЛОКНО

В.А. Липин\*, В.Н. Цеменко\*, С.В. Ганин\*\*, Ю.С. Карзина\*\*

\* Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна;

\*\* Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Для оценки прочности соединения в слое композиционных материалов системы алюминий – углеродное волокно твердофазным совмещением были изготовлены образцы из пластин алюминия, армированных углеродными волокнами в виде слоя ткани. Для улучшения сцепления между матрицей и армирующим материалом на ткань наносились покрытия на основе меди, никеля и алюминия различными методами. Получение слоистого материала производилось прессованием. В качестве метода жидкофазного совмещения компонентов применялась заливка жидкого алюминия в форму с жестко зафиксированными углеродными волокнами и последующая горячая пластическая деформация полученного слитка до размеров испытательных образцов. По результатам механических испытаний на растяжение установлено, что разрушение спрессованных образцов происходило по многократному механизму с «проскальзыванием» между слоями вследствие недостаточной адгезии. Прочностные характеристики таких материалов не превышали 100 МПа при сравнительно высокой пластичности. Литые образцы разрушались по однократному механизму, прочность адгезионного соединения у них была выше, условная продольная деформация не превышала 10%. Нанесение покрытий на углеродные волокна в виде ткани способствовало повышению сцепления между слоями, однако способы нанесения покрытий существенно не влияли на адгезионную прочность соединения, в большей степени на характер разрушения оказывает метод совмещения компонентов.

Важными направлениями материаловедения и машиностроения является создание композиционных материалов (КМ) с повышенными эксплуатационными характеристиками, такими как прочность, ударная вязкость и жесткость. Перспективными в данном направлении являются КМ на основе алюминия, в частности, волокнистые и слоистые КМ, которые находят все большее применение в авиастроении, судостроении, автомобилестроении и других отраслях промышленности. Слоистые алюмоматричные КМ весьма перспективны и дают возможность экономить дефицитные и дорогостоящие легированные стали, снижать массу требуемых материалов и конструкций, улучшать механические свойства изделий. Из поли- и биметаллов изготавливают листы, ленты, прутки, проволоки, трубы, фасонные профили, детали и конструкции различной конфигурации [1-3].

Основной целью создания КМ является получение материалов, сочетающих в себе характерные свойства всех компонентов. Прочность КМ с непрерывными волокнами в направлении армирования можно оценить по уравнению:

$$P_k = P_m V_m + P_b V_b \quad (1)$$

где  $V_m$  – объемная доля матрицы;  $V_b$  – объемная

доля волокна;  $P_k$ ,  $P_m$ ,  $P_b$  – прочность КМ, матрицы и волокна соответственно [4].

В случае использования пластичных металлических матриц и высокопрочного армированного компонента с увеличением объемной доли последнего увеличивается прочность КМ с сохранением высокой вязкости его разрушения. Однако реализация расчетных свойств КМ во многом определяется технологическим процессом его получения.

При получении КМ широко используются методы твердофазного и жидкофазного совмещения компонентов [5]. Алюминиевые матрицы позволяют за счет высокой пластичности реализовывать процессы диффузионной сварки под давлением, а вследствие низкой температуры плавления – методы литья [6]. Каждый из технологических методов имеет как свои достоинства, так и недостатки, которые связаны с особенностями формирования соединения на контактных поверхностях компонентов. Поэтому при выборе метода получения КМ необходимо учитывать еще и взаимодействие компонентов в области их контакта.

Качество соединения волокна и матрицы играет важную роль в получении необходимых прочностных свойств КМ. При этом тип связи формируется в зависимости от свойств компо-

Схемы изготовления образцов твердофазным совмещением компонентов

| Номер образца | Характеристика методики приготовления образца  | Усилие, кН |
|---------------|--|------------|
| 1             | Между пластинами алюминия помещалась углеродная ткань без предварительной обработки  | 1200       |
| 2             | Предварительно в ячейки углеродной ткани механически втерт порошок меди  | 1200       |
| 3             | Предварительно в ячейки углеродной ткани механически втерт порошок алюминия  | 1200       |
| 4             | Алюминиевая пластина без слоя углеродной ткани   | —          |
| 5             | Предварительно на углеродную ткань электрохимическим осаждением нанесён никель, а затем медь. Заготовка выдержана в печи при 400 °С в течение 40 мин | 1000       |
| 6             | Предварительно на углеродную ткань электрохимическим осаждением нанесена медь. Заготовка выдержана в печи при 400 °С в течение 40 мин                | 1000       |

нентов и технологических особенностей процессов получения КМ.

В процессе получения металлических КМ возможно формирование трех типов связи между волокном и матрицей:

– *механическое соединение (фрикционное)*; этот тип соединения может быть осуществлен с помощью различных способов усадки и деформации компонентов, которые могут обеспечить удовлетворительное соединение при наличии соответствующего выбора материалов; механическая связь может образовываться также при смачивании волокон жидкой матрицей в процессах литья [7, 8];

– *химическая диффузионная связь* заключается в ограниченном растворении одного компонента в другом; в зависимости от количества и местоположения дефектов этот тип соединения может быть эффективным [9, 10];

– *связь химической реакции* возникает в результате взаимодействия между продуктами реакции на границе раздела между волокном и матрицей с образованием хрупких соединений с толщиной ниже критической, что является эффективным способом торможения трещины [11, 12].

От качества связи между компонентами зависит не только прочность КМ, но и механизм его разрушения при предельных нагрузках, которое может быть однократным и множественным [4].

Целью настоящей работы явилась оценка адгезионной прочности соединения композиционного материала системы алюминий – углеродное волокно, полученного при твердофазном и жидкофазном соединении компонентов и влияние на механические свойства введения в состав КМ промежуточных слоев различными способами.

В качестве материала матрицы использовался алюминий марки А0 (алюминий технической чистоты) по ГОСТ 11069–2019.

Свойства волокон подбирали в зависимости от области применения КМ и армирующей матрицы. Непрерывные волокна представляли собой нити круглого поперечного сечения, которые соединяются вместе, образуя различные типы жгутов и тканей. Их получали из исходных волокон-прекурсоров с помощью высокотемпературного пиролиза. Выделяли непрерывные углеродные волокна, изготовленные на основе полиакрилонитрильного волокна (ПАН прекурсора) [2, 3]. Их основными преимуществами являются модуль упругости при растяжении ~344 гПа и высокий предел прочности ~2070 МПа). Кроме того ПАН волокна дают большой выход углерода ~68% от массы полимера.

Углеродные ткани изготавливали из углеродных волокон, в работе использовали ткань плотняного плетения. Для улучшения смачиваемости и адгезионной связи армирующего компонента с матричным материалом углеродная ткань подвергалась предварительной обработке – применялось электрохимическое осаждение (гальваническое покрытие).

Углеродную ткань помещали между пластинами алюминия размером 35×110 мм. Прессование образцов осуществляли на гидравлическом прессе ПСУ-125 с максимальным усилием 1250 кН, нагрев – в печи ПЛ20/12.5 [13] (рис.1). Использовали промежуточные слои из меди, никеля и алюминия между алюминиевой матрицей и углеродным волокном, нанесенные на волокно различными способами (таблица). Электролитические покрытия обладают некоторой пористостью, для достижения беспористого покрытия применяли попеременное осаждение нескольких

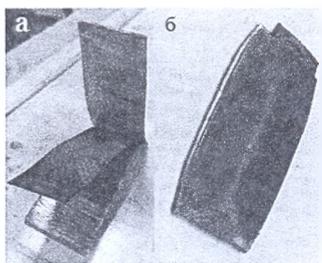


Рис. 1. Общий вид заготовок образцов:  
а – при сборке; б – после прессования.

слоев металлов. Для образцов 5 и 6 таблицы производили электрохимическое никелирование и/или меднение углеродной ткани.

Жидкофазное совмещение компонентов осуществлялось методом кокильного литья. Согласно этому методу в стальной кокиль (форма для отливки изделия), предварительно разогретый заливкой расплава алюминия при температуре 950 °С, погружалась углеродная ткань. Изготовленные отливки диаметром 8 мм пластически деформировались на лабораторном прокатном стане ДУО-250 [14] после предварительного нагрева в печи и выдержки при 400 °С в течение 15 мин. Конечная толщина образцов составляла 1 мм (рис. 2).

По этой схеме изготовлены три партии образцов для сравнительных испытаний: с медно-никелевым (образец 7), с никелевым покрытием (образец 8) и медным покрытием углеродной ткани (образец 9).

Твердофазные образцы выдерживались в печи при 400 °С в течение 40 мин, а жидкофазные при той же температуре – 15 мин. Это связано с тем, что жидкофазные образцы имели остаточную температуру после литья, а твердофазные изначально были комнатной температуры.

Механические испытания проводились при одноосном растяжении согласно ISO 6892-1:2019 со скоростью 2.5 мм/мин при комнатной температуре 23 °С на универсальной испытательной

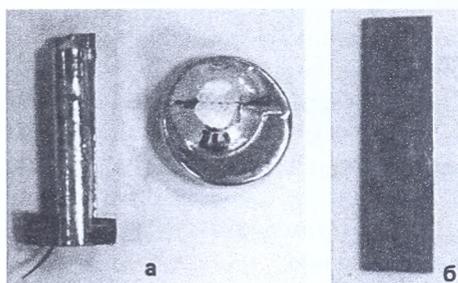


Рис. 2. Общий вид отливки:  
а – перед горячей прокаткой; б – после пластической деформации.

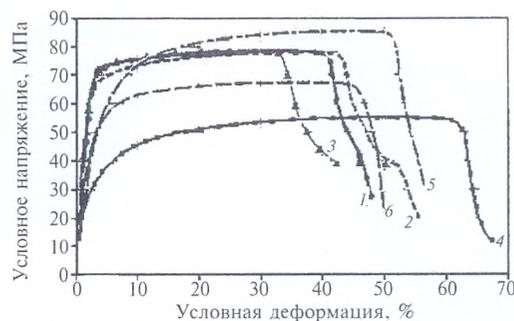


Рис. 3. Диаграмма растяжения образцов 1-6, полученных твердофазным совмещением.

машине ZwickRoell Z050 (Германия), рассчитанной на нагрузку 50 кН, обеспечивающей заданную скорость деформации и плавность нагружения образца [15].

Результаты механических испытаний образцов, изготовленных твердофазным совмещением компонентов, представлены на рис. 3. Как следует из приведенных диаграмм, прочность образцов 1-3 и 5, 6 выше прочности неармированного алюминия. Прочность образцов 1-3 одного уровня; это указывает на то, что механическое втирание порошка меди и алюминия не приводит к существенному повышению связи между пластинами алюминия и углеродной ткани. Несколько больший предел прочности наблюдается у образца 5 с гальваническим покрытием углеродной ткани слоем никеля и меди. Прочность образца 6 с гальваническим покрытием углеродной ткани медью хотя и превосходит прочность чистого алюминия, но несколько ниже прочности образцов 1-3.

Условная деформация до разрушения всех образцов КМ ниже, но соизмерима с деформацией чистого алюминия. Это может свидетельствовать о множественном разрушении армированных углеродной тканью образцов, которое сопровождается поэтапным разрывом продоль-

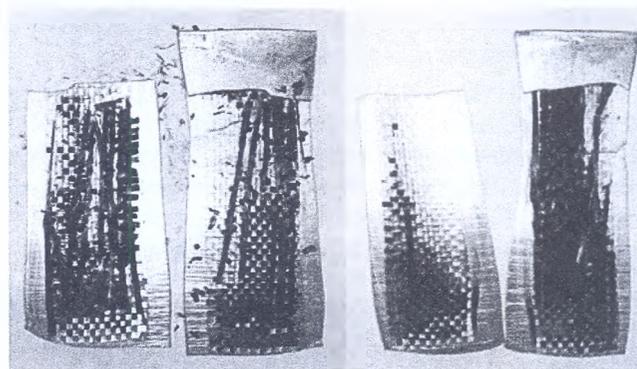


Рис. 4. Вид образцов, полученных твердофазным методом, после испытания на растяжение.



Рис. 5. Вид образцов, полученных жидкофазным методом, после испытания на растяжение.

ных волокон из-за значительных сил контактного трения, проскальзыванием и отслоением матричного материала при разрушении. Видимо, при растяжении начинает деформироваться пластичная матрица, волокна вследствие чисто механического сцепления тормозят процесс растяжения, повышая предел прочности композиции (рис. 4).

Иной характер разрушения наблюдается при растяжении образцов, полученных жидкофазным методом (рис. 5). Разрушение их при достижении предельной нагрузки происходит по однократному механизму. В этом случае приложенная нагрузка воспринимается в начальный момент продольными углеродными волокнами ткани вследствие достаточно высокой механической и адгезионной связи промежуточного слоя. По сравнению с образцами, полученными твердофазным совмещением, прочность таких образцов выше и находится на уровне 100 – 120 МПа (рис. 6). Разрыв продольного волокна локализует деформацию матричного материала, при этом условная деформация при разрушении образцов с никель-медным (образец 7) и медным (образец 9) покрытием углеродной ткани не превышает 6%, а с никелевым (образец 8) – 11%.

– Рассмотрены композиционные системы алюминий–углеродное волокно, полученные твердофазным и жидкофазным совмещением компонентов. Исследована адгезионная прочность соединения между алюминиевой матрицей и углеродным волокном в виде слоя ткани. На углеродную ткань наносились промежуточные слои из меди, никеля, алюминия механическим втиранием или гальваническим методом.

– Твердофазным совмещением компонентов под давлением получены шесть типов образцов с различными промежуточными слоями. Испытания при растяжении показали, что прочность всех образцов выше прочности неармированного алюминия. Установлено, что механи-

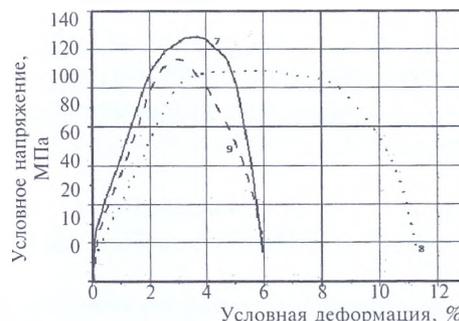


Рис. 6. Диаграмма растяжения образцов 7-9, полученных жидкофазным совмещением.

ческое втирание порошка меди и алюминия не приводит к существенному повышению связи между пластинами алюминия и углеродной ткани. Несколько больший предел прочности наблюдается у образцов с гальваническим покрытием углеродной ткани слоем никеля и меди. Условная деформация до разрушения всех образцов ниже, но соизмерима с деформацией чистого алюминия. Разрушение образцов происходит по множественному механизму, сопровождаясь поэтапным разрывом продольных волокон из-за значительных сил контактного трения, проскальзыванием и отслоением матричного материала от углеродной ткани.

Иной характер разрушения наблюдается при растяжении образцов, полученных жидкофазным методом. Разрушение при достижении предельной нагрузки происходило по однократному механизму. В этом случае приложенная нагрузка воспринимается в начальный момент продольными углеродными волокнами ткани вследствие достаточно высокой механической и адгезионной связи промежуточного слоя. По сравнению с образцами, полученными твердофазным совмещением, прочность таких образцов выше. Разрыв продольного волокна локализует деформацию матричного материала, при этом условная деформация при разрушении образцов с никель-медным и медным покрытием углеродной ткани существенно ниже деформации образцов, полученных твердофазным совмещением.

Таким образом, нанесение рассмотренных покрытий на ткань из углеродных волокон способствует повышению сцепления между слоями, однако способ нанесения существенно не влияет на адгезионную прочность соединения, в большей степени на характер разрушения оказывает влияние метод совмещения компонентов.

#### Библиографический список

1. Miracle D. // Composites Sci. a. Technol. 2005. V. 65. No. 15-16. – P. 2526-2540. DOI: 10.1016/j.compscitech.2005.05.027
2. Hoa S.V. Principles of the Manufacturing of Composite Materials, 2nd ed. – Pennsylvania, USA: DEStech

- Publications Inc. 2018. – 437 p.
3. *Chand S.* // *J. Materials Sci.* 2000. V. 35. N. 6. – P. 1303-1313. DOI: 10.1023/A:1004780301489
  4. *Matthews F.L., Rawlings R.D.* *Composite Materials: Engineering and Science.* – Woodhead Publishing Limited, 1999. – 480 p.
  5. *Garg P., Jamwal A., e. a.* // *J. Materials Res. a. Technol.* 2019. V. 8. – P. 4924-4939. DOI: 10.1016/j.jmrt.2019.06.028
  6. *Dobrzanski L.A., Kremzer M., e. a.* // *Archives Materials Sci. a. Eng.* 2009. V. 36. No. 1. – P. 5-11.
  7. *Okhuysen V.F.* // *Materials Proc. Technol.* 2004. V. 3. – P. 235-265.
  8. *Wielage B.* // *Composites Sci. a. Technol.* 1999. V. 59. No. 8. – P. 1239-1245.
  9. *Lancin M.* // *J. Europ. Ceramic Soc.* 2000. V. 20. No. 10. – P. 1493-1503.
  10. *Scott V., Trumper R., Yang M.* // *Composites Sci. a. Technol.* 1991.V. 42. No. 1-3. – P. 251-273.
  11. *El-Azim A.N.A., Kassem M.A., e. a.* // *Materials Letters.* 2002. V. 56. – P. 963-969.
  12. *Рудской А.И., Попович А.А., Григорьев А.В.* Композиционные материалы и покрытия: учебное пособие. – СПб: Изд. Политехнич. ун-та, 2017. – 222 с.
  13. *Иванов А.М., Александрова Е.С.* // *Вестник Брянского гос. технич. ун-та.* 2020. № 8. – С. 28-32. DOI: 10.30987/1999-8775-2020-8-28-32
  14. *Калиева И.Б., Ганин Д.Р.* // *Наука и производство Урала.* 2019. № 15. – С. 38-41.
  15. EN ISO 6892-1:2019. Metallic materials – Tensile testing. Part 1: Method of test at room temperature // *International Organization for Standardization.* 2019. – 87 p.