

Нефтегазовое дело. 2023. Т. 21, № 5. С. 182-191. ISSN 2073-0128 (print)

Petroleum Engineering. 2023. Vol. 21. No. 5. P. 182-191. ISSN 2073-0128 (print)

Научная статья

УДК 620.17:620.197:621.793.3:621.763:539.422.5

DOI: 10.17122/ngdelo-2023-5-182-191

## ИССЛЕДОВАНИЕ УГЛЕАЛЮМИНИЕВОГО КОМПОЗИТА С БАРЬЕРНЫМ ПОКРЫТИЕМ НА УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКНАХ

Рида Фадисовна Галлямова, Рустам Лутфуллович Сафиуллин,  
Владимир Анатольевич Докичев, Фаниль Фанусович Мусин

Уфимский Институт химии УФИЦ РАН, Уфа, Россия

**Автор, ответственный за переписку**

Рида Фадисовна Галлямова, rida\_gallyamova@mail.ru

**Аннотация.** Барьерные  $\text{SiO}_2$  покрытия на поверхности углеродных волокон были нанесены методом погружения из золь-гель растворов на основе тетраэтоксисилана  $\text{Si}(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_4$ . Средняя толщина барьерного  $\text{SiO}_2$  покрытия на углеродных волокнах составляет  $127 \pm 30$  нм. Углеалюминиевые композиты были получены методом пакетной формовки — разновидностью жидкофазной пропитки. Компоненты композита помещались в стальную герметичную оболочку, где после вакуумирования оболочки и нагрева до расплавления алюминия происходила инфильтрация волокон расплавом под действием внешнего давления с последующим охлаждением. Были получены композиты как с нанесенным на углеродные волокна  $\text{SiO}_2$  покрытием, так и без покрытия. После извлечения композита из металлической оболочки проводились исследования структуры, фазового состава и механических свойства образцов. Исследования структуры композитов показало, что все межволоконное пространство заполнено алюминиевым расплавом, пористость и макроскопические дефекты практически отсутствуют. Исследование фазового состава композита, армированного углеродными волокнами без покрытия, показало, что в композите наблюдаются пики карбида алюминия на углах  $2\theta = 41^\circ, 67^\circ, 74^\circ$ . Количественный анализ, проведенный методом Ритвельда, выявил, что в композите количество карбида алюминия составляет  $12,0 \pm 1,3$  %. Нанесение барьерного  $\text{SiO}_2$  покрытия на углеродные волокна приводит к уменьшению интенсивности основных пиков карбида алюминия, количество  $\text{Al}_4\text{C}_3$  при этом уменьшается в 4 раза, до 3,0 %. Анализ поверхности разрушения образцов после проведения механических испытаний выявил, что излом композита, армированного углеродными волокнами без покрытия, имеет плоский вид. На поверхности разрушения не наблюдаются выступов и рельефа. Поверхность разрушения композита, армированного покрытыми углеродными волокнами, имеет рельефную поверхность, наблюдаются отдельно торчащие волокна. Механические испытания образцов на трехточечный изгиб показали, что барьерное покрытие на волокнах увеличивает прочность до  $520 \pm 50$  МПа, прочность композита без покрытия составляет  $350 \pm 8$  МПа. Барьерное  $\text{SiO}_2$  покрытие, нанесенное на поверхность углеродных волокон, препятствует образованию карбида алюминия и деградации волокна в углеалюминиевом композите.

### Ключевые слова

углеалюминиевый композит;  
прочность; углеродное волокно;  
барьерное покрытие;  
оксид кремния

### Благодарности

Работа выполнена в рамках научно-исследовательских работ Уфимского Института химии РАН №122031400260-7 с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Химия» УФИХ РАН и РЦКП «Агидель» УФИЦ РАН.

### Для цитирования

Галлямова Р.Ф., Сафиуллин Р.Л., Докичев В.А., Мусин Ф.Ф. Исследование углеалюминиевого композита с барьерным покрытием на углеродных волокнах // Нефтегазовое дело. 2023. Т. 21, № 5. С. 182-191. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2023-5-182-191>.

© Галлямова Р.Ф., Сафиуллин Р.Л., Докичев В.А., Мусин Ф.Ф., 2023

Original article

## INVESTIGATION OF CARBON-ALUMINUM COMPOSITE WITH A BARRIER COATING ON CARBON FIBERS

Rida F. Gallyamova, Rustam L. Safiullin, Vladimir A. Dokichev, Fanil F. Musin

Ufa Institute of Chemistry UFRS RAS, Ufa, Russia

### Corresponding author

Rida F. Gallyamova, rida\_gallyamova@mail.ru

**Abstract.** Barrier  $\text{SiO}_2$  coatings on the surface of carbon fibers were deposited by the sol-gel solutions (dip coating) based on tetraethoxysilane  $\text{Si}(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_4$ . The average thickness of the barrier  $\text{SiO}_2$  coating on carbon fibers is  $127 \pm 30$  nm. Carbon-aluminum composites were obtained by a type of liquid-phase infiltration — by the shell molding process. The components of the composite were placed in a steel hermetic shell, then after the shell evacuate and heat until the aluminum melts, the fibers were infiltrated by the melt under the external pressure, followed by cooling. Composites with  $\text{SiO}_2$  coating and without coating on carbon fibers were obtained. After extracting the composite from the metal shell, the structure, phase composition, and mechanical properties of the samples were studied. Studies of the structure of composites showed that the interfiber space is filled with aluminum melt, without porosity and macroscopic defects. The study of the phase composition of the composite reinforced with uncoated carbon fibers showed that aluminum carbide peaks are observed at the angles  $2\theta = 41^\circ, 67^\circ, 74^\circ$ . Quantitative analysis carried out by the Rietveld method revealed that the amount of aluminum carbide in the composite is  $12.0 \pm 1.3$  %. The deposition of a barrier  $\text{SiO}_2$  coating on carbon fibers leads to a decrease in the intensity of the main peaks of aluminum carbide, while the amount of  $\text{Al}_4\text{C}_3$  decreases by 4 times, to 3.0 %. An analysis of the fracture surface of the samples after mechanical testing revealed that the fracture of the composite reinforced with uncoated carbon fibers is almost flat. No protrusions and relief are observed on the fracture surface. The fracture surface of a composite reinforced with coated carbon fibers has a relief surface, and separately sticking out fibers are observed. Mechanical tests of samples for three-point bending showed that the barrier coating on the fibers increases the strength to  $520 \pm 50$  MPa, the strength of the uncoated composite is  $350 \pm 8$  MPa. Barrier  $\text{SiO}_2$  coating applied to the surface of carbon fibers prevents the formation of aluminum carbide and fiber degradation in the carbon-aluminum composite.

### For citation

Gallyamova R.F., Safiullin R.L., Dokichev V.A., Musin F.F. Issledovanie uglealuminievogo kompozita s bar'ernym pokrytiem na uglerodnyh voloknah // [Investigation of carbon-aluminum composite with a barrier coating on carbon fibers] // *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2023, Vol. 21, No. 5. pp. 182-191. [in Russian]. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2023-5-182-191>.

### Введение

Применение композитных материалов открывает новые возможности для нефтегазовой промышленности за счет повышения коррозионной стойкости, прочности, гибкости конструкций и уменьшения общего веса. Одним из наиболее востребованных армирующих компонентов при создании керамических, полимерных, металлических композитов является углеродное волокно, обладающее высокой удельной прочностью и модулем

упругости, низким коэффициентом расширения и малым весом. В этой связи, алюминиевые композиты, армированные углеродным волокном, обладают высокими прочностными характеристиками, по сравнению с обычными материалами.

Основной проблемой при создании углеалюминиевых композитов является химическое взаимодействие между матрицей и волокном с образованием карбида алюминия  $\text{Al}_4\text{C}_3$ . Проблему образования карбида

### Keywords

carbon fiber; carbon-aluminum composite; strength; barrier coating; silicon dioxide

### Acknowledgements

The work was carried out within the framework of research work of the Ufa Institute of Chemistry of the Russian Academy of Sciences No. 122031400260-7 using the equipment of the CCU «Chemistry» of the UfChem RAS and the RCCU «Agidel» UFIC RAS.

возможно решить путем создания барьерного слоя на границе матрица/волокно.

Большинство ранних работ [1, 2], посвященных барьерным покрытиям, рассматривают металлические покрытия на основе меди и никеля, что связано с относительной простотой их нанесения электролизным или электролитическим методами. Однако вышеупомянутые металлы в результате контакта с расплавом алюминия образуют целый ряд интерметаллидных соединений, размер которых соизмерим с диаметром углеродного волокна, что в свою очередь значительно снижает армирующий эффект [3].

Нанесение покрытий с помощью методов химического осаждения из газовой фазы, таких покрытий как TiN, SiC, C-SiC-Si [4, 5] повышает прочность композитов при растяжении до 1250 МПа, что свидетельствует о перспективности керамических барьерных покрытий, однако сложность данной технологии ограничивает их практическое применение.

Более доступной с практической точки зрения является золь-гель технология, реализация которой не требует экстремальных условий. Золь-гель технология представляет собой жидкофазный процесс, который позволяет получать наноразмерные оксидные покрытия в комнатных условиях. В работе [6] получен углеалюминиевый композитный провод, армированный волокном с покрытием из  $Al_2O_3$ . Авторы показали, что применение оксидного покрытия увеличивает прочность композита с 808 МПа (без покрытия) до 900 МПа (с покрытием). Помимо покрытий из оксида алюминия с помощью золь-гель процесса также получают покрытия на основе  $SiO_2$  [7–9],  $TiO_2$  [10, 11] и  $ZrO_2$  [12], однако, как и в случае с другими золь-гель покрытиями, данные о прочности этих композитов отсутствуют.

Целью данной работы является исследование структуры и механических свойств полученного углеалюминиевого композита, армированного углеродными волокнами с покрытием на основе  $SiO_2$ .

#### Материалы и методы исследования

В работе использовались углеродные волокна марки UMT-49 российского производства (компания UMATEX, Россия). Поверхность углеродных волокон предварительно подвергали термической обработке для удаления полимерного аппрета. Волокна выдержи-

вались в муфельной печи СНОЛ 6/10 при температуре 400 °C в течение 20 мин.

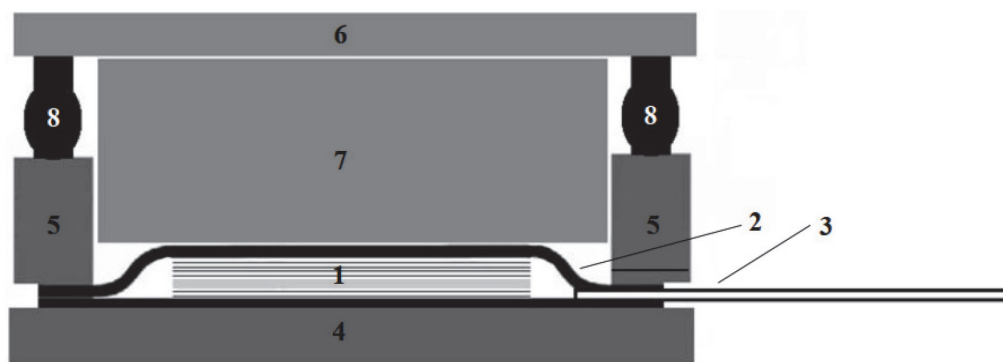
Барьерное  $SiO_2$  покрытие на волокнах получали с помощью метода золь-гель, где в качестве источника оксида кремния использовался тетраэтоксисилан  $Si(C_2H_5O)_4$ . Состав золя подробно описан в [13]. Покрытия, наносились методом погружения в золь, время выдержки составляло около 15 с., и затем волокна медленно извлекали из золя. Покрытые волокна сушили на воздухе в течение 30 минут и затем подвергали термической обработке при температуре 500 °C (скорость нагрева 2,5 °C/мин). Выдержка при температуре 500 °C составляла 1 час.

Углеалюминиевый композит был получен разновидностью жидкофазной пропитки — методом пакетной формовки. В качестве матрицы использовали технический чистый алюминий марки А7, в качестве армирующего компонента — углеродные волокна.

На рисунке 1 представлена схема процесса получения композита. В герметично сваренный «пакет» 2 из листов коррозионностойкой стали были заранее помещены компоненты композита 1 — углеродное волокно в виде однонаправленной ткани размерами 70×70 мм (рисунк 1) и алюминий. Закладываемая объемная доля волокна составляла 30 %. Через приваренную к пакету трубку 3 из полости с материалом откачивается воздух и на протяжении всего процесса получения композита. Пакет с материалом помещается в пресс-форму, состоящую из плоской квадратной нижней части 4 и верхней квадратной части — обжимной рамки 5. Пресс-форма с углеродным волокном и алюминием нагревается в печи, и по достижении температуры 750 °C выдерживаются в течение 15 мин. Далее нагрузка передается от подвижной плиты пресса (траверсы) 6 к пуансону 7, который деформирует стальной пакет. Давление, прикладываемое к пуансону, достигает 45 МПа. Подробнее метод описан в работах [14, 15].

Охлаждение композита происходит без снятия нагрузки в течение 10 мин в среднем до 300°C, затем в свободном режиме. После остывания композит извлекается из оболочки. В результате композит имеет форму пластины с размерами в среднем 70×70×3 мм.

Были получены композиты, армированные углеродными волокнами: без покрытия и с  $SiO_2$  покрытием. Полученные композиты впоследствии были разделены на 5 образцов рав-



**Рисунок 1.** Метод пакетной формовки

**Figure 1.** Batch molding method

ной ширины и равной длины вдоль направления укладки волокон для проведения механических испытаний на трехточечный изгиб по ГОСТР 56810-2015 «Композиты полимерные. Метод испытания на изгиб плоских образцов». Механические испытания на трехточечный изгиб углеалюминиевых образцов были проведены на статической разрывной машине Instron модели 5982 со скоростью перемещения траверсы 1 мм/мин.

Морфология поверхности образцов была исследована с помощью сканирующих электронных микроскопов (СЭМ) JSM-6490LV (JEOL, Япония), FEI Nova NanoSEM 450 (FEI Company, США). Микроструктуры исследуемых образцов были сняты в режимах вторичных электронов с ускоряющими напряжениями до 20кВ и при различных увеличениях. Качественная и количественная оценка содержания химических элементов проводилась с использованием системы для энергодисперсионного микроанализа INCA Energy (оснащен микроскоп JSM-6490LV).

Фазовый состав композитов определялся при комнатной температуре на рентгеновском дифрактометре SmartLab (Rigaku, Япония) в  $\text{Cu-K}\alpha$ -излучении в диапазоне углов  $2\theta = 10-100^\circ$ , шаг съемки составлял  $0,02^\circ$ . Анализ линий профиля дифрактограмм проводили с помощью программного обеспечения Match!Crystal Impact.

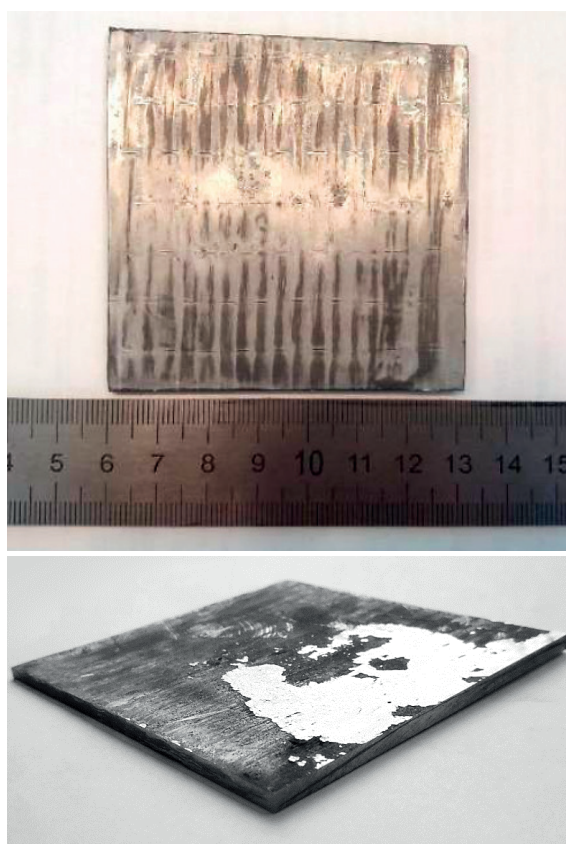
### Результаты

На рисунке 2 показан внешний вид полученного углеалюминиевого композита.

На рисунке 3 представлена микроструктура углеалюминиевого композита без покрытия и с покрытием  $\text{SiO}_2$ . Все межволоконное пространство композитов заполнено алюминиевым расплавом без каких-либо литейных

дефектов. Областей без пропитки не наблюдалось.

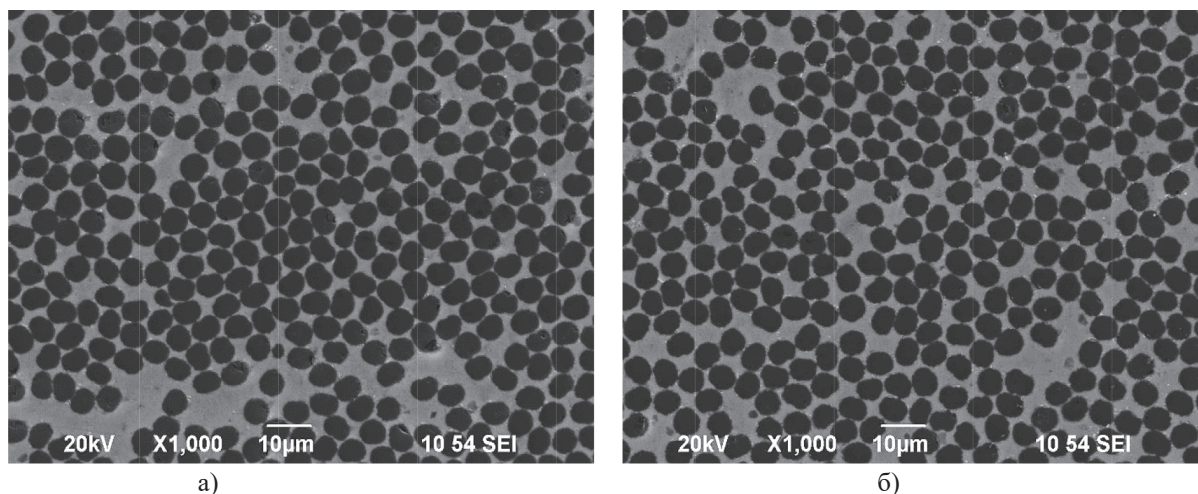
С помощью локального химического анализа была проведена оценка распределения химических элементов по границе раздела фаз волокно-покрытие-матрица (рисунок 3 а, б) в композитах. В алюминиевом композите, армированном углеродными волокнами с  $\text{SiO}_2$  покрытием, на границе между волокнами наблюдается рост кремния и кислорода, что подтверждает присутствие оксидного покрытия на волокне.



**Рисунок 2.** Пластина углеалюминиевого композита

**Figure 2.** Carbon aluminum composite plate

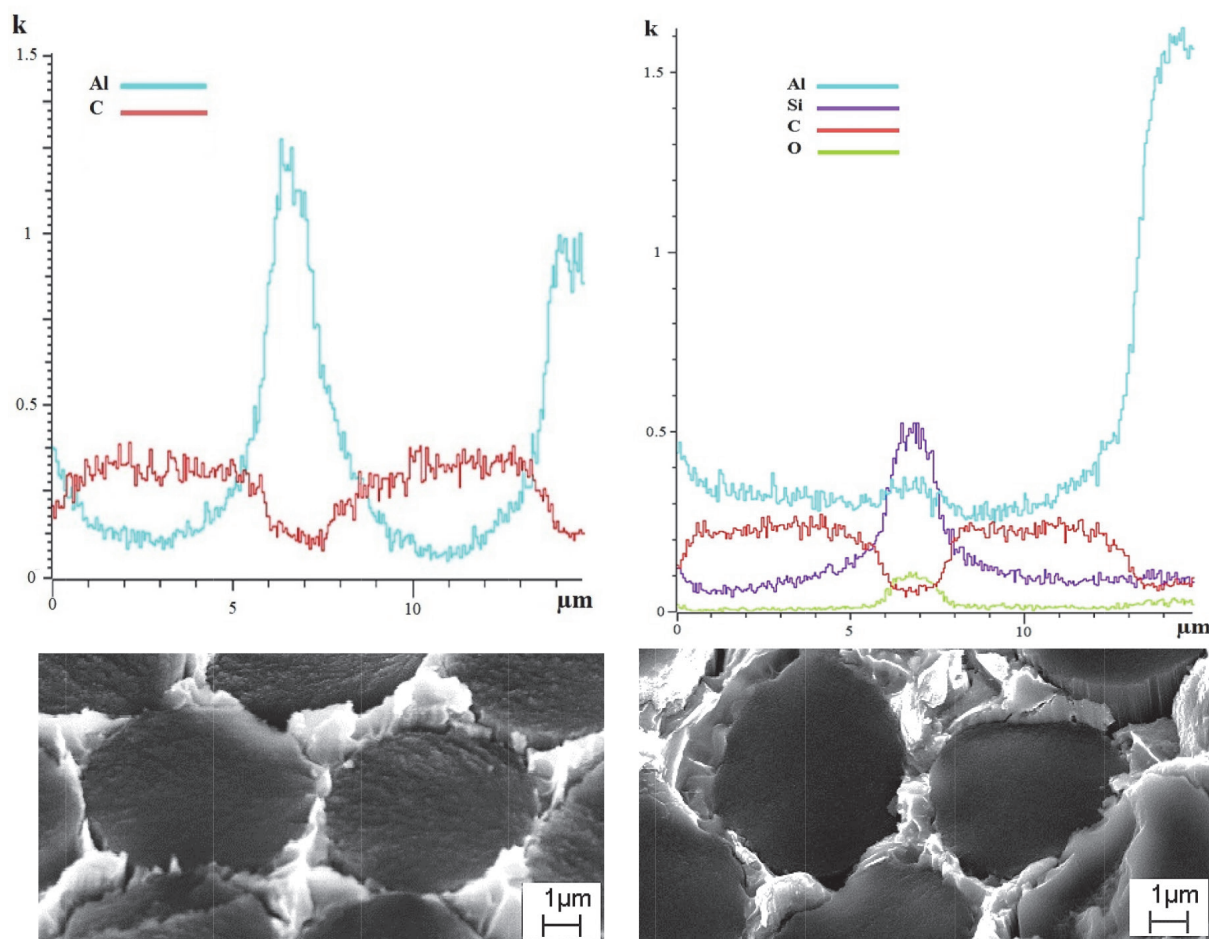




а) без покрытия; б) с покрытием  
a) uncoated; b) coated

**Рисунок 3.** Микроструктура углеалюминиевого композита

**Figure 3.** Microstructure of carbon-aluminum composite



а) без покрытия; б) с покрытием  
a) uncoated; b) coated

**Рисунок 4.** Распределение химических элементов на границе фаз волокно-покрытие-алюминиевая матрица

**Figure 4.** Distribution of chemical elements at the fiber-coating-aluminum matrix phase boundary

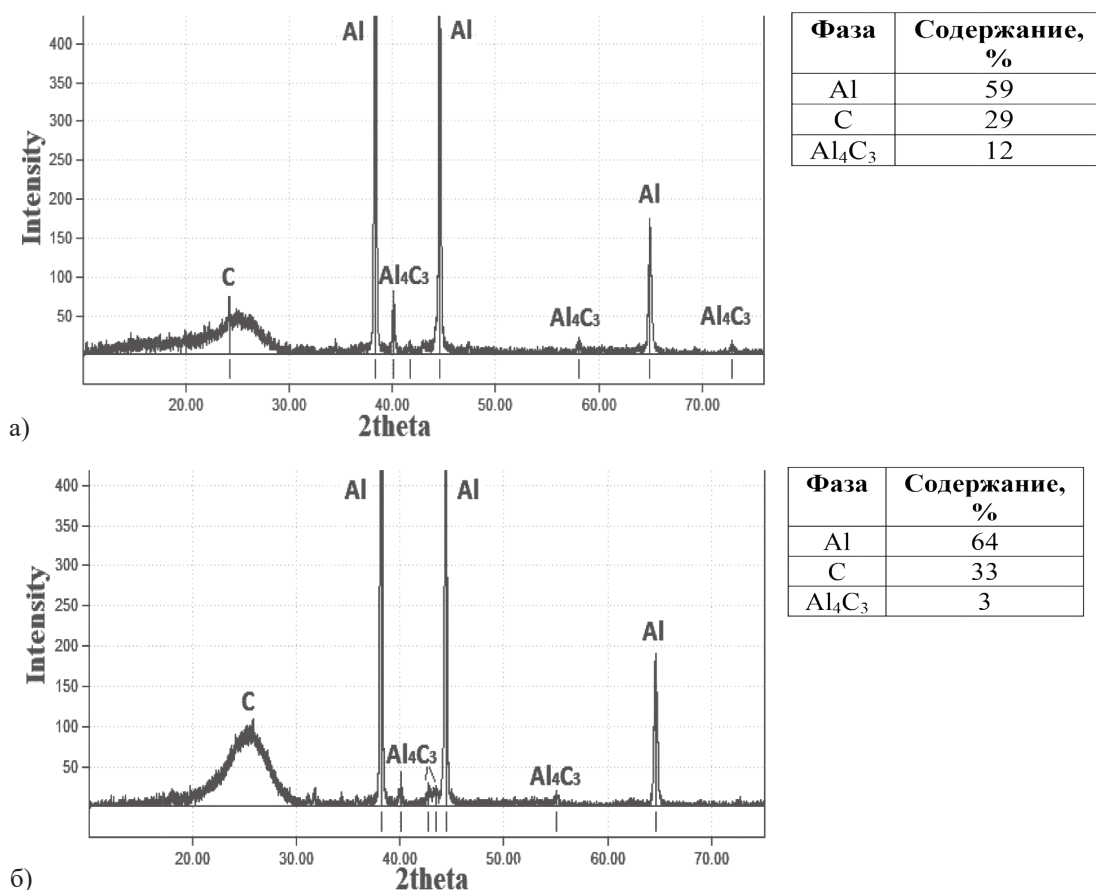
Дифрактограмма углеалюминиевого композита показана на рисунке 5. На дифрактограмме присутствуют интенсивные пики, принадлежащие матрице композита — алюминию при  $38^\circ$ ,  $44^\circ$ ,  $65^\circ$ ,  $78^\circ$  и аморфное гало при  $24\text{--}25^\circ$ , соответствующее углеродному волокну. Обнаружены пики при углах  $41^\circ$ ,  $67^\circ$ ,  $74^\circ$ , которые характерны для фазы  $\text{Al}_4\text{C}_3$  в композите без покрытия. На рентгенограмме композита с барьерным покрытием наблюдаются менее интенсивные пики карбида алюминия при углах  $41^\circ$  и  $67^\circ$ . Пики  $\text{SiO}_2$  покрытия не обнаружены (пики при углах  $21^\circ$  перекрываются с углеродным волокном), что вероятно связано с его малой толщиной.

Количество фаз в композитах рассчитывали с помощью метода Ритвельда. В композите без покрытия содержание  $\text{Al}_4\text{C}_3$  составляет 12 % (рисунок 5, а), что свидетельствует о химическом взаимодействии волокна и алюминиевой матрицы. После нанесения барьер-

ного покрытия на поверхность углеродных волокон количество  $\text{Al}_4\text{C}_3$  уменьшается и составляет 3 % (рисунок 5, б). Это означает, что в композите барьерное покрытие плотно сидит на поверхности волокна и препятствует образованию карбида алюминия.

Механические испытания на трехточечный изгиб показали, что барьерное покрытие влияет на прочность композита. В результате испытаний средняя прочность углеалюминиевых композитов при трехточечном изгибе составила  $350 \pm 8$ ,  $520 \pm 50$  МПа для образцов без покрытия и с  $\text{SiO}_2$  покрытиями, соответственно (рисунок 6, а). Удельная прочность образцов показана на рисунке 6, б, для сравнения приведены данные по удельной прочности для алюминия для ПАН углеродного волокна.

После проведения механических испытаний была установлена корреляция между типом поверхности разрушения материалов и их



а) без  $\text{SiO}_2$  покрытия; б) с  $\text{SiO}_2$  покрытием

a) without  $\text{SiO}_2$  coating; b) with  $\text{SiO}_2$  coating

Рисунок 5. Дифрактограммы углеалюминиевого композита

Figure 5. Carbon aluminum composite diffractograms

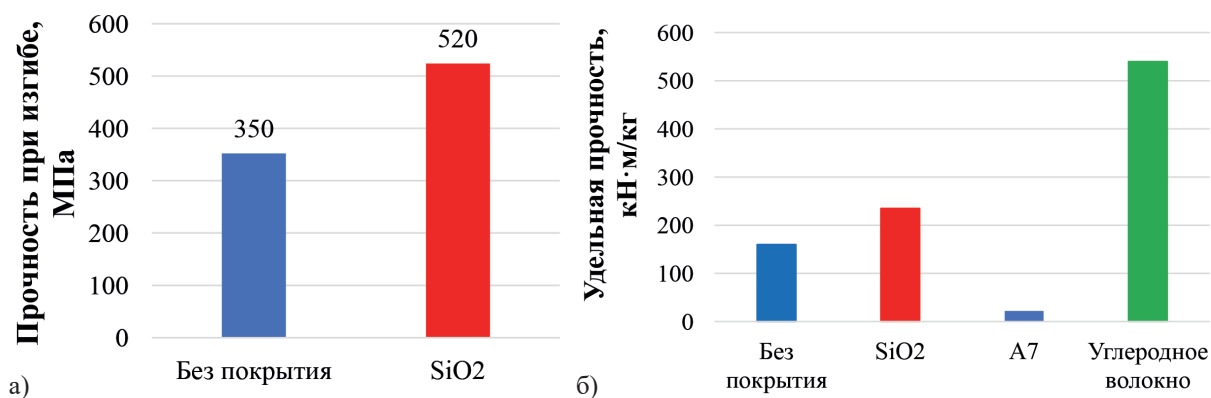


Рисунок 6. Средняя прочность (а) при трехточечном изгибе и удельная прочность (б) композитов

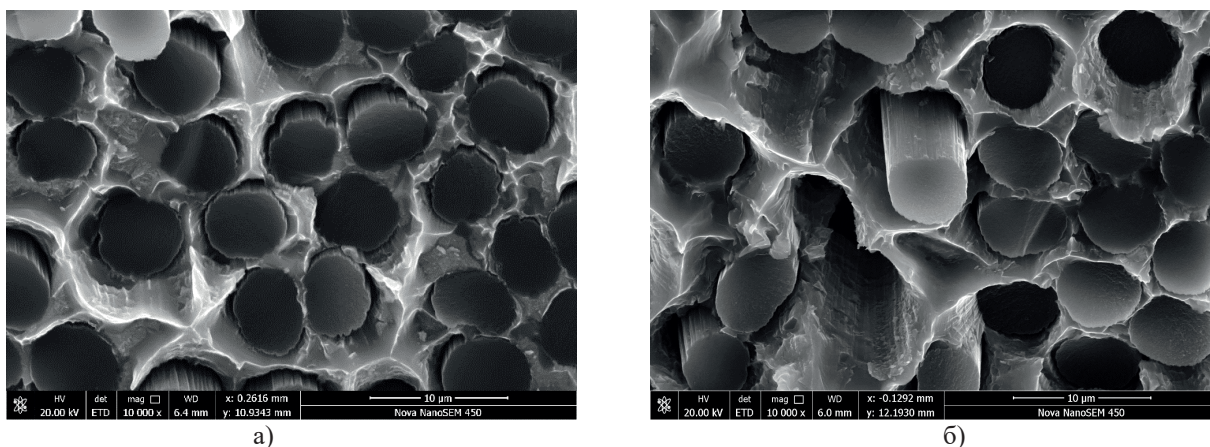
Figure 6. Average strength (a) at three-point bending and specific strength (b) of composites

прочностью: чем более рельеф на поверхность разрушения, тем большей прочностью обладает материал. Такая закономерность характерна для большинства композитов, что объясняется различной силой связи между углеродным волокном и алюминиевой матрицей [16–18].

На рисунке 7 показаны СЭМ-изображения образцов после испытаний на трехточечный изгиб. Анализ изломов после механических испытаний выявил, что поверхность разрушения композита, армированного углеродными волокнами без покрытия (рисунок 7, а) практически плоская, соответствует хрупкому излому. На поверхности разрушения не наблюдается рельеф и выступы. Хрупкий вид изломов соответствует низкой прочности композитов в результате высокой адгезии между волокном и матрицей из-за образовавшихся карбидов алюминия. Кристаллы  $Al_4C_3$

растут преимущественно на поверхности волокна и находятся в прямом контакте с матрицей. Показатели прочности коррелируют с поверхностями излома, указывающими на меньшую прочность межфазной связи.

Для поверхности разрушения композита, армированного углеродными волокнами с барьерным  $SiO_2$  покрытием (рисунок 7, б) характерно наличие рельефности. Волокна более свободно расположены в матрице, некоторые волокна торчат по сравнению с соседними в плоскости излома. Средняя прочность такого композита в 1,5 раза выше, чем у композита с непокрытыми волокнами. Это свидетельствует о том, что барьерное покрытие препятствует образованию карбида алюминия и деградации поверхности углеродного волокна. Полученные результаты коррелирует с данными рентгенофазового анализа.



а) без покрытия; б) с  $SiO_2$ -покрытием

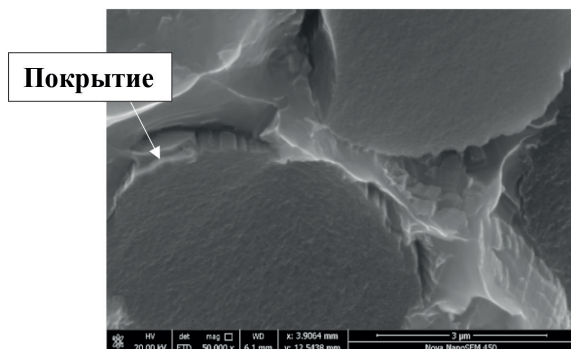
a) uncoated; b) with  $SiO_2$  coating

Рисунок 7. Поверхности разрушения образцов углеалюминиевых композитов с волокном

Figure 7. Fracture surfaces of samples of carbon-aluminum composites with fiber



На рисунке 8 показан фрагмент поверхности разрушения, где показана граница оксидного покрытия на углеродном волокне. Большая часть покрытия  $\text{SiO}_2$  остается на поверхности волокна, а на участках, где сплошность покрытия нарушена, вероятнее всего происходит взаимодействие алюминиевой матрицы и волокна.



**Рисунок 8.** Граница оксидного покрытия на углеродном волокне

**Figure 8.** Oxide coating boundary on carbon fiber

Таким образом,  $\text{SiO}_2$  покрытия были апробированы в агрессивных условиях жидкого алюминия при повышенной температуре при изготовлении углеалюминиевых композитов. В результате было установлено, что барьерное покрытие на основе оксида кремния позволяет повысить прочность при трехточечном изгибе в 1,5 раза.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Abraham S., Pal B.C., Satyanarayana K.G., Vaidyan V. K. Copper Coating On Carbon Fibres and Their Composites with Aluminium Matrix // *Journal of Material Science*. 1992. Vol. 27. P. 3479-3486.
2. 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. P. 2492-2498. DOI: 10.1557/JMR.1993.2492.
3. Huang Y., Ouyang Q., Zhang D., Zhu J., Li R., Yu H., Carbon Materials Reinforced Aluminum Composites: A Review // *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 2014. Vol. 27. P. 775-786. DOI: 10.1007/s40195-014-0160-1.
4. 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. P. 217-222. DOI: 10.1016/j.tsf.2006.02.001.
5. Yu J.K., Li H.L., Shanga B. L. A Functionally Gradient Coating on Carbon Fibre for C/Al Composites // *Journal of Material Science*. 1994. Vol. 29. P. 2641-2647.

#### Выводы

В результате проведенных исследований были сделаны следующие выводы.

1. Методом пакетной формовки были получены композиты с алюминиевой матрицей, армированные углеродными волокнами. Исследования структуры композитов показало, что все межволоконное пространство заполнено алюминиевым расплавом, пористость и макроскопические дефекты практически отсутствуют.

2. Нанесение барьерного покрытия на углеродные волокна предотвращает химическое взаимодействие углеродного волокна и алюминиевой матрицы. Фазовый анализ композитов показал, что в композите без покрытия количество карбида алюминия составляет  $12,0 \pm 1,3 \%$ , после нанесения барьерного покрытия на углеродные волокна количество карбидов уменьшается до  $3 \pm 0,1 \%$ .

3. Результаты механических испытаний на трехточечный изгиб показали, что барьерное  $\text{SiO}_2$  покрытие приводит к увеличению прочности композита. Предел прочности углеалюминиевого композита без покрытия составляет  $350 \pm 8$  МПа, с барьерным покрытием —  $520 \pm 50$  МПа. Покрытие, нанесенное на поверхность углеродных волокон, препятствует образованию карбида алюминия и деградации волокна в углеалюминиевом композите.

6. Zeng Q. Fabrication of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -coated carbon fiber-reinforced Al-matrix Composites // *Journal of Applied Polymer Science*. 1998. Vol. 70. P. 177-183. DOI: 10.1002/(SICI)1097-4628(19981003)70:1<177::AID-APP17>3.0.CO;2-4.

7. Gallyamova, R.F., Dokichev V.A., Safiullin R.L., Musin F.F. The Effect of the Concentration of Water in The Silica Sol-Gel Solution on the Formation of an Oxide Film on the Surface of Carbon Fibers // *Materials Today Proceeding*. 2021. Vol. 38. P. 1584-1587. DOI:10.1016/j.matpr.2020.08.156.

8. Gallyamova R., Safiullin R., Dokichev V., Musin F. Effect of Sol-Gel Solution Parameters on the Formation of Films on the Surface of Carbon Fibers // *MATEC Web of Conferences*. 2020. Vol. 315. P. 05001. DOI: 10.1051/mateconf/202031505001.

9. Kim B.-H., Yang K.S., Woo H.-G., Kim S.Y. Improvement of Anti- Oxidation Properties of Carbon Fibers by  $\text{SiC/SiO}_2$  Ceramic Coating // *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 2011. Vol. 11. P. 7119-7123. DOI: 10.1166/jnn.2011.4795.

10. Rajan T., Pillai R., Pai B. Reinforcement Coatings and Interfaces in Aluminium Metal Matrix Composites //



Journal of Materials Science. 1998. Vol. 33. P. 3491-3503. DOI: 10.1023/A:1004674822751.

11. Hu H., Pang B., Zhu Y., Fu. Y. Preparation of Titanium Dioxide Immobilized On Carbonfibers Annealed in Steam Ambient and Their Photocatalytic Properties // Textile Research Journal. 2016. Vol. 87. P. 2233-2241. DOI: 10.1177/0040517516669073.

12. Geiculescu C., Garth Spencer H., Rack H. J., Sullivan B. Aqueous Sol-Gel Coating of Pitch-Based Graphite Fibers for Inclusion in Aluminum Matrix Composites // Materials and Manufacturing Processes. 1999. Vol. 14. P. 489-507. DOI: 10.1080/10426919908914845.

13. Gadiou R., Serverin S., Gibot P., Vix-Guterl C. The Synthesis of SiC and TiC Protective Coatings for Carbon Fibers by the Reactive Replica Process // Journal of the European Ceramic Society. 2008. Vol. 28. P. 2265-2274. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2008.02.022.

14. Пат. 118571 РФ, МПК B21D 26/02 (2011.01). Приспособление к прессу для формовки/ В.В. Астанин, В.В. Астанин. 2011.43.128/02, Заявлен 25.10.2011; Опубл. 27.07.2012. Бюл. 21.

15. Galyshev S., Gomzin A., Musin F. Aluminum Matrix Composite Reinforced by Carbon Fibers // Materials Today: Proceedings. 2019. Vol. 11. P. 281-285. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.12.144.

16. Портной К.И., Салибеков С.Е., Светлов И.Л., Чубаров В.М. Структура и свойства композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1979. 255 с.

17. Feldhoff A. Structure and Composition of Ternary Carbides in Carbon Fibre Reinforced Mg-Al Alloys // Philosophical Magazine A. 1999. Vol. 79. P. 1263-1277. DOI: 10.1080/01418619908210360

18. Feldhoff A. Interface Engineering of Carbon-Fiber Reinforced Mg-Al Alloys // Advanced engineering materials. 2000. No 8. P. 471-480. DOI: 10.1002/1527-2648(200008)2:8<471::AID-ADEM471>3.0.CO;2-S.

## REFERENCES

1. Abraham S., Pal B. C., Satyanarayana K. G., Vaidyan V.K. Copper Coating on Carbon Fibres and Their Composites with Aluminium Matrix. *Journal of Material Science*, 1992, Vol. 27, pp. 3479-3486.

2. 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. DOI: 10.1557/JMR.1993.2492.

3. Huang Y., Ouyang Q., Zhang D., Zhu J., Li R., Yu H., Carbon Materials Reinforced Aluminum Composites: A Review. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2014, Vol. 27, pp. 775-786. DOI: 10.1007/s40195-014-0160-1.

4. 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. DOI: 10.1016/j.tsf.2006.02.001.

5. Yu J.K., Li H.L., Shanga B.L. A Functionally Gradient Coating On Carbon Fibre for C/Al Composites. *Journal of Material Science*, 1994, Vol. 29, pp. 2641-2647.

6. Zeng Q. Fabrication of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-coated Carbon Fiber-Reinforced Al-matrix Composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 1998, Vol. 70, pp. 177-183. DOI: 10.1002/(SICI)1097-4628(19981003)70:1<177::AID-APP17>3.0.CO;2-4.

7. Gallyamova, R. F., Dokichev V. A., Safiullin R. L., Musin F.F. The Effect of the Concentration of Water in The Silica Sol-Gel Solution on the Formation of an Oxide Film on the Surface of Carbon Fibers. *Materials Today Proceeding*, 2021, Vol. 38, pp. 1584-1587. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.08.156.

8. Gallyamova R., Safiullin R., Dokichev V., Musin F. Effect of Sol-Gel Solution Parameters on the Formation of Films on the Surface of Carbon Fibers. *MATEC Web of Conferences*, 2020, Vol. 315, pp. 05001. DOI: 10.1051/mateconf/202031505001.

9. Kim B.-H., Yang K.S., Woo H.-G., Kim S.Y. Improvement of Anti- Oxidation Properties of Carbon Fibers by SiC/SiO<sub>2</sub> Ceramic Coating. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2011, Vol. 11, pp. 7119-7123. DOI: 10.1166/jnn.2011.4795.

10. Rajan T., Pillai R., Pai B. Reinforcement Coatings and Interfaces in Aluminium Metal Matrix Composites. *Journal of Materials Science*, 1998, Vol. 33, pp. 3491-3503. DOI: 10.1023/A:1004674822751.

11. Hu H., Pang B., Zhu Y., Fu. Y. Preparation of Titanium Dioxide Immobilized On Carbon Fibers Annealed in Steam Ambient and Their Photocatalytic Properties. *Textile Research Journal*, 2016, Vol. 87, pp. 2233-2241. DOI: 10.1177/0040517516669073.

12. Geiculescu C., Garth Spencer H., Rack H. J., Sullivan B. Aqueous Sol-Gel Coating of Pitch-Based Graphite Fibers for Inclusion in Aluminum Matrix Composites. *Materials and Manufacturing Processes*, 1999, Vol. 14, pp. 489-507. DOI: 10.1080/10426919908914845.

13. Gadiou R., Serverin S., Gibot P., Vix-Guterl C. The synthesis of SiC and TiC protective coatings for carbon fibers by the reactive replica process. *Journal of the European Ceramic Society*, 2008, Vol. 28, pp. 2265-2274. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2008.02.022.

14. Astanin V.V., Astanin V.V. *Prisposobleniye k pressu dlya formovki* [Adaptation to the Molding Press] Patent RF, No. 118571, 2011. [in Russian].

15. Galyshev S., Gomzin A., Musin F. Aluminum Matrix Composite Reinforced by Carbon Fibers. *Materials Today: Proceedings*, 2019, Vol. 11, pp. 281-285. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.12.144.

16. Portnoy K.I., Salibekov S.E., Svetlov I.L., Chubarov V.M. *Struktura i svoystva kompozitsionnykh materialov* [Structure and Properties of Composite Materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. 255 p. [in Russian].

17. Feldhoff A. Structure and Composition of Ternary Carbides in Carbon Fibre Reinforced Mg-Al Alloys. *Philosophical Magazine A*, 1999, Vol. 79, pp. 1263-1277. DOI: 10.1080/01418619908210360

18. Feldhoff A. Interface Engineering of Carbon-Fiber Reinforced Mg-Al Alloys. *Advanced engineering materials*, 2000, No 8, pp. 471-480. DOI: 10.1002/1527-2648(200008)2:8<471::AID-ADEM471>3.0.CO;2-S.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Рида Фадисовна Галлямова**, младший научный сотрудник лаборатории биоорганической химии и катализа Уфимского института химии УФИЦ РАН, Уфа, Россия

**Rida F. Gallyamova**, junior researcher, Bioorganic chemistry and catalysis laboratory, Ufa Institute of Chemistry, Ufa Federal Research Center, Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia,

[rida\\_gallyamova@mail.ru](mailto:rida_gallyamova@mail.ru)

**Рустам Лутфуллович Сафиуллин**, доктор химических наук, заведующий лабораторией химической кинетики Уфимского института химии УФИЦ РАН, Уфа, Россия

**Rustam L. Safiullin**, doctor of chemical sciences, head of the Chemical kinetics laboratory, Ufa institute of chemistry, Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia

[director@anrb.ru](mailto:director@anrb.ru)

**Владимир Анатольевич Докичев**, доктор химических наук, профессор, заведующий лабораторией биоорганической химии и катализа Уфимского института химии УФИЦ РАН, Уфа, Россия

**Vladimir A. Dokichev**, doctor of chemistry sciences, professor, head of the laboratory of bioorganic chemistry and catalysis, Ufa institute of chemistry, Ufa federal research center of the Russian academy of sciences, Ufa, Russia

[dokichev@anrb.ru](mailto:dokichev@anrb.ru)

**Фаниль Фанусович Мусин**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории биоорганической химии и катализа Уфимского института химии УФИЦ РАН, Уфа, Россия

**Fanil F. Musin**, candidate of physical and mathematical sciences, senior researcher, Bioorganic chemistry and catalysis laboratory, Ufa institute of chemistry, Ufa federal research center of the Russian academy of sciences, Ufa, Russia

[f-musin@ya.ru](mailto:f-musin@ya.ru)

Статья поступила в редакцию 20.08.2023; одобрена после рецензирования 15.09.2023; принята к публикации 30.09.2023.

The article was submitted 20.08.2023; approved after reviewing 15.09.2023; accepted for publication 30.09.2023.