

И. В. Злобина, К. С. Бодягина, С. П. Павлов, Н. В. Бекренев

## ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ МЕЖФАЗНОЙ ЗОНЫ ОТВЕРЖДЕННОГО ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ПОД ДЕЙСТВИЕМ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЕГО ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

*Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., г.  
Саратов, Россия*

**Аннотация.** Приведены результаты расчета эффективного модуля сдвига и эффективного объемного модуля упругости полимерных композиционных материалов (ПКМ), армированных волокнами с использованием метода конечных элементов. Показано, что значение указанных параметров в основном определяется неоднородностью и относительной толщиной межфазного слоя (МФС) «волокно-матрица». При этом увеличение относительной толщины МФС практически не влияет на указанные параметры в случае монолитности его структуры. Наличие дефектов в виде пор приводит к снижению как модуля сдвига, так и объемного модуля. Пористость влияет на уменьшение указанных параметров в большей степени, чем толщина МФС: увеличение относительной толщины слоя в 2 раза при пористости 25% приводит к снижению модулей упругости на (9-10)%, в тоже время при пористости 75% аналогичное увеличение толщины МФС снижение модулей упругости на 79%. Установлено, что при одном и том же значении объема дефектов (пор) уменьшение их размеров приводит к увеличению прочности МФС, выражающемся в росте модуля сдвига на (14,6-23)% в зависимости от толщины при практически неизменной величине объемного модуля. Исследование методами электронной микроскопии при увеличении  $\times 5000$  микроструктуры полимерных композиционных материалов в области МФС после их взаимодействия с СВЧ электромагнитным полем частотой 2450 МГц в течение 2 минут выявило повышение плотности структуры матрицы и межфазного слоя. Пористость в МФС уменьшилась на (45-47)% при одновременном уменьшении размеров пор на 80-83%, размеры агломератов матрицы уменьшились на 23%, а их количество возросло на 15%. Указанные факты могут способствовать улучшению адгезионного взаимодействия волокон с матрицей. Методом конечных элементов выполнены расчеты модуля сдвига и объемного модуля с учетом определенных в эксперименте изменений микроструктуры МФС, показавшие увеличение указанных параметров ПКМ после воздействия СВЧ электромагнитного поля на (14-20)%, что удовлетворительно согласуется с полученными ранее результатами по увеличению прочности ПКМ при испытаниях на изгиб – (11-16)%, срез – (13-21)% и межслоевой сдвиг – (14-15)%. Выявленное изменение микроструктуры МФС, проявляющееся в снижении его пористости и увеличении точек контактного взаимодействия за счет роста количества мелкодисперсных агломератов, может быть предложено в качестве одного из механизмов повышения прочности отвержденных полимерных композиционных материалов после воздействия СВЧ электромагнитного поля.

**Ключевые слова:** микроструктура, СВЧ электромагнитное поле, матрица, армирующее волокно, межфазная зона, поверхность, плотность, агломераты, пористость, модуль сдвига, объемный модуль, метод конечных элементов, моделирование.

УДК: 621.039.419, 620.22.419, 537.868

### **Введение**

Анализ научно-технической литературы, материалов конференций и выставок свидетельствует о широком применении полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе углеродных волокон и стеклотканей в авиационной, автомобильной, судостроительной промышленности, ракетостроении и космической технике. Без опережающего развития технологий ПКМ невозможно создание перспективных технических систем. Наиболее высокие темпы роста будут характерны для термопластичных композитов на основе углепластиков, что повлечет за собой также реорганизацию технологического обеспечения производства изделий [1, 2]. Однако, вследствие определенного закона распределения компонентов, условий формирования и отверждения композиций, полученные материалы (и изделия из них) характеризуются анизотропией свойств, в частности, при высокой прочности на растяжение-сжатие значительно хуже воспринимают сдвигающие и изгибающие нагрузки, особенно в плоскости армирования, что определяется условиями контакта волокон и матрицы. Это вызывает необходимость дополнительного усиления конструкции в некоторых опасных участках, приводя к увеличению веса. Данный факт весьма нежелателен для изделий авиационной техники, что определяет повышенные требования к механической прочности конструктивных элементов, имеющих сложные формы, сильно влияющие на распределение опасных механических и температурных напряжений. Повышение прочностных и иных свойств обеспечивается путем оптимизации технологий синтеза и модифицирования волокон, разработки новых матричных материалов, разработки новых схем армирования. Однако, эти методы весьма трудоемки и сопряжены со значительными затратами, поскольку требуют длительных исследований сложных химических процессов и разработки нового технологического оборудования, а также перестройки отлаженного технологического процесса.

---

© Злобина И. В., Бодягина К. С., Павлов С. П., Бекренев Н. В., 2018

*Злобина Ирина Владимировна*

**e-mail:** irinka\_7\_@mail.ru, кандидат технических наук, доцент кафедры технической механики и деталей машин, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., г. Саратов, Россия.

*Бодягина Ксения Сергеевна*

**e-mail:** bodksen@mail.ru, аспирант, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., г. Саратов, Россия.

*Павлов Сергей Петрович*

**e-mail:** pspsar@yandex.ru, доктор физико-математических наук, профессор кафедры математики и моделирования, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., г. Саратов, Россия.

*Бекренев Николай Валерьевич*

**e-mail:** nikolaj.bekrenev@yandex.ru, доктор технических наук, заведующий кафедрой технической механики и деталей машин, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., г. Саратов, Россия.

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 17-03-00720 «Методология оптимизационного микроконструирования композиционных материалов для объектов сложной формы повышенной динамической прочности, послойно формируемых электротехнологическими методами».

Поступила 01.10.2018

### **Постановка задачи**

Для локального управляющего воздействия на структуру и прочностные свойства трехмерного или двумерного объектов из армированных волокнами ПКМ, возможно применение СВЧ электромагнитного поля. Однако, ряд научно-практических проблем применения данного метода в настоящее время остается не решенными. Проведенный анализ материалов отечественных и зарубежных научных публикаций [3-5] показывает, что наибольшее внимание в развитии исследований в области микроволновой обработки материалов уделяется поиску принципиально новых решений для применения данных технологий с целью замещения существующих методов термической обработки. Отмечается, что применение микроволновых технологий позволяет значительно улучшить качественные показатели при производстве многих видов материалов.

Исследованиями отечественных и зарубежных ученых [3-5], установлены закономерности модифицирующего влияния СВЧ электромагнитного поля на различные диэлектрические материалы, в том числе с проявлением как диэлектрического нагрева, так и нетепловых эффектов. Получены результаты повышения прочностных свойств композиционных неметаллических материалов путем микроволнового воздействия на компаунды на стадии отверждения ПКМ. Внедрение данного метода сопряжено с трудностями изменения существующих технологий синтеза компонентов и формования ПКМ, отмеченными выше.

Ранее авторами были проведены экспериментальные исследования [6-9] влияния СВЧ электромагнитного поля на прочность пултрузионного карбона и углепластика с квазиизотропной структурой. Установлено, что на оптимальных режимах воздействия, не вызывающих деструктивный нагрев объекта обработки, напряжения изгиба возрастают на 11-16%, напряжения среза – на 13-21%. При испытаниях на межслоевой сдвиг обработанные образцы выдерживают более высокие (на 14-15%) напряжения.

Очевидно, что механизмы указанного изменения прочностных характеристик могут проявляться через модифицирование структуры композиционного материала. Однако до настоящего времени мало внимания уделено количественной оценке изменения микроструктуры ПКМ в процессе СВЧ обработки после их окончательного отверждения, не рассмотрены теоретические аспекты данного процесса, что не позволяет достоверно выявить механизм отмеченных выше эффектов.

Причины появления упрочняющих эффектов в окончательно сформированном композиционном материале при воздействии СВЧ электромагнитного поля могут быть выявлены в ходе изучения микроструктуры образцов при помощи электронной микроскопии и компьютерного моделирования влияния изменений в межфазной зоне «матрица-волокно» методом конечных элементов.

Целью исследований явились определение степени влияния изменения структуры межфазного слоя (МФС) на модуль сдвига и объемный модуль упругости ПКМ путем конечно-элементного моделирования и сопоставительная количественная оценка варьирования характеристик микроструктуры отвержденных армированных углеродными волокнами композиционных материалов после их обработки в СВЧ электромагнитном поле промышленной частоты.

### **Теоретические положения**

На границе раздела матрицы и волокна композиционного материала (КМ) образуется межфазный слой (МФС) толщины  $h$  в виде дополнительной фазы. Эта фаза отличается по своим свойствам от фазы матрицы и фазы волокна (наполнителя).

Прочностные характеристики композитов в плоскости, перпендикулярной армированию волокнами, во многом определяются структурой и свойствами межфазного слоя, вследствие малой прочности волокон на изгиб и большей на несколько порядков, по сравнению с матрицей, прочностью на растяжение. То есть при сдвигающих и изгибающих нагрузках основной вклад в прочность ПКМ вносит адгезионная связь матрицы и наполнителя в области МФС. При малых поперечных размерах волокон влияние МФС на эффективные свойства композита может быть существенным. Например, для  $h/r_0 = 0,8$ , где  $r_0$  - радиус включения, межфазная объемная доля превышает 200% от объемной доли включения, так, что упругие свойства межфазного слоя доминируют над свойствами включения. Таким образом, в целом механические свойства ПКМ будут зависеть от отношения толщины МФС к размеру включения.

Основная идея расчета эффективных характеристик композиционного материала, имеющего периодическую структуру, состоит в том, что периодические поля напряжений и деформаций зависят от микроуровня задачи на периодической ячейке. Периодическую ячейку материала возможно проанализировать, используя технику асимптотической гомогенизации для усреднения сложного микроструктурного поведения упругой среды и определения макроскопических свойств композита, как например, в [10]. Для сложных микроструктур аналитическое определение напряжений и деформаций чрезвычайно трудно, поэтому часто гомогенизация проводится на основе численных методов, таких, например, как метод конечных элементов [11, 12].

Для дальнейших рассуждений сделаем следующие предположения: композит является линейно упругим, макроскопически трансверсально изотропным, как по механическим, так и тепловым параметрам. Начальные напряжения отсутствуют; волокнистый наполнитель является однородным, линейно упругим, изотропным и регулярно упакованным; матрица является однородной; линейно упругой, изотропной по механическим и тепловым параметрам.

Для композитов, состоящих из линейных упругих материалов, определяющие дифференциальные уравнения для гомогенного и микроструктурного представительного элемента состоят из линейных уравнений упругости. Рассмотрим элементарную периодическую ячейку, как составляющий анизотропный элемент ПКМ из армирующего включения и матрицы, многократно в нем повторяющийся.

В упругом режиме, макроскопическое поведение элементарной периодической ячейки из анизотропного материала можно охарактеризовать эффективным тензором напряжений  $\bar{\sigma}_{ij}$  и тензором деформации  $\bar{\varepsilon}_{ij}$  гомогенизированной среды. Они связаны между собой с помощью эффективного тензора упругости  $C_{ijkl}^e$ .

$$\bar{\sigma}_{ij} = C_{ijkl}^e \bar{\varepsilon}_{kl}, \quad (1)$$

где  $C_{ijkl}^e$  зависит от объемной доли наполнителя и микроструктуры элементарной ячейки.

Согласно [10] тензор эффективных упругих свойств может быть записан в виде:

$$C_{ijkl}^e = \frac{1}{|Y|} \int_Y \left( C_{ijkl} - C_{ijpq} \frac{\partial \chi_p^{kl}}{\partial y_q} \right) dY \quad (2)$$

где  $|Y|$  обозначает площадь элементарной ячейки,  $\chi_p^{kl}$  – периодическое поле допустимых смещений для случая нагружения  $kl$  удовлетворяющее следующему интегральному уравнению на элементарной периодической ячейке с периодическими граничными условиями:

$$\int_Y C_{ijpq} \frac{\partial \chi_p^{kl}}{\partial y_q} \frac{\partial v_i}{\partial y_j} dY = \int_Y C_{ijkl} \frac{\partial v_i}{\partial y_j} dY, \quad \forall v \in Y. \quad (3)$$

Здесь  $v$  является кинематически допустимым произвольным полем смещения.

Задача (3) может быть решена на элементарной ячейке методом конечных элементов.

Рассмотрим двумерную элементарную периодическую ячейку симметричной микроструктуры (рис. 1а) для изотропного материала. Для плоского деформированного состояния систему уравнений можно записать следующим образом

$$\begin{bmatrix} \bar{\sigma}_{11} \\ \bar{\sigma}_{22} \\ \bar{\sigma}_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{1111}^e & C_{1122}^e & 0 \\ C_{1122}^e & C_{1111}^e & 0 \\ 0 & 0 & C_{1212}^e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\varepsilon}_{11} \\ \bar{\varepsilon}_{22} \\ 2\bar{\varepsilon}_{12} \end{bmatrix} \quad (4)$$

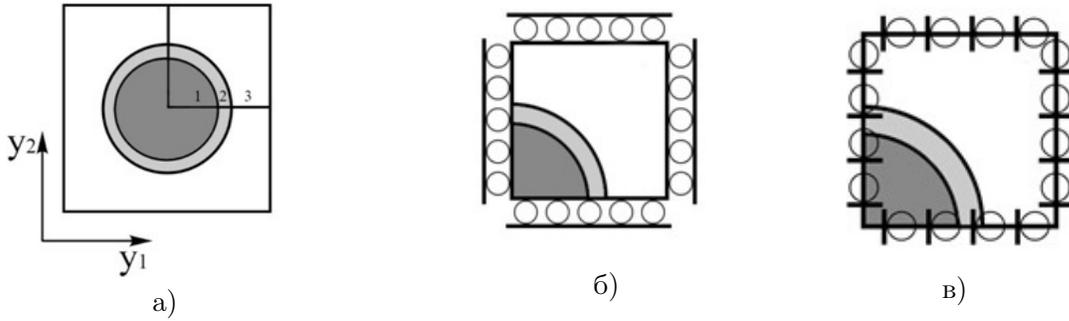


Рис. 1. Элементарная периодическая ячейка композита – (а) и граничные условия (б, в) на четверти базовой ячейки 1- включение, 2 – МФС, 3 - матрица

Для изотропного материала гомогенизированный упругий тензор  $C_{ijkl}^e$  имеет три компоненты  $C_{1111}^e$ ,  $C_{1122}^e$ ,  $C_{1212}^e$ . Если начальная деформация  $\varepsilon^0$  задается в направлении  $y_1$  ( $\varepsilon_{11}^0 = 1$ ,  $\varepsilon_{12}^0 = 0$ ,  $\varepsilon_{22}^0 = 0$ ), то из (2) следует:

$$C_{1111}^e = \frac{1}{|Y|} \int_Y \left( C_{1111} - C_{1111} \varepsilon_{11}^{*(11)} - C_{1122} \varepsilon_{22}^{*(11)} \right) dY \quad (5)$$

Рассматривая начальные напряжения  $\varepsilon^0$  в направлении  $y_2$  ( $\varepsilon_{11}^0 = 0$ ,  $\varepsilon_{12}^0 = 0$ ,  $\varepsilon_{22}^0 = 1$ ) для определения  $C_{1122}^e$  имеем:

$$C_{1122}^e = \frac{1}{|Y|} \int_Y \left( C_{1122} - C_{1111} \varepsilon_{11}^{*(22)} - C_{1122} \varepsilon_{22}^{*(22)} \right) dY \quad (6)$$

Если мы рассматриваем сдвиговые начальные напряжения  $\varepsilon^0$  ( $\varepsilon_{11}^0 = 0$ ,  $\varepsilon_{12}^0 = 0,5$ ,  $\varepsilon_{22}^0 = 0$ ), то:

$$C_{1212}^e = \frac{1}{|Y|} \int_Y \left( C_{1212} - 2C_{1212}\epsilon_{12}^{*(12)} \right) dY \quad (7)$$

С учетом вышеизложенного, согласно (4), получаем:

$$K^e = (C_{1111}^e + C_{1122}^e) / 2, G^e = C_{1212}^e / 2 \quad (8)$$

где  $K^e$  - эффективный объемный модуль,  $G^e$  - эффективный модуль сдвига.

На характеристические поля смещений  $\chi$  необходимо наложить соответствующие периодические граничные условия. Однако в случае, когда периодическая ячейка обладает симметрией, условия периодичности можно заменить более обычными граничными условиями. Так, если ПКМ состоит из изотропных компонентов, а периодическая ячейка имеет симметрию по двум осям, то задача (3) сводится к задаче на четверти ячейки. В случае плоского деформированного состояния для четвертой части элементарной ячейки, как это показано на рис. 1, эти граничные условия [12] для характеристической функции можно записать в виде: для случая нагрузки  $i = j$  (1 или 2) на  $y_1 = 0$ ,  $y_1 = Y_1 \chi_1^{(ij)} = 0$  и на  $y_2 = 0$ ,  $y_2 = Y_2 \chi_2^{(ij)} = 0$  (рис.1б); для случая нагрузки  $ij = 12$  (или 21) на  $y_1 = 0$ ,  $y_1 = Y_1 \chi_2^{(12)} = 0$  и на  $y_2 = 0$ ,  $y_2 = Y_2 \chi_1^{(12)} = 0$  (рис.1в).

Исследование влияния характеристик МФС на эффективные модули ПКМ проводилось на элементарной периодической ячейке размером  $0,1 \times 0,1$  мм для радиуса волокна  $r_0 = 0,04$  мм при разбиении на 2500 конечных элементов. Модуль Юнга для включения принят по литературным данным:  $E_{2,;} = 230$  ГПа (углеродное волокно), для матрицы -  $E_{\text{матр}} = 2$  ГПа (эпоксидная смола).

Расчеты показали, что увеличение толщины МФС снижает эффективные характеристики МФС, если модуль Юнга МФС меньше модуля Юнга матрицы.

Было произведено исследование влияние количества дефектов в МФС при общем размере зоны дефектов (общей пористости), равном 50%. Результаты для данного случая приведены в табл. 1. Из приведенных данных можно заметить, что дробление зоны дефектов на более мелкие элементы увеличивает эффективный модуль сдвига  $G^e$ , и практически не изменяет эффективный объемный модуль  $K^e$ .

По результатам расчетов построены графики (рис. 2 и 3), анализ которых позволяет отметить следующее.

Увеличение относительной толщины МФС практически не влияет на указанные параметры в случае его монолитной структуры. Наличие дефектов в виде пор приводит к снижению, как модуля сдвига, так и объемного модуля. Пористость влияет на уменьшение указанных параметров в большей степени, чем толщина МФС: увеличение относительной толщины слоя в 2 раза при пористости 25% приводит к снижению модулей упругости на (9-10)%, в тоже время при пористости 75% и аналогичном увеличении толщины МФС, наблюдается снижение модулей упругости на 79%. Установлено, что при одном и том же значении объема дефектов (пор) уменьшение их размеров приводит к увеличению прочности МФС, выражающемся в росте модуля сдвига на (14,6-23)% в зависимости от толщины МФС при практически неизменной величине объемного модуля.

Количество дефектов в МФС		$h/r_0$					
		0,1		0,15		0,2	
		$G^e$ , ГПа	$K^e$ , ГПа	$G^e$ , ГПа	$K^e$ , ГПа	$G^e$ , ГПа	$K^e$ , ГПа
	4	1.0173	2.2251	0.8921	2.1365	0.7709	2.0415
	6	1.1162	2.1994	1.0107	2.0813	0.9034	1.9648
	8	1.1667	2.2569	1.0572	2.1276	0.9478	2.0044

Таблица 1. Эффективные модули для ПКМ с различным количеством дефектов в МФС при общем их объеме, равном 50%

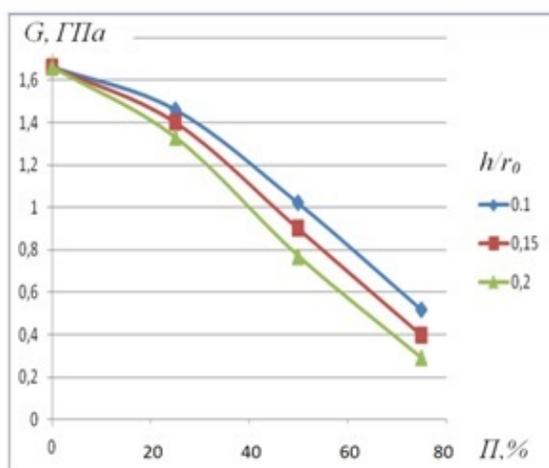


Рис. 2. Теоретическая зависимость модуля сдвига  $G$  от относительной толщины межфазного слоя  $h/r_0$  и его пористости  $P$

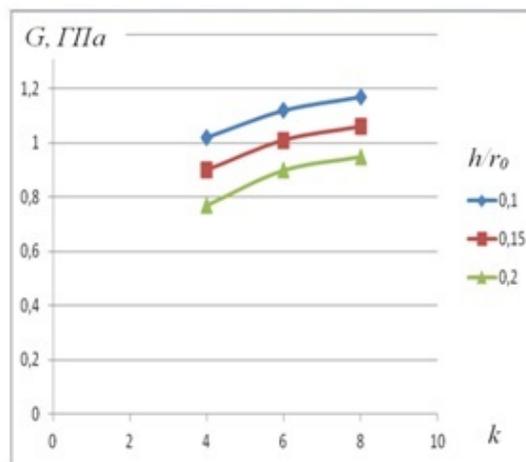


Рис. 3. Теоретическая зависимость модуля сдвига  $G$  от относительной толщины межфазного слоя  $h/r_0$  и количества контактных точек  $k$  при пористости межфазного слоя 50%

### Методика экспериментальных исследований

Для обоснования полученных ранее результатов по упрочнению в СВЧ электромагнитном поле отвержденных ПКМ [6-8] и подтверждения приведенных выше теоретических результатов нами выполнены исследования микроструктуры образцов при помощи электронной микроскопии. Исследовали образцы из отвержденного композита КМКУ-1.80.Э0,1, состоящего из матрицы на основе клеевого связующего ВК-51 и

наполнителя - углеродной ленты ЭЛУР-П-А с объемной долей наполнителя 70-75%. Использовали образцы в виде балок сечением 5 x 10 мм и длиной 70 мм. Эксперименты проводили с использованием специальной микроволновой установки «Жук-2-02» (ООО «АгроЭкоТех» г. Обнинск Калужской обл.) с излучающей антенной рупорного типа. Частота электромагнитного поля составляла 2450 МГц, мощность магнетрона – 1200 Вт. Обработку осуществляли на среднем уровне мощности при времени воздействия, обеспечивающем максимальный упрочняющий эффект [8]. Обработывали по 3 образца. Микроструктуру изучали при помощи электронного микроскопа MIRA II LMU (Tescan Ersay Holding, Чехия) в Лаборатории материалов специального назначения Саратовского государственного университета имени Н. Г. Чернышевского. Полученные микрофотографии транслировали в компьютерный анализатор изображений микроструктур АГПМ-6М и анализировали в программной среде Metallograph. С учетом увеличения электронного микроскопа от x5000 до x75000 стандартное поле зрения АГПМ-6М, равное 460 мкм пересчитывали с учетом переводного коэффициента. Для увеличения x5000 скорректированное поле зрения составило 40 мкм.

### Результаты и обсуждение

Анализ микроструктуры при различном увеличении позволил установить, что при максимальном увеличении (от x50000 до x75000) различия в структуре проявляются только в уменьшении размеров агломератов и повышенной рельефности поверхности волокон. При увеличении (x5000 и x10000) различия проявляются не только в части размеров элементов структуры, но и в части пористости. При увеличении x5000 также хорошо заметны различия в МФС «матрица-волокно», характеризующие монолитность композита и его «работоспособность» при воздействии поперечных нагрузок: пористость снижается с 25% у контрольного образца до 17% у обработанного, или в 1,47 раза, видно существенное увеличение контактной области адгезионного взаимодействия (рис. 4). Волокно контрольного образца практически свободно размещено в матрице, окружено кольцевой полостью. Можно выделить только 2-3 точечных контакта с общей протяженностью зоны адгезионного взаимодействия примерно на 10% поперечного сечения волокна. Волокно обработанного образца имеет зону адгезионного взаимодействия, равную 40-50% поперечного сечения. При увеличении x10000 ясно просматривается изменение пористости МФС обработанного образца за счет практического исчезновения в структуре крупных пор. В структуре МФС контрольного образца видны не только полости сложной формы, но и трещины в агломератах, вызванные релаксацией термических напряжений после отверждающей термообработки (рис. 5 и 6).

Усредненные изменения в структуре МФС обработанного в СВЧ электромагнитном поле образца приведены в табл. 2.

С учетом приведенных выше теоретических расчетов, показавших явную зависимость параметров прочности ПКМ от изменения точек контактного взаимодействия в МФС, из данных табл. 2 определено предположительное количество точек контакта агломератов с учетом изменения пористости МФС и их количества: 518 для контрольного образца и 662 для обработанного. Таким образом, ожидаемое увеличение адгезионной прочности МФС составляет для принятых условий эксперимента 1,28, или 28%.

С использованием метода конечных элементов выполнены расчеты модуля сдвига и объемного модуля с учетом определенных по результатам экспериментов параметров МФС (изменение пористости слоя и количества точек контактного взаимодействия).

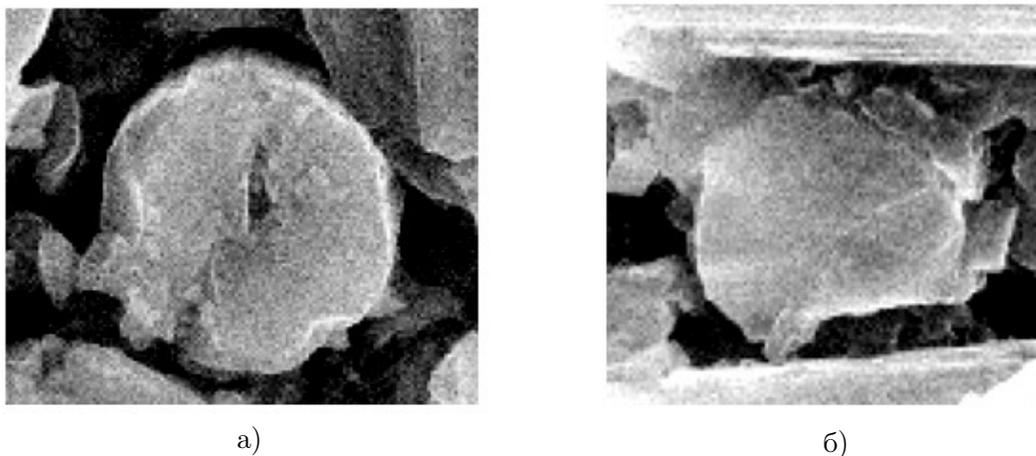


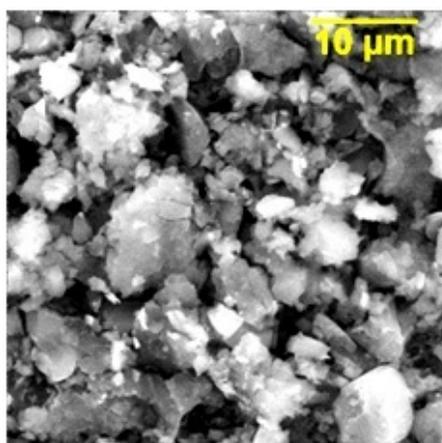
Рис. 4. Зона МФС контрольного (а) и обработанного (б) образцов

Состояние образца	Пористость, %	Средний размер агломератов, мкм	Количество агломератов в поле зрения 40x40 мкм	Дисперсия размеров агломератов, мкм <sup>2</sup>
Контрольный	25	2,1	691	6,4
Обработанный	17	1,7	797	4,3
Изменение	- 47%	- 23,5%	+ 15%	-49%

Таблица 2. Изменения в элементах микроструктуры межфазного слоя обработанного образца по сравнению с контрольным

По техническим причинам, а также с учетом того, что в эксперименте получено количество контактных точек во всем поле зрения, а не только в зоне одного волокна, рассматривалась элементарная ячейка, в которой принято до обработки 16 точек контакта, а после обработки – 20, т.е. увеличение составило 25%, что близко к усредненным экспериментальным данным (28%). Элементарные ячейки для контрольного и обработанного образцов и результаты расчетов представлены на рис. 7, расчетные зависимости – на рис. 8 и 9.

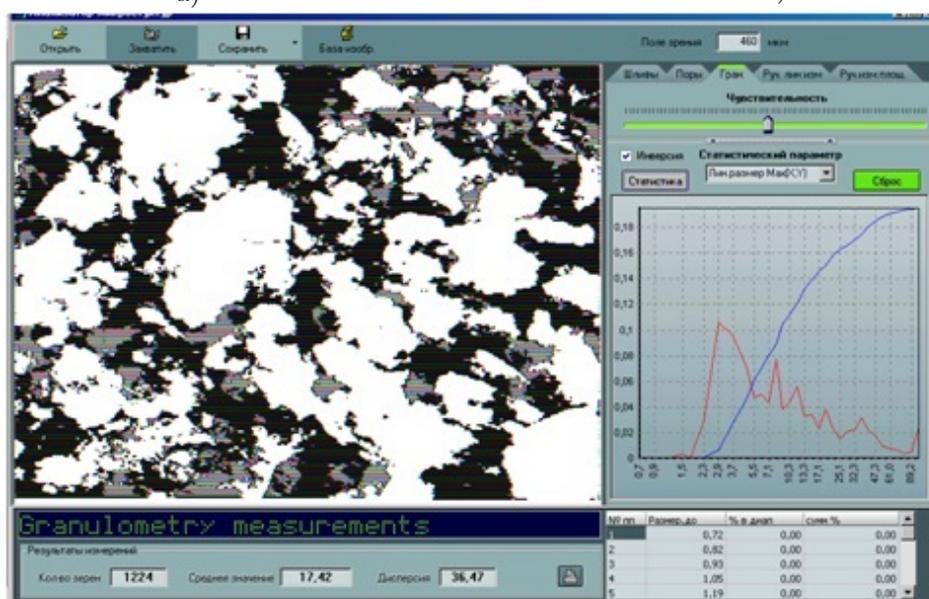
Видно, что как модуль сдвига, так и объемный модуль обработанного образца превышают аналогичные параметры контрольного образца соответственно на (20-16,7)% и (20-14)% в зависимости от толщины МФС. При этом толщина МФС в меньшей степени влияет на увеличение модуля сдвига. Также установлено, что для обработанных в СВЧ электромагнитном поле образцов ПКМ характерна большая зависимость как параметра  $G$ , так и параметра  $K$  от относительной толщины МФС. Для контрольного образца с увеличением толщины МФС с 0,1 до 0,2 исследуемые параметры снижаются соответственно на 24,2% и 13,9%, в то время, как для обработанного образца – на 28% и 20%. Данный факт нуждается в дальнейшем изучении.



а)



б)



в)

Рис. 5. Микроструктура контрольного образца при увеличении  $\times 10000$  (а), распределение агломератов по размерам (б) и размеры пор (в)

На основе проведенного анализа можно предложить следующий механизм влияния СВЧ электромагнитного поля на отвержденные армированные углеродными волокнами ПКМ. Электромагнитные поля СВЧ диапазона, при воздействии на диэлектрические материалы вызывают поляризацию их молекул, образующих диполи и выстраивающиеся вдоль силовых линий. При этом колебания поля приводят к колебаниям диполей, которые в свою очередь, через определенное число циклов могут разрываться с образованием отдельных фрагментов, кластеров и увеличивают таким образом площадь контактной поверхности. Влияя на межкомпонентные связи, в

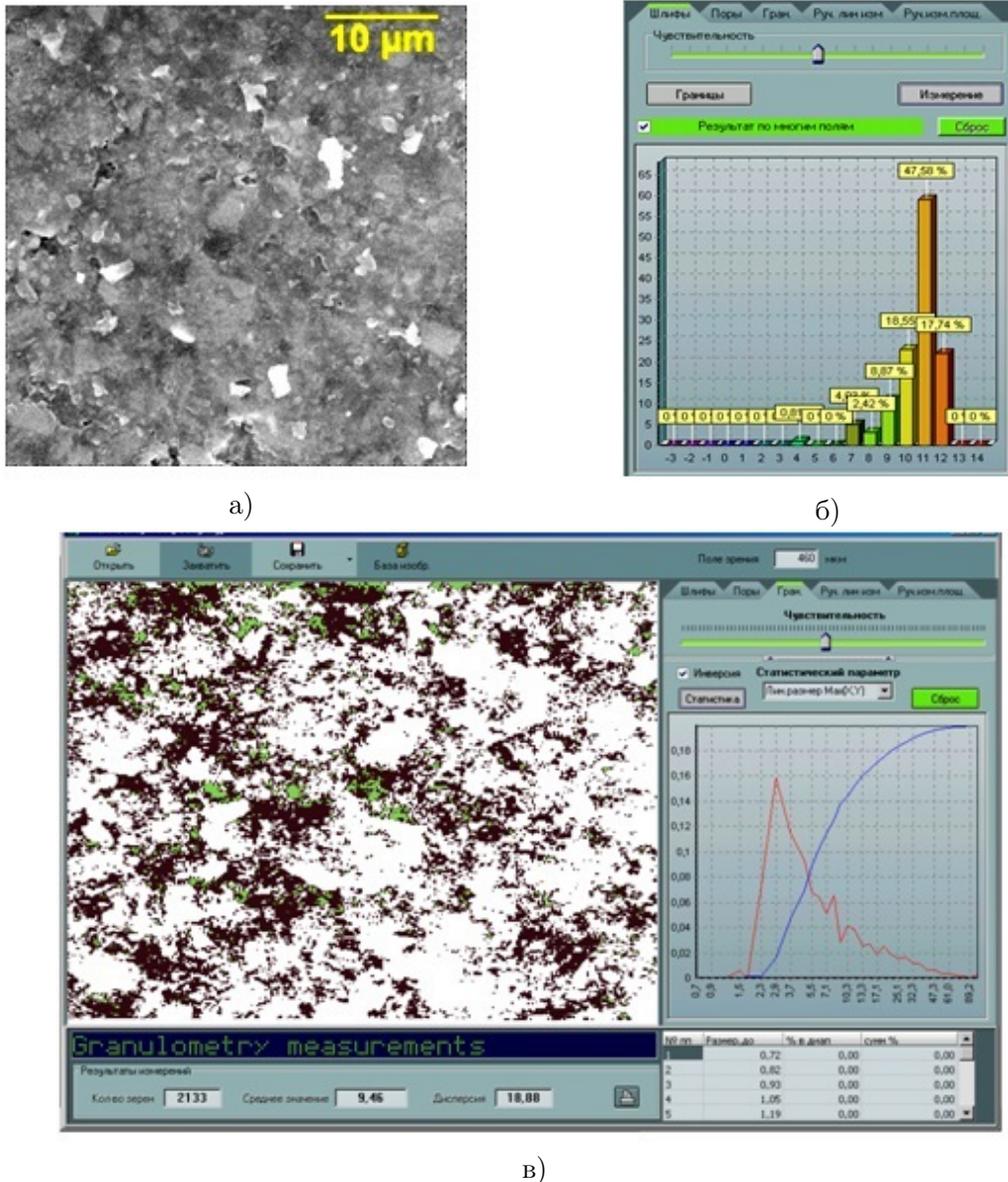


Рис. 6. Микроструктура обработанного образца при увеличении  $\times 10000$  (а), распределение агломератов по размерам (б) и размеры пор (в)

том числе на уровне нанокластеров, возможно увеличить число контактных точек в межфазном слое, а также «залечить» микродефекты, образовавшиеся при отверждении композиции, т.е. управлять свойствами готового материального объекта сложной структуры. В данном направлении целесообразно проведение дополнительных исследований для построения уточненного выявления механизмов взаимодействия СВЧ электромагнитного поля технологического диапазона параметров с неоднородными по физико-механическим, тепло- и электрофизическим свойствам материалам.

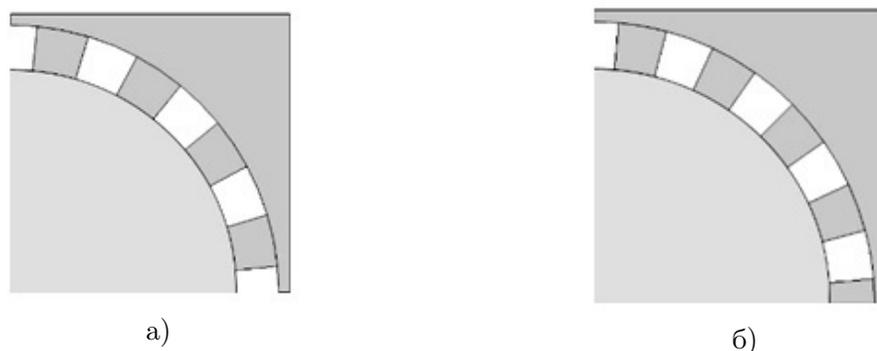


Рис. 7. Элементарная ячейка контрольного (а) и обработанного в СВЧ электромагнитном поле (б) образцов ПКМ

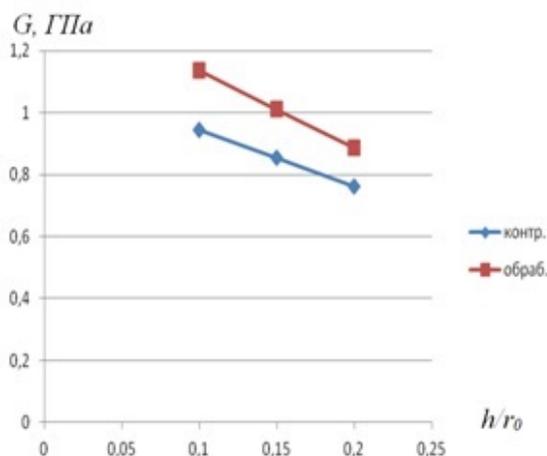


Рис. 8. Влияние СВЧ обработки на зависимость модуля сдвига  $G$  от толщины межфазного слоя  $h/r_0$

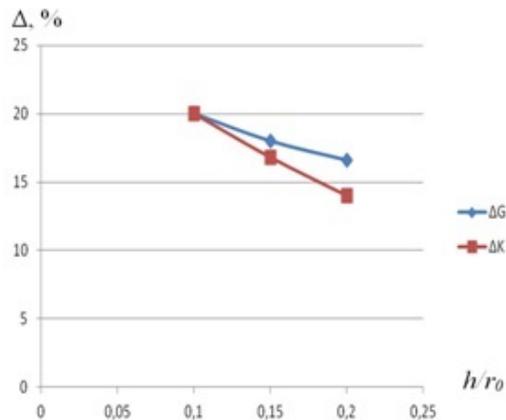


Рис. 9. Зависимость влияния СВЧ обработки на увеличение модуля сдвига  $\Delta G$  и объемного модуля  $\Delta K$  от толщины межфазного слоя  $h/r_0$

### Выводы

Выявлено значимое влияние изменений в микроструктуре межфазного слоя армированного волокнами ПКМ, произошедших в результате воздействия СВЧ электромагнитного поля, на его прочностные характеристики. На примере микроволновой обработки отвержденного армированного углеродными волокнами композиционного материала типа КМКУ-1.80.Э0,1 определено уменьшение пористости МФС на (45-47)% при одновременном уменьшении размеров пор на 80-83%, размеров агломератов матрицы - на 23%, и увеличение их количества на 15%. С использованием метода конечных элементов выполнены расчеты модуля сдвига и объемного модуля в МФС контрольного и обработанного в СВЧ электромагнитном поле образцов с учетом экспериментально выявленных изменений пористости и количества структурных элементов, определяющих число точек контактного взаимодействия в МФС

«матрица-волокно», показавшие увеличение указанных параметров соответственно на (20-16,7)% и (20-14)% с увеличением толщины МФС. Полученные результаты удовлетворительно совпадают с экспериментально установленными значениями увеличения прочности отвержденных ПКМ после обработки в СВЧ электромагнитном поле по напряжениям изгиба на (11-16)%, напряжениям среза – на (13-21)%, напряжениям межслоевого сдвига на (14-15)%.

Полученные теоретические и экспериментальные результаты могут быть положены в основу описания механизма повышения прочности отвержденных армированных волокнами ПКМ после их кратковременной обработки в СВЧ электромагнитном поле.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Каблов Е. Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33.
- [2] Каблов Е. Н. *Материалы и химические технологии для авиационной техники* // *Вестник Российской академии наук*. 2012. Т. 82. №6. С. 520–530.
- [3] Архангельский Ю. С. *Справочная книга по СВЧ-электротермии: справочник*. Саратов : Научная книга, 2011. 560 с.
- [4] Коломейцев В. А., Кузьмин Ю. А., Никуйко Д. Н., Семенов А. Э. Экспериментальные исследования уровня неравномерности нагрева диэлектрических материалов и поглощенной мощности в СВЧ устройствах резонаторного типа // *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2013. Т.18. №12. С. 25–31.;
- [5] Калганова С. Г. *Электротехнология нетепловой модификации полимерных материалов в СВЧ электромагнитном поле*. Дис... доктора тех.н. Саратов:Саратов. гос. тех. ун-т, 2009.
- [6] Zlobina I. V., Bekrenev N. V. The Influence of Microwave Electromagnetic Field on Mechanical Properties of Composite Materials // *Наукоемкие технологии*. 2016. Т. 17. № 2. С. 25–30.
- [7] Zlobina I. V., Bekrenev N. V. The influence of electromagnetic field microwave on physical and mechanical characteristics of CFRP (carbon fiber reinforced polymer) structural / // *Solid State Phenomena*. 2016. V. 870. P. 101–106.
- [8] Zlobina I. V., Bekrenev, N. V. Muldasheva, G. K. Increasing of the endurance of polymeric construction materials with the multilevel hierarchical structure in the microwave electromagnetic field // *AIP Publishing*. 020236-1–020236-4.
- [9] Злобина И. В., Бекренев Н. В. Исследование микроструктуры конструкционных слоистых углепластиков, модифицированных путем электрофизических воздействий // *Вестник РГТУ*. 2017. № 1(40). С. 236 – 242.
- [10] Бахвалов Н. С., Панасенко Г. П. *Осреднение процессов в периодических средах*. М.: Наука, 1984. 352 с.
- [11] Павлов С. П., Бодягина К. С. Применение метода асимптотического осреднения для расчета эффективных характеристик нанокмозитов // *Наноматериалы и нанотехнологии: проблемы и перспективы: сборник материалов IV Международной научной конференции для молодых ученых, студентов и школьников 25 февраля – 15 мая 2015 г. М: Прондо, 2015. С. 67 – 72.*
- [12] Yulu Wang A Study on Microstructures of Homogenization for Topology Optimization. Melbourne, Australia, 2003. 315 p.

I. V. Zlobina, K. S. Bodyagina, S. P. Pavlov, N. V. Bekrenev

**THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT OF  
CHANGES IN THE PARAMETERS OF THE INTERPHASE ZONE OF THE  
CURED POLYMERIC COMPOSITE MATERIAL UNDER THE ACTION OF  
MICROWAVE RADIATION ON ITS STRENGTH CHARACTERISTICS**

*Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia*

**Abstract.** Results of calculation of the effective module of shift and the effective volume module of elasticity of the polymeric composite materials (PCM) reinforced by fibers with use of a finite element method are given. It is shown that the value of the specified parameters generally is defined by heterogeneity and relative thickness of an interphase layer (MFS) "fiber matrix". At the same time increase in relative thickness of MFS practically doesn't influence the specified parameters in case of solidity of its structure. Existence of defects in the form of a time leads to decrease in both the shift module, and the volume module. The porosity influences reduction of the specified parameters more than MFS thickness: increase in relative thickness of a layer twice at porosity of 25% leads to decrease in modules of elasticity by (9-10) %, in too time at porosity of 75% similar increase in thickness of MFS decrease in modules of elasticity by 79%. It is established that at the same value of volume of defects (time) reduction of their sizes leads to increase in durability of MFS, expressed in growth of the module of shift by (14,6-23) % depending on thickness at almost invariable size of the volume module. The research by methods of electronic microscopy at increase h5000 microstructures of polymeric composite materials in the field of MFS after their interaction with the microwave oven by the electromagnetic field with a frequency of 2450 MHz within 2 minutes has revealed increase in density of structure of a matrix and interphase layer. The porosity in MFS has decreased by (45-47) % at simultaneous reduction of the sizes of a time by 80-83%, the sizes of agglomerates of a matrix have decreased by 23%, and their quantity has increased for 15%. The specified facts can promote improvement of adhesive interaction of fibers with a matrix. The finite element method has executed the calculations of the module of shift and the volume module taking into account the changes of a microstructure of MFS defined in an experiment which have shown increase in the specified PKM parameters after impact of the microwave oven of the electromagnetic field on (14-20) % that will well be coordinated with the results on increase in durability of PKM received earlier at tests on a bend – (11-16) %, a cut – (13-21) % and interlayered shift – (14-15) %. The revealed change of a microstructure of MFS which is shown in decrease in its porosity and increase in points of contact interaction due to growth of amount of fine agglomerates can be offered as one of mechanisms of increase in durability of the cured polymeric composite materials after influence of the microwave oven of the electromagnetic field.

**Keywords:** a microstructure, the microwave oven the electromagnetic field, a matrix reinforcing fiber, an interphase zone, a surface, density, agglomerates, porosity, the shift module, the volume module, a finite element method, modeling

---

*Zlobina Irina Vladimirovna*

e-mail: irinka\_7\_@mail.ru, Ph. D., Assoc. Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia.

*Bodyagina Kseniya Sergeevna*

e-mail: bodksen@mail.ru, Post Graduate, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia.

## REFERENCES

- [1] Kablov E. N. Innovacionnye razrabotki FGUP «VIAM» GNC RF po realizacii «Strategicheskikh napravlenij razvitiya materialov i tekhnologij ih pererabotki na period do 2030 goda» // Aviacionnye materialy i tekhnologii. 2015. №1 (34). S. 3–33. (in Russian)
- [2] Kablov E. N. Materialy i himicheskie tekhnologii dlya aviacionnoj tekhniki // Vestnik Rossijskoj akademii nauk. 2012. T. 82. №6. S. 520–530. (in Russian)
- [3] Arhangel'skij YU. S. Spravochnaya kniga po SVCH-ehlektrotermii: spravochnik. Saratov : Nauchnaya kniga, 2011. 560 s. (in Russian)
- [4] Kolomejcev V. A., Kuz'min YU. A., Nikujko D. N., Semenov A. EH. EHksperimental'nye issledovaniya urovnya neravnomernosti nagreva dielektricheskikh materialov i pogloshchennoj moshchnosti v SVCH ustrojstvakh rezonatornogo tipa // EHlektromagnitnye volny i ehlektronnye sistemy. 2013. T.18. №12. S. 25–31. (in Russian)
- [5] Kalganova S. G. EHlektrotekhnologiya neteplovoj modifikacii polimernyh materialov v SVCH ehlektromagnitnom pole. Dis... doktora tekhn. Saratov:Saratov. gos. tekhn. un-t, 2009. (in Russian)
- [6] Zlobina I. V., Bekrenev N. V. The Influence of Microwave Electromagnetic Field on Mechanical Properties of Composite Materials // Naukoemkie tekhnologii. 2016. T. 17. № 2. S. 25–30.
- [7] Zlobina I. V., Bekrenev N. V. The influence of electromagnetic field microwave on physical and mechanical characteristics of CFRP (carbon fiber reinforced polymer) structural / // Solid State Phenomena. 2016. V. 870. P. 101–106.
- [8] Zlobina I. V., Bekrenev, N. V. Muldasheva, G. K. Increasing of the endurance of polymeric construction materials with the multilevel hierarchical structure in the microwave electromagnetic field // AIP Publishing. 020236-1–020236-4.
- [9] Zlobina I. V., Bekrenev N. V. Issledovanie mikrostruktury konstrukcionnyh sloistyh ugleplastikov, modifitsirovannyh putem ehlektrofizicheskikh vozdeystvij // Vestnik RGATU. 2017. № 1(40). S. 236 – 242. (in Russian)
- [10] Bahvalov N. S., Panasenko G. P. Osrednenie processov v periodicheskikh sredah. M.: Nauka, 1984. 352 s. (in Russian)
- [11] Pavlov S. P., Bodyagina K. S. Primenenie metoda asimptoticheskogo osredneniya dlya rascheta ehffektivnyh harakteristik nanokompozitov // Nanomaterialy i nanotekhnologii: problemy i perspektivy: sbornik materialov IV Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii dlya molodyh uchenyh, studentov i shkol'nikov 25 fevralya – 15 maya 2015 g. M: Prondo, 2015. S. 67 – 72. (in Russian)
- [12] Yulu Wang A Study on Microstructures of Homogenization for Topology Optimization. Melbourne, Australia, 2003. 315 p.

---

*Pavlov Sergey Petrivich*

e-mail: ppsar@yandex.ru, Dr. Sci. Phys. & Math., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia.

*Bekrenev Nikilay Valeryevich*

e-mail: nikolaj.bekrenev@yandex.ru, Dr. Sci. Tech., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia.