

УДК 621-039-419:621.365.5.029.5

DOI: 10.30987/article_5b28d19896a9d0.11911159

И.В. Злобина, Н.В. Бекренев, К.Р. Ерофеева

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОДИФИЦИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ НА ИХ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Приведены результаты исследований кинетики нагрева, коэффициентов температуро- и теплопроводности образцов, изготовленных из стеклопластика и квазиизотропного отвержденного композиционного материала, армированного углеродным волокном. Сделано предположение о возможности использования СВЧ модифицирования изделий из композици-

онных материалов для оптимизации их теплофизических характеристик по поверхности и объему.

Ключевые слова: армированные композиционные материалы, межслоевое взаимодействие, кинетика нагрева, температуропроводность, теплопроводность, тепловое поле, микроструктура, СВЧ электромагнитное поле.

I.V. Zlobina, N.V. Bekrenov, K.R. Erofeeva

INVESTIGATION OF MODIFICATION IMPACT OF COMPOSITES MICROSTRUCTURE IN SHF ELECTROMAGNETIC FIELD UPON THEIR THERMOPHYSICAL PROPERTIES

The investigation purpose consists in the study of temperature and thermal conduction of glass and carbon plastic and also heating kinetics and microstructure of materials mentioned through the methods of a scanning electronic microscopy with a quantitative assessment of its characteristics by means of a fractal analysis.

The SHF processing was carried out with the use of "Zhuk-2-02" horn plant with the radiation frequency of 2.45GHz and power 1.2 kW. To define thermal physical characteristics of samples there was used Parker's method in the version with a source of heat as a halogen lamp having power 1 kW. Thermal fields were recorded with the aid of a thermal imager FLIR E40. In the course of investigations it was defined that a factor of temperature conductivity of lesser dense glass-fiber material is lower than that in hardened carbon nine times lower, and glass-fiber material thermal conductivity is lower for about 2.5 times in comparison with carbon plastic. Samples subjected to the impact of the SHF electromagnetic field have a more uniform temperature: a difference for

peripheral and central areas does not exceed 3-5°C for carbon plastic and 8-10°C for glass-fiber material. For test samples there is defined a difference up to 20°C and higher. The effect obtained is explained with the increase of the amount of joints and points of the cohesion interaction of fibers and a matrix and fibers between each other after the SHF electromagnetic field impact.

The increase of composite temperature- and thermal conductivity parameters after modification in SHF electromagnetic field allows ensuring the improvement of their functioning under conditions of temperature gradients and decreasing the intensity of an edge and surface heating that allows increasing the structure reliability in a speed aircraft.

Key words: reinforced composites, inter-layer interaction, heating kinetics, temperature conductivity, thermal conductivity, thermal field, microstructure, SHF electromagnetic field.

Введение

Анализ научно-технической литературы, материалов конференций и выставок свидетельствует об интенсивном развитии производства композиционных материалов на основе углеродных волокон и стеклотканей и их широком применении в авиационной, автомобильной, судостроительной промышленности, ракетостроении и космической технике.

В настоящее время на долю углепластиков приходится до половины веса современного самолета - как боевого, так и гражданского - и до 70 % его поверхности. Внедрение композиционных материалов позволяет снижать вес летательных аппаратов на тонны [1]. По данным исследовательской компании Grand View Research, объем мирового рынка углепластиков достигнет к 2022

году 23,55 млрд долл. По данным другой исследовательской компании, MarketsandMarkets, глобальный рынок углепластиков уже к 2020 году поднимется до уровня 35,74 млрд долл. При этом изменится структура применяемых углепластиков и композитов на их основе: если в 2014 г. доля терморепактивных композитов составляла порядка 75%, то в перспективе наиболее высокие темпы роста будут характерны для термопластичных композитов на основе углепластиков, что повлечет за собой также реорганизацию технологического обеспечения производства изделий [1; 2]. Одними из основных потребителей композитов на основе углеродных волокон в промышленно развитых странах были и остаются аэрокосмическая и оборонная промышленность, а также автомобилестроение (особенно производство гоночных болидов и суперкаров). В частности, на аэрокосмическую отрасль приходилось в 2014 г. более 30 % потребления данных материалов [1; 2].

Композиционные материалы характеризуются выраженной анизотропией физико-механических характеристик, определяемой видом и ориентацией армирующих компонентов [3]. Это вызывает необходимость упрочнения изделий из композиционных материалов в направлении действия эксплуатационных нагрузок различными конструкторско-технологическими методами (усиление элементов конструкции, топологическое армирование в соответствии с прогнозируемыми полями напряжений [4; 5]). Нашими исследованиями [6-8] установлено, что повышение прочности и снижение анизотропии свойств композиционных материалов возможно не только путем внесения новых компонентов или усиления конструкции, но и модифицированием структуры путем электрофизических воздействий, что значительно проще реализовать, по-

скольку процесс является управляемым благодаря регулированию технологических режимов без вмешательства в синтез материала. Одним из наиболее эффективных методов может явиться воздействие СВЧ электромагнитного поля невысокой мощности, не приводящей к деструктивным изменениям материала.

Однако в современной технике композиционные материалы применяются не только в качестве чисто несущих конструктивных элементов, но и в узлах, испытывающих воздействие высоких температур и их градиентов (лопатки газотурбинных двигателей, детали двигателей внутреннего сгорания, высокоскоростные подшипники скольжения, элементы конструкции скоростных летательных аппаратов (носки крыла и оперения, носовые части и днище фюзеляжа) и др.). Известная невысокая теплопроводность композиционных материалов может привести к перегреву поверхностных слоев и потере ими несущей способности и контактной выносливости, что может вызвать разрушение конструкции.

В этой связи представляется актуальным исследование влияния структуры композиционного материала на его теплофизические свойства и возможности корректировки этих свойств путем воздействия СВЧ электромагнитного поля.

Целью исследований явилось изучение температуро- и теплопроводности слоистого стеклопластика и армированного углеродными волокнами композиционного материала с квазиизотропной структурой, а также кинетики нагрева указанных материалов и микроструктуры окончательно отвержденных армированных углеродными волокнами композиционных материалов методами сканирующей электронной микроскопии с количественной оценкой ее характеристик путем фрактального анализа.

Методика проведения исследований

Были исследованы образцы из стеклопластика и квазиизотропного армированного углеродным волокном композиционного

материала в виде пластин с размерами 80x15x2 мм. Исследовали температуропроводность и теплопроводность, а также кине-

тику нагрева контрольных образцов и образцов, подвергнутых воздействию СВЧ электромагнитного поля с частотой 2450 МГц. СВЧ обработку осуществляли с использованием установки «Жук-2-02» производства ООО «АгроЭкоТех» (г. Обнинск Калужской обл.) (рис. 1).

Образцы закрепляли по 3 напротив средней плоскости излучающего рупора на специальном трехкоординатном столе с рабочей поверхностью из полипропилена РР (рис. 1б).



а)



б)

Рис. 1. Лабораторная установка на базе «Жук-2-02» (а) и образцы, закрепленные на столе, в процессе СВЧ воздействия (б)

Обработку осуществляли при средней подводимой СВЧ мощности, наиболее целесообразной для получения высоких прочностных характеристик образцов [6; 7].

Для определения теплофизических характеристик образцов применяли метод Паркера в варианте, описанном в [9]. Для

нагрева образцов использовали специально разработанную установку с источником в виде прожектора FL(ИО) 1000 IP54 ИЭК LPI01-1-1000-K01 (Россия) (рис. 2) и механизмом регулирования расстояния от источника теплового излучения до образца.

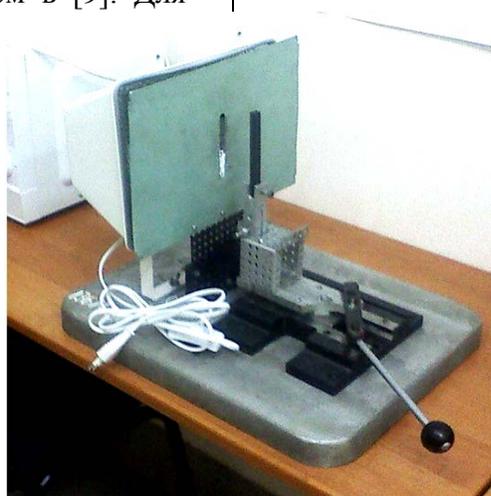


Рис. 2. Экспериментальная установка для нагрева образцов (в оснастке закреплен образец из квазиизотропного углекомпозиата)

Тепловые поля записывали при помощи тепловизора модели FLIR E40 (США) с калибровкой температуры в опорных точках при помощи пирометра Testo 830-T1 (Германия). Источник теплового излучения закрывался металлическим экраном с вертикальной щелью длиной 100 мм и шириной 8 мм, напротив которой устанавливали образец. Тепловизор размещали за образцом на расстоянии в соответствии с паспортными данными. Нагрев выполняли до появления на экране тепловизора полей, соответствующих температуре 150⁰С.

Микроструктуру изучали при помощи электронного микроскопа MIRA // TESCAN в Лаборатории материалов специального назначения Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского. На микрофотографиях выявляли объекты при использовании размерной шкалы 50x50 мкм,

Результаты исследований

Анализировали тепловые поля для каждого из изучаемых материалов, при этом в соответствии с методикой [9] по термограмме определяли время нагрева образца до температуры, соответствующей половине конечного значения. На основе полученных данных по приведенным ниже зависимостям (1) и (2) [9] рассчитывали коэффициенты

$$\alpha = F_0 \frac{L^2}{\tau_{0,5}}, \quad (1)$$

$$T_{st} = \frac{W\alpha}{\lambda L}, \text{ откуда } \lambda = \frac{W\alpha}{T_{st}L}, \quad (2)$$

где $F_0 = 0,1388$ - число Фурье, коэффициент при времени нагрева $\tau = \tau_{0,5}$; L - толщина пластины (образца); $\tau_{0,5}$ - время достижения половины амплитуды перегрева образца; λ - теплопроводность; α - температуропровод-

ность; T_{st} - избыточная температура (стационарное значение) задней поверхности образца; W - плотность поглощенной энергии. Количественную оценку изменения микроструктуры выполняли методом фрактального анализа. При этом для оценки выбирались объекты с практически одинаковыми размерами в двух направлениях (длина x ширина) по шкале микрофотографии. Для вычисления фрактальной размерности на изображения объектов последовательно накладывали сетку со стороной квадрата 3 и 1 мм. По известным методикам [10] подсчитывали число квадратных ячеек, в которых укладывалась линия контура рассматриваемого объекта, и определяли фрактальную размерность. Изменение параметра оценивали как отношение фрактальной размерности контура объекта после воздействия СВЧ электромагнитного поля к фрактальной размерности контура объекта на контрольном образце.

температуро- и теплопроводности. Для изучения кинетики нагрева с термограммы каждые 10 с снимали значения температуры образца в среднем сечении и на его периферии.

Полученные результаты представлены на рис. 3-5.

ность; T_{st} - избыточная температура (стационарное значение) задней поверхности образца; W - плотность поглощенной энергии.

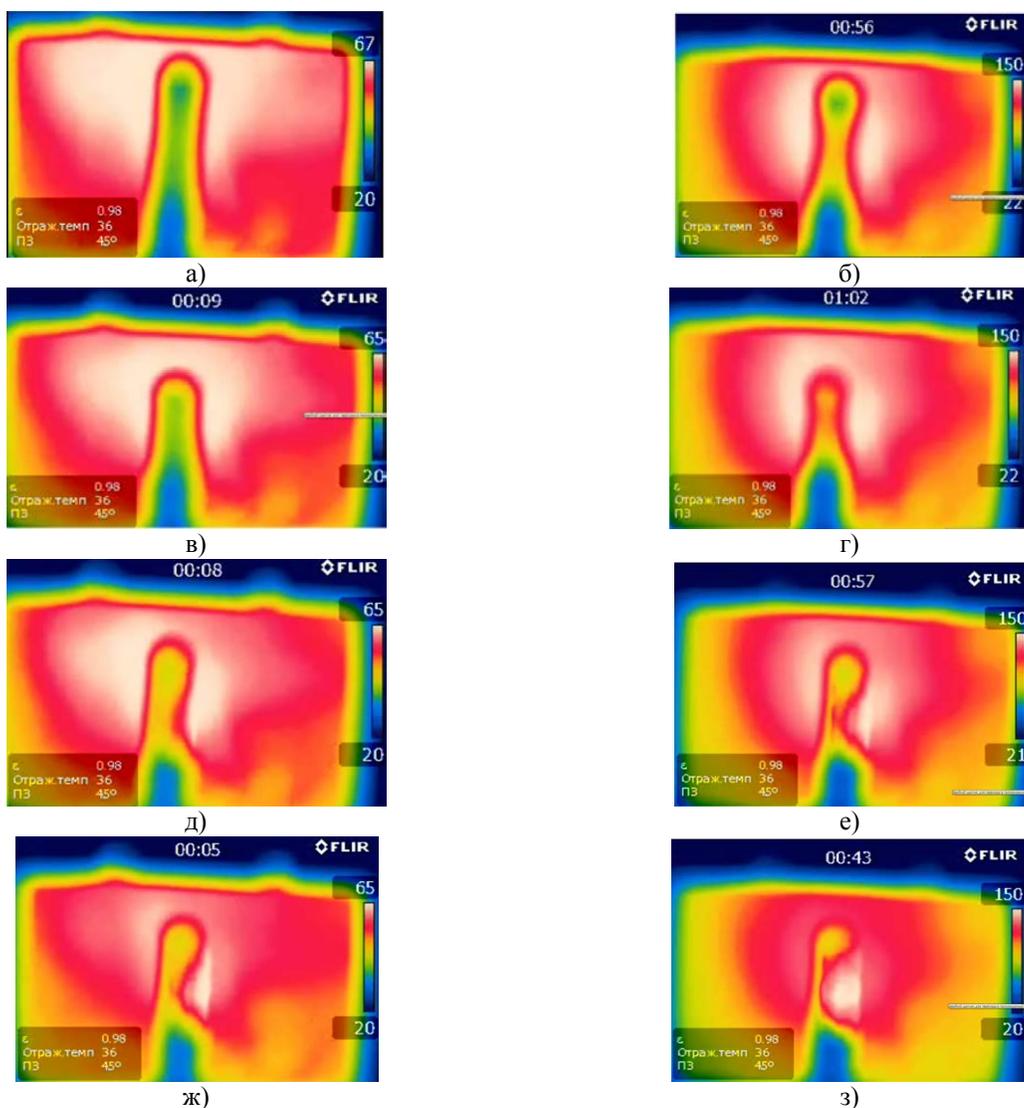


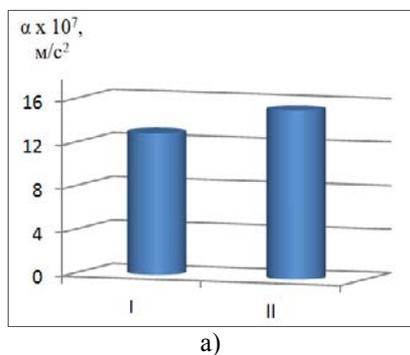
Рис. 3. Термограммы образцов в начальный и конечный периоды процесса нагрева: стеклопластик (а-г), квазиизотропный углекомпозит (д,е); контрольные образцы - а, б, д, е; обработанные образцы - в, г, ж, з

Анализ термограмм показал следующее. Область температур 130-140 °С занимает 1/2 поверхности образца из стеклопластика, а квазиизотропный углекомпозит имеет зональный прогрев: в то время как прилегающая к одной из боковых поверхностей зона имеет температуру около 150 °С и доходит почти до среднего сечения, противоположная сторона нагрета только до 135 °С.

Возможно, здесь наблюдается влияние различной ориентации углеродных волокон, образующих относительно равнопрочную квазиизотропную структуру. В отмеченных

зонах волокна имеют взаимно перпендикулярную направленность, что приводит к изменению тепловых потоков и различному количеству поглощенной тепловой энергии. У стеклопластика, полученного послойной выкладкой, волокна являются основными проводниками тепла и однонаправлены, что приводит к стабильному тепловому потоку и равномерному нагреву. Также отмечается относительно меньшая температура прогрева образцов из стеклопластика, что, очевидно, связано с меньшей плотностью матрицы и отличающимися от углеродных волокон свойствами армирующих структур.

Заметны явные различия в тепловых полях при нагреве контрольных и модифицированных в СВЧ электромагнитном поле образцов: как в начальный, так и в конечный момент прогрева обработанные образцы



имеют существенно большую температуру, чем контрольные. Данный факт подтверждается оценкой вычисленных по (1) и (2) коэффициентов температуро- и теплопроводности исследованных материалов.

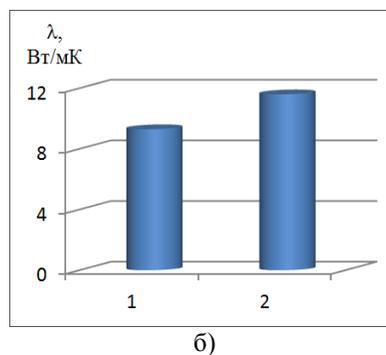


Рис. 4. Изменение коэффициентов температуро- (а) и теплопроводности (б) квазиизотропного углекомпозиата после модифицирования в СВЧ электромагнитном поле: I - контрольный образец; II - обработанный образец

Теплофизические коэффициенты исследованных материалов существенно различаются. Коэффициент температуропроводности стеклопластика ниже, чем у квазиизотропного углекомпозиата, примерно в 9 раз. В целом различие коэффициентов теплопроводности для исследованных материалов качественно повторяет зависимость температуропроводности: теплопроводность стеклопластика ниже по сравнению с углекомпозиатом примерно в 2,5 раза.

Из графиков кинетики нагрева (рис. 5) видно, что за период времени 40 с квазиизотропный композиционный материал нагревается до 120°C , а стеклопластик - до 110°C . Для материалов характерна неравномерность прогрева периферийных и центральной зон образца. Расхождение значений температур у стеклопластика и квазиизотропного композита достигает 20°C и более. Однако образцы, подвергнутые воздействию СВЧ электромагнитного поля, имеют существенно более равномерную температуру периферийных и центральных зон: различие не превышает $3-5^\circ\text{C}$ для квазиизотропного углекомпозиата и $8-10^\circ\text{C}$ для стеклопластика. При этом уже в первый момент времени оба материала оказываются прогреты в

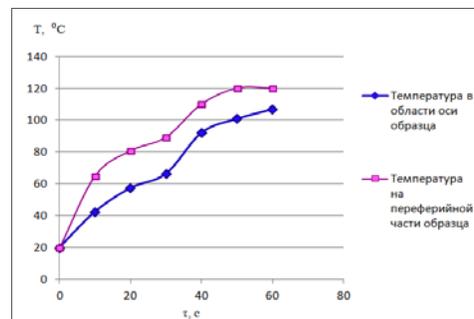
большей степени (примерно на 10°C). После 50-60 с нагрева температура образца из стеклопластика составляет $120-128^\circ\text{C}$ против $107-120^\circ\text{C}$ у контрольного образца, а образца из квазиизотропного углекомпозиата - соответственно 150 и $110-130^\circ\text{C}$.

Полученные результаты могут быть объяснены особенностями микроструктуры образцов после воздействия СВЧ электромагнитного поля (рис. 6). Структура модифицированных образцов из стеклопластика уже при относительно малом увеличении в 500 крат существенно отличается от контрольных. Для контрольных образцов характерны значительные пустоты (поры и несплошности), препятствующие распространению тепловых потоков, а модифицированная структура имеет вид сплавленных агломератов с практически «залеченными» макро- и микропорами.

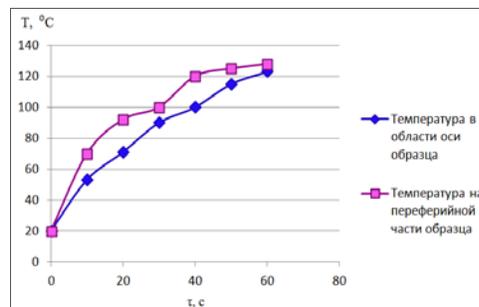
Изменения в структуре квазиизотропного углекомпозиата заметны только при значительно большем увеличении. В поле зрения $239,9-165,3$ мкм визуально какие-либо особенности отдельных элементов структуры выявить затруднительно. Следует отметить только, что частицы матрицы более равномерно и плотно покрывают арми-

рующую конструкцию волокон. В поле зрения 66,13-74,79 мкм видно, что фрагменты микроструктуры контрольного образца отличаются округлостью; в среднем их число в поле зрения меньше, чем у обработанного

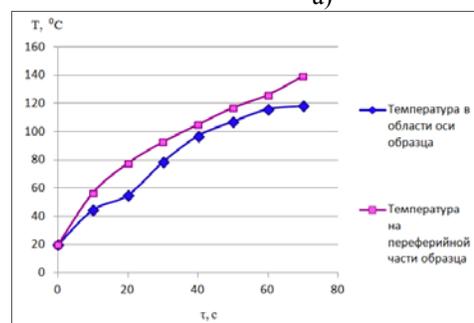
образца. В поле зрения 33,07 мкм видна существенно более развитая поверхность контакта армирующих волокон с матрицей после СВЧ обработки (рис. 6б).



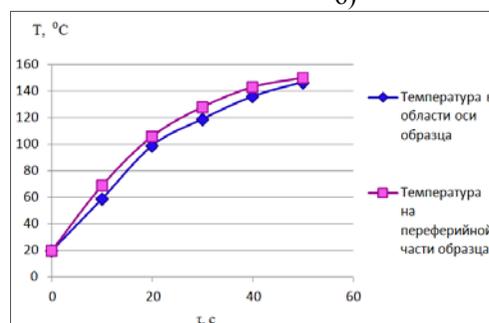
а)



б)



в)



г)

Рис. 5. Кинетика нагрева образцов из композиционных материалов: стеклопластик (а, б), квазиизотропный углекомпозит (в, г); контрольные образцы - а, в; обработанные образцы - б, г

Практически вся поверхность волокна имеет когезионную связь со связующим материалом. В поле зрения 16,53 мкм как на боковой поверхности контрольного образца (рис. 6в), так и на торцовой видна явная округлость частиц матрицы и их меньшее количество в контактных с волокнами зонах. Для обработанного образца, так же как и при меньшем увеличении, заметно существенное увеличение количества частиц с развитой поверхностью (рис. 6г).

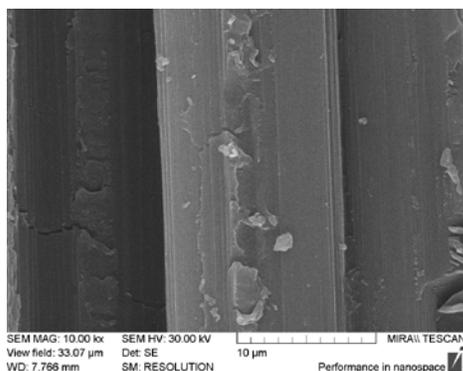
Фрактальную зависимость характерных элементов микроструктуры определяли по методике [10]. В процессе анализа контура выделенных объектов установлено, что значимые (более 10 %) изменения проявля-

ются при максимальном увеличении (поле зрения менее 75 мкм).

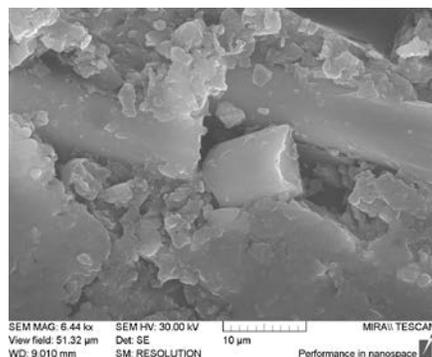
С учетом установленной шкалы размерной сетки в 20 и 5 мкм это означает, что на границе контура объекта возможно достоверное выделение структур с размерами менее 0,1 мкм, т.е. относящихся к нанодиапазону параметров. Повышение степени увеличения изображения контрольного образца позволяет выявить рост фрактальной размерности не более чем на 1,5 %. У обработанного образца рост фрактальной размерности при большем увеличении составляет порядка 15 %. С учетом данных расчета это означает, что именно наноразмерные структуры вносят вклад в рост фрактальной

размерности объектов, а следовательно, и в увеличение точек когезионного взаимодействия. Это объясняет установленное нами ранее повышение прочностных характеристик материала и результаты по увеличению

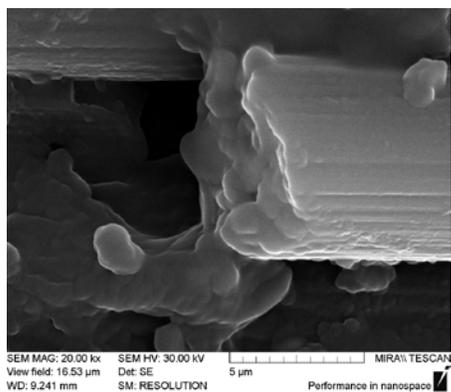
теплопроводности и температуры нагрева образцов после СВЧ модифицирования за счет облегчения транспорта теплового поля через контактные области.



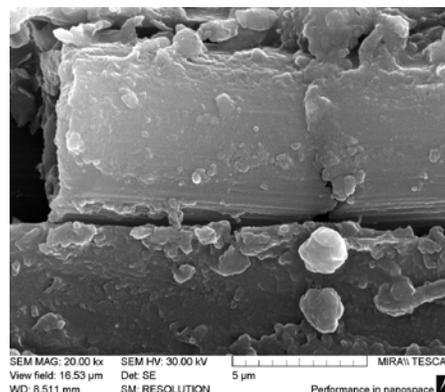
а)



б)



в)



г)

Рис. 6. Микроструктура контрольного (а, в) и обработанного (б, г) образцов (поле зрения - 33,07 мкм (а, б) и 16,53 мкм (в, г))

Заключение

На основе анализа полученных результатов можно заключить, что для конструкционных композиционных материалов, армированных углеродными волокнами и волокнами синтетического стекла, характерно существенное различие теплофизических параметров, что вызывает необходимость их подбора с учетом не только механических эксплуатационных нагрузок, но и внешних источников тепла. Увеличение параметров температуро- и теплопроводности композиционных материалов после модифицирования в СВЧ электромагнитном поле позволя-

ет обеспечить улучшение их функционирования в условиях температурных градиентов и снизить интенсивность кромочного и поверхностного нагрева, что позволяет повысить надежность конструкции и обшивки транспортных систем, особенно летательных аппаратов. При СВЧ модифицировании стекло- и углепластиков, полученных послойной выкладкой, ввиду их более низкой температуро- и теплопроводности необходимо сокращать время воздействия СВЧ электромагнитного поля и его напряженность в рабочей зоне во избежание разогрева

поверхностных слоев и кромок изделия вследствие неизбежных тепловых эффектов, присущих воздействию данного поля на диэлектрические материалы.

Изучение микрофотографий структуры контрольных и обработанных образцов позволяет сделать предположение о механизме повышения теплофизических характеристик исследованных материалов за счет возрастания количества швов и точек когезионно-

го взаимодействия волокон и матрицы, а также волокон между собой после воздействия СВЧ электромагнитного поля на окончательно сформированный материал. При этом увеличение точек взаимодействия подтверждается значимым ростом фрактальной размерности границ характерных объектов микроструктуры. Основное увеличение фрактальной размерности проявляется в наноразмерном диапазоне значений параметра.

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».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кошкин, Р.П. Основные направления развития и совершенствования беспилотных авиационных систем / Р.П. Кошкин. - URL: <http://spmagazine.ru/420> (дата обращения: 28.01.2017).
2. <http://mplast.by/novosti/2016-04-29-mirovoy-ryinok-ugleplastikov-dostignet-otmetki-v-23-mlrd-k-2022-godu/> (дата обращения: сент. 2016).
3. Каблов, Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» / Е.Н. Каблов // Авиационные материалы и технологии. - 2015. - № 1 (34). - С. 3-33.
4. Павлов, С.П. Оптимальное армирование стержней в задачах кручения / С.П. Павлов, М.В. Жигалов, Т.С. Балабуха // Проблемы прочности элементов конструкций под действием нагрузок и рабочих сред: межвуз. науч. сб. - Саратов: Изд-во СГТУ, 2009. - С.151-157.
5. Nomura, T. Simultaneous optimization of topology and orientation of anisotropic material using isoparametric projection method / Tsuyoshi Nomura, Ercan M. Dede, Tadayoshi Matsumori, Atushi Kawamoto // 11th World congress on structural and multidisciplinary optimization (7-12th June 2015). - Sydney, Australia, 2015.
6. The influence of microwave electromagnetic field on mechanical properties of composite materials / I.V. Zlobina, N.V. Bekrenev // Научные технологии. - 2016. - Т. 17. - № 2. - С. 25-30.
7. The influence of electromagnetic field microwave on physical and mechanical characteristics of CFRP (carbon fiber reinforced polymer) structural / I.V. Zlobina, N.V. Bekrenev // Solid State Phenomena. - 2016. - V. 870. - P. 101-106.
8. Злобина, И.В. Исследование микроструктуры конструкционных слоистых углепластиков, модифицированных путем электрофизических воздействий / И.В. Злобина, Н.В. Бекренев // Вестник РГТУ. - 2017. - № 1 (40). - С. 236-242.
9. Вавилов, В.П. Определение теплофизических характеристик материалов методом термографии / В.П. Вавилов, В.Г. Торгунаков, Д.А. Нестерук [и др.] // Известия Томского политехнического университета. - 2006. - Т. 309. - № 2. - С. 130-134.
10. Мандельброт, Б. Фрактальная геометрия природы / Б. Мандельброт. - М.: Ин-т компьютер. исслед., 2002. - 656 с.
1. Koshkin, R.P. *Basic Directions of Development and Updating of Unmanned Aviation Systems* / R.P. Koshkin. - URL: <http://spmagazine.ru/420> (address date: 28.01.2017).
2. <http://mplast.by/novosti/2016-04-29-mirovoy-ryinok-ugleplastikov-dostignet-otmetki-v-23-mlrd-k-2022-godu/> (address date: September, 2016).
3. Kablov, E.N. Innovation developments of FSUE "VIAM" SSC RF for realization of "Strategic Directions of Development of Materials and Technologies of Their Processing for the Period up to 2030" / E.N. Kablov // *Aircraft Materials and Technologies*. - 2015. - No.1(34). - pp. 3-33.
4. Pavlov, S.P. Optimum reinforcement in problems of torsion / S.P. Pavlov, M.V. Zhigalov, T.S. Balabukha // *Problems of Structure Element Strength under Impact of Loads and Working Environment: Inter-College Transactions*. - Saratov: SSTU Publishing House, 2009. - pp. 151-157.
5. Nomura, T. Simultaneous optimization of topology and orientation of anisotropic material using isoparametric projection method / Tsuyoshi Nomura, Ercan M. Dede, Tadayoshi Matsumori, Atushi Kawamoto //

- 11th World congress on structural and multidisciplinary optimization (7-12th June 2015). - Sydney, Australia, 2015.
6. The influence of microwave electromagnetic field on mechanical properties of composite materials / I.V. Zlobina, N.V. Bekrenev // *Научные технологии*. - 2016. - Т. 17. - № 2. - С. 25-30.
7. The influence of electromagnetic field microwave on physical and mechanical characteristics of CFRP (carbon fiber reinforced polymer) structural / I.V. Zlobina, N.V. Bekrenev // *Solid State Phenomena*. - 2016. - V. 870. - P. 101-106.
8. Zlobina, I.V. Microstructure investigation in structure laminar carbon plastic materials modified by electro-physical impact / I.V. Zlobina, N.V. Bekrenev // *Bulletin of RSATU*. - 2017. - No.1(40). - pp. 236-242.
9. Vavilov, V.P. Definition of material thermophysical characteristics by method of thermography / V.P. Vavilov, V.G. Torgunakov, D.A. Nesteruk [et al.] // *Proceedings of Tomsk Polytechnic University*. - 2006. - Vol.309. - No.2. - pp. 130-134.
10. Mandelbrot, B. Fractal Geometry of Nature / B. Mandelbrot. - M.: *Int-t Computer Investigations*, 2002. pp. 656.

Статья поступила в редколлегию 17.05.18.

Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета Киричек А.В.

Сведения об авторах:

Злобина Ирина Владимировна, к.т.н., доцент кафедры «Техническая механика и детали машин» Саратовского государственного технического университета им. Ю.А. Гагарина, e-mail: irinka_7_@mail.ru.

Бекренев Николай Валерьевич, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Техническая механика и детали машин» Саратовского государственного технического

университета им. Ю.А. Гагарина, e-mail: nikolaj.bekrenev@yandex.ru.

Ерофеева Кристина Романовна, студентка Саратовского государственного технического университета им. Ю.А. Гагарина, e-mail: naymi28@gmail.com.

Zlobina Irina Vladimirovna, Can. Eng., Assistant Prof. of the Dep. "Engineering Mechanics and Machinery", Gagarin State Technical University of Saratov, e-mail: irinka_7_@mail.ru.

Bekrenev Nikolay Valerievich, D. Eng., Prof., Head of the Dep. "Engineering Mechanics and Machinery", Ga-

garin State Technical University of Saratov, e-mail: nikolaj.bekrenev@yandex.ru.

Erofeeva Christina Romanovna, Student of Gagarin State Technical University of Saratov, e-mail: naymi28@gmail.com.