

DOI: 10.18721/JEST.24416

УДК 621-039-419; 620.22-419; 537.868

И.В. Злобина

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

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ АРАМИДНЫХ ТКАНЕЙ ДЛЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ И ЗАЩИТНЫХ ОРГАНОПЛАСТИКОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ В СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

Благодаря своей легкости и прочности, все более широкое применение в авиационной технике в качестве конструкционных материалов и средств защиты ответственных агрегатов (двигатели, системы управления) от поражающих факторов находят органопластики. Исследована микроструктура образцов арамидной ткани ТСВМ-ДЖ, подвергнутой воздействию СВЧ электромагнитного поля среднего уровня мощности частотой 2450 МГц. Установлено существенное изменение условий контакта отдельных нитей на уровне межфибрилльной связи волокон, выраженное в комплексировании фибрилл в агломераты, заполняющие промежутки между волокнами, с увеличением площади взаимодействия и в сближении отдельных волокон, что способствует повышению надежности межмолекулярных связей. Полученные результаты могут быть использованы в качестве одного из механизмов повышения прочностных характеристик конструкционных органопластиков и защитных материалов из арамидных тканей после СВЧ воздействия.

Ключевые слова: органопластики, баллистические материалы, арамидные ткани, СВЧ электромагнитное поле, микроструктура, волокна, фибриллы, активация, агломераты

Ссылка при цитировании:

И.В. Злобина. Исследование микроструктуры арамидных тканей для конструкционных и защитных органопластиков, модифицированных в СВЧ электромагнитном поле // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 4. С. 160–168. DOI: 10.18721/JEST.24416.

I.V. Zlobina

Yuri Gagarin State technical university or Saratov, Saratov, Russia

STUDY OF MICROSTRUCTURE OF ARAMID FABRICS FOR CONSTRUCTIONAL AND PROTECTIVE ORGANOPLASTICS MODIFIED IN A MICROWAVE-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC FIELD

Organoplastics have recently become widely used in aeronautical engineering as structural materials and means of protecting critical units (engines, control systems) from damaging factors due to their lightness and strength. The microstructure of the samples of the aramid fabric TSVM-J, subjected to a microwave-frequency electromagnetic field of an average power level at a frequency of 2450 MHz was investigated.



A significant change in the contact conditions of individual filaments at the level of interfibril bonding of fibers has been found, which is expressed in the aggregation of fibrils into agglomerates filling the gaps between the fibers with increasing interaction area and in the convergence of individual fibers, which increases the reliability of intermolecular bonds. The obtained results can be used as one of the mechanisms for increasing the strength characteristics of structural organoplastics and protective materials from aramid tissues after microwave exposure.

Keywords: organoplasty, ballistic materials, aramid fabrics, microwave oven electromagnetic field, microstructure, fibers, fibrils, activation, agglomerates.

Citation:

I.V. Zlobina, Study of microstructure of aramid fabrics for constructional and protective organoplastics modified in a microwave-frequency electromagnetic field, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 24(04)(2018) 160–168, DOI: 10.18721/JEST.24416.

Введение

Высокие характеристики по прочности и термостойкости тканей на основе арамидных нитей определяют их применение в качестве не только конструкционных материалов в авиастроении, но и так называемых «баллистических» материалов, используемых в качестве индивидуальных средств защиты 1-го и 2-го класса для экипировки служащих МЧС и персонала, работающего в экстремальных условиях, когда возможны аварийные ситуации, сопровождающиеся механическим поражением скоростными объектами, воздействием высоких температур или жидкостей под давлением. К числу первых таких материалов можно отнести «Кевлар», применявшийся еще в армии США в период войны во Вьетнаме. Хорошие защитные свойства арамидных тканей в сочетании с легкостью и гибкостью привели к их широкому применению в армии, авиации и во флоте [1–3]. В России к одним из наиболее распространенных баллистических материалов на основе арамидных нитей относятся ТСВМ, «Русар» и некоторые другие в целом сходные по свойствам материалы [4, 5]. По сравнению с металлическими и керамическими защитными средствами арамидные ткани и композиты на их основе (органопластики) имеют существенно меньший вес и обеспечивают гибкость и свободу движений, их можно но-

сить скрытно под верхней одеждой, хотя, естественно, они не обеспечивают адекватной защиты в боевых условиях с применением автоматического стрелкового оружия.

Благодаря своей легкости и прочности органопластики находят все более широкое применение в авиационной технике в качестве конструкционных материалов и средств защиты ответственных агрегатов (двигатели, системы управления) от поражающих факторов [6–8].

Однако арамидным тканям присущи и недостатки: слабое противодействие малоскоростным твердым ударникам [9, 10]; ослабление защитных свойств при намокании и воздействии прямых солнечных лучей; достаточно большой заброневого эффект, приводящий к серьезным травмам. Из-за этого конструкцию элементов защитной одежды приходится усложнять: вводить водо- и светонепроницаемые карманы или внешние слои ткани, применять многослойные (20–30 слоев) системы, что утяжеляет защитный комплект и снижает подвижность человека.

Исследования по повышению прочности таких тканей направлены на совершенствование технологий получения исходных компонентов и формирование тканей путем оптимизации плетения [11, 12]. Это усложняет процесс их получения, приводит к росту материальных, трудовых и финансовых затрат, а также к необходимости перестройки или пере-

вооружения производства, что удлиняет цикл внедрения новых разработок.

Постановка задачи

Увеличение количества локальных конфликтов, а также природных и техногенных аварийных ситуаций требует повышения защитных характеристик гибких материалов и их надежности. Необходима единая методология технологического управления формированием требуемых характеристик материалов путем электромагнитного воздействия на готовый объект без нарушения существующего технологического цикла. Это позволит проектировать оптимальные серийные технологические маршруты с минимальной себестоимостью и высоким качеством продукции, решать задачу импортозамещения, особенно в стратегически важных производствах, обеспечивающих безопасность страны, и повышать конкурентоспособность изделий.

Композиты на основе арамидных волокон сходны с конструкционными стекло- и углепластиками по принципу структурирования (полимерная матрица и разнонаправленные армирующие волокна). Поэтому возможно применить для их модифицирования разрабатываемый нами метод СВЧ воздействия на окончательное изделие без изменения действующих технологий [13, 14]. Однако это нуждается в экспериментальной проверке и теоретическом обосновании. Нами проведены эксперименты по исследованию влияния СВЧ электромагнитного поля на разрывную прочность арамидных нитей [15], в ходе которых установлено, что СВЧ обработка при среднем значении удельной мощности повышает осевую разрывную нагрузку на нить ТСВМ-ДЖ практически в 2 раза. Также получены данные, свидетельствующие, что после воздействия СВЧ электромагнитного поля на однослойную арамидную ткань ее сопротивление прокалыванию конусом с углом при вершине 90° как в сухом, так и во влажном состоянии повышает-

ся от 1,5 до 2 раз (в зависимости от подведенной удельной мощности). Наилучшие результаты обеспечиваются при воздействии СВЧ электромагнитного поля средней удельной мощности в течение 4–8 минут.

Целью исследований было изучение особенностей структуры ткани ТСВМ-ДЖ и многослойного композита на ее основе для выявления возможного механизма описанного выше эффекта.

Методика исследований, оборудование и аппаратура

Проведено изучение микроструктуры многослойной ткани ТСВМ-ДЖ, артикул 56319А, в исходном состоянии (контрольные образцы) и после модифицирования в СВЧ электромагнитном поле. Эксперименты проводили на микроволновой установке «Жук-2-02» (ООО «АгроЭкоТех», г. Обнинск Калужской обл.), позволяющей регулировать интенсивность воздействия СВЧ электромагнитного поля частотой 2450 МГц путем изменения дистанции до объекта. Модифицирование образцов проводили при среднем уровне мощности и времени воздействия 4 минуты. Ранее на данных режимах были получены наилучшие результаты по повышению прочности арамидных нитей и тканей.

Внешний вид поверхности образцов ткани изучали при помощи электронного микроскопа MIRA II LMU (Tescan Ersay Holding, Чехия) в Лаборатории материалов специального назначения Саратовского государственного университета имени Н. Г. Чернышевского.

Результаты и обсуждение

Микрофотографии образцов при различном увеличении представлены на рис. 1–3. При малом увеличении (поле зрения – 2,02 мм) не видны какие-либо различия в структуре плетеного слоя ткани. Можно отметить несколько более тусклый, матовый вид обработанного образца (рис. 1).

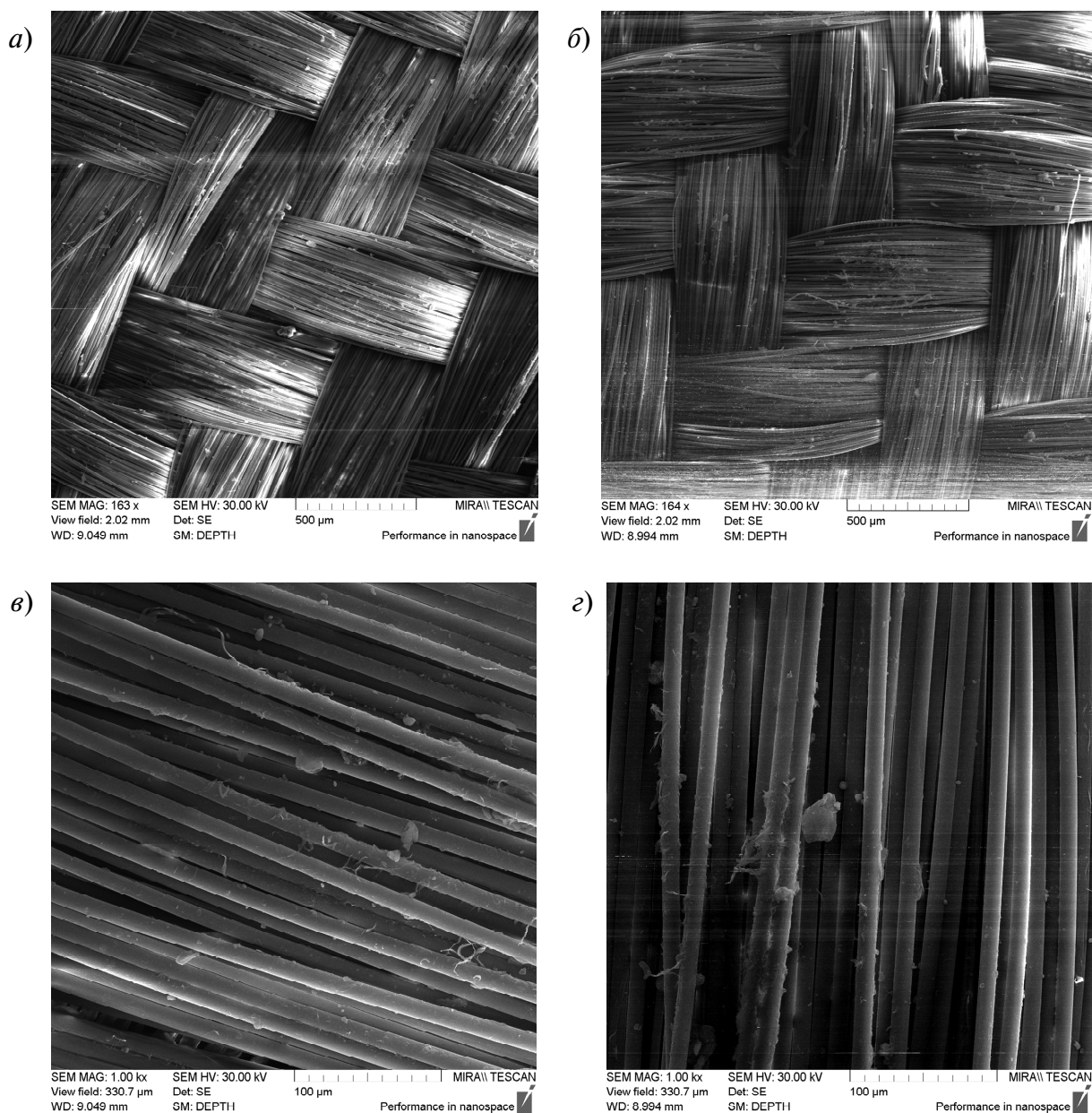


Рис. 1. Поверхность ткани ТСВМ-ДЖ при малом увеличении: поле зрения 2,07 мм – контрольный образец (а), обработанный образец (б); поле зрения 330,7 мкм – контрольный образец (в), обработанный образец (г)

Fig. 1. The surface of the fabric TSVM-DJ at low magnification, Field of view 2,07 mm: control sample (a), treated sample (б). Field of view 330,7 micron: control sample (в), treated sample (г)

При большем увеличении – в поле зрения 330,7 мкм – становятся заметны отдельные, отходящие от нити волокна. Причем таких волокон на контрольном образце значительно больше, чем на обработанном, что заставляет предположить: в ходе воздействия СВЧ элек-

ромагнитного поля в структуре нитей произошла определенная консолидация волокон в жгуты. Это подтверждается появлением на поверхности нитей агломератов, по-видимому, образованных деформированными волокнами.

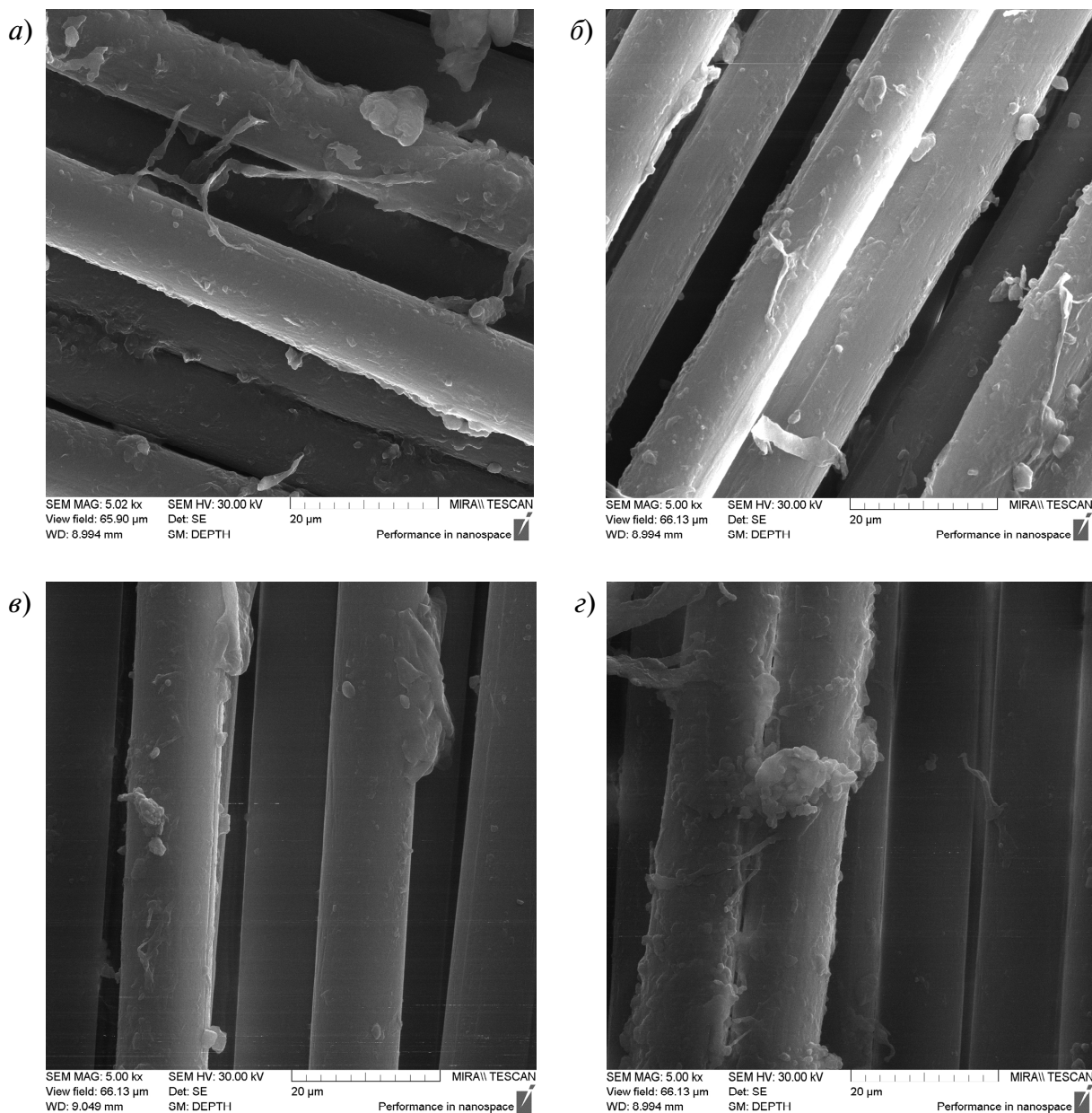


Рис. 2. Поверхность арамидных нитей в поле зрения 65,9–66,13 мкм (контрольный (а, б) и обработанный (в, г) образцы)

Fig. 2. The surface of aramide threads in the field of view is 65,9–66.13 micron. Control sample (а, б), treated sample (в, г)

При большем увеличении – в поле зрения 65,9–66,13 мкм – (рис. 2) становятся более заметными различия в строении нитей и волокон ткани. На поверхности нитей контрольного образца явно видны отделившиеся волокна и нитевидные микрофибриллы, лишь в некоторых точках связывающие нити между собой.

Также отмечены микроагломераты органических структур, возможно, загрязнения внешней среды, размещенные на поверхности отдельных волокон и не связанные одновременно с несколькими волокнами. Таким образом, можно отметить только макромеханическую связь нитей между собой в процессе плетения



ткани, что определяет прочность и другие эксплуатационные параметры контрольного образца. Поверхность нитей обработанного образца ткани покрыта достаточно плотным слоем агломератов, связанных одновременно с несколькими нитями, которые также сближены между собой и находятся в тесном контакте. Наличие связывающих нити агломератов,

скорее всего, определяет дополнительные точки контакта между нитями и возникновение достаточно прочных связей, что в целом способствует увеличению областей взаимодействия нитей на межмолекулярном уровне. Такое взаимодействие способствует повышенной прочности ткани, дополняя чисто механический контакт, сформированный плетением.

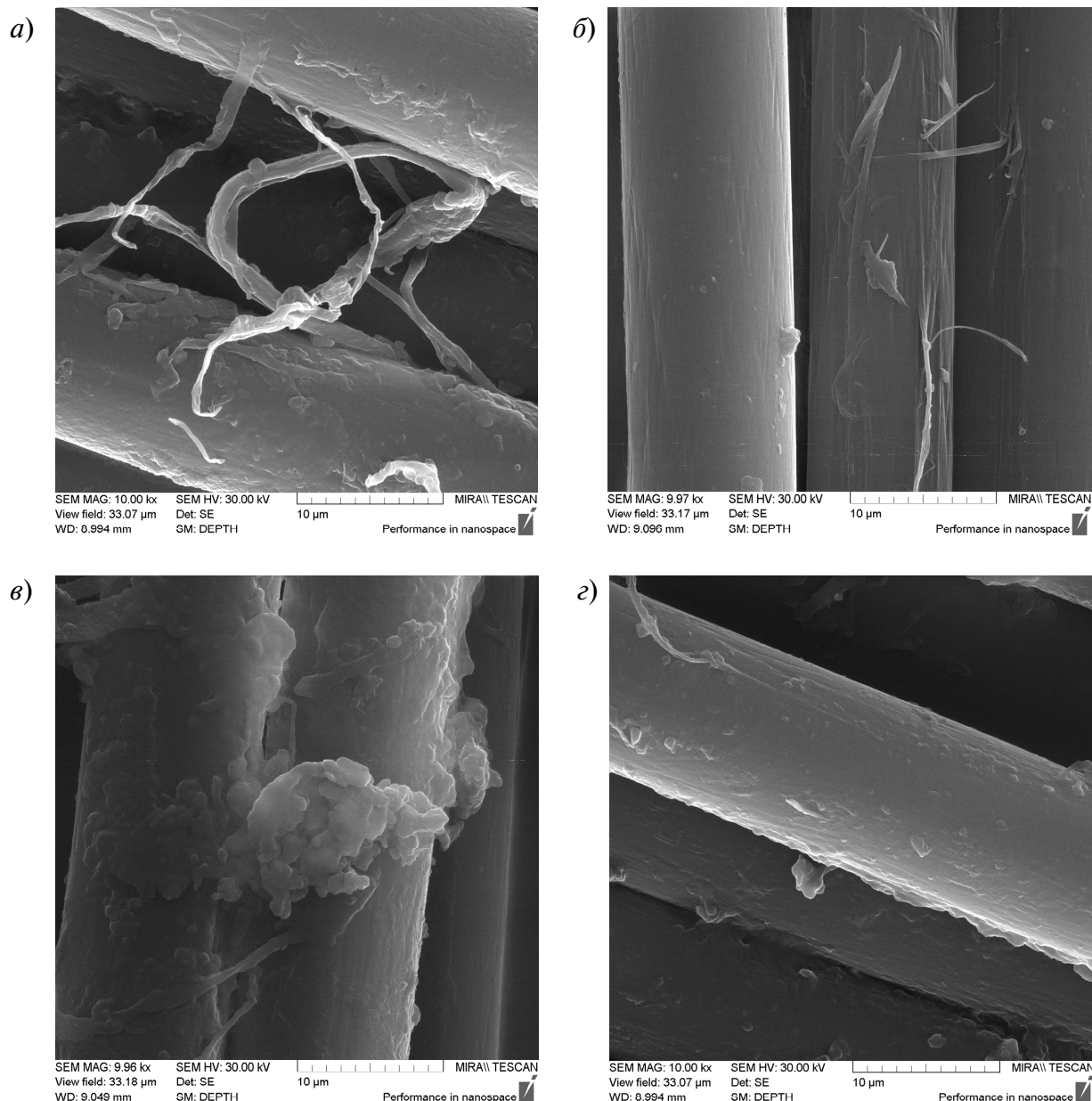


Рис. 3. Поверхность арамидных нитей в поле зрения 33,17–33,07 мкм (контрольный (а, б) и обработанный (в, г) образцы

Fig. 3. The surface of the aramid filaments in the field of view 33,17–33,07 micron. Control sample (а, б), treated sample (в, г)

Отмеченные особенности еще лучше видны при большом увеличении поверхности ткани — в поле зрения 33,07 мкм (рис. 4).

На поверхности нитей контрольного образца ткани присутствует большое количество хаотически расположенных, отделившихся, разориентированных волокон и микрофибрилл. Выявить какие-либо надежные области контакта волокон одной нити с соседней нитью не представляется возможным. Между нитями присутствуют значительные промежутки с размерами более 10 мкм.

На поверхности нитей обработанного образца ткани видны агломераты волокон и отдельные волокна, плотно прилегающие к нити. При этом нити сильно сближены (5 мкм и менее), что способствует контакту агломератов с несколькими соседними нитями. Практически вся нить имеет покрытие образованное скомплексированными в агломерату волокнами.

Полученные микрофотографии могут быть приняты в качестве обоснования следующего механизма повышения прочности арамидных нитей и тканей после воздействия СВЧ электромагнитного поля. Исследованиями [4, 5] установлено, что структурной единицей арамидных волокон являются жесткие макромолекулы или их агрегаты — фибриллы. Высокая прочность и жесткость таких волокон при растяжении обусловлены высокой степенью ориентации макромолекул вдоль оси волокна и высокой энергией диссоциации химических связей.

Различие напряженного состояния соседних структурных элементов вызывает возникновение напряжений сдвига в граничной области между волокнами, образующими нить. В результате одноосное растяжение волокна сопровождается прорастанием межфибриллярных трещин вдоль направления действия растягивающего усилия.

Расщепление нитей и отделение волокон, по видимому, возникает уже на стадии плетения ткани и сопровождается одновременным обрывом отдельных, наиболее напряженных фрагментов волокна, их выходом на поверхность нити и скручиванием в спиралевидные образования под действием релаксации напряжений. В ре-

зультате ткань воспринимает нагрузки меньшим числом цельных нитей и меньшим числом волокон в каждой из них. Можно заключить, что каждая нить воспринимает внешнюю нагрузку индивидуально. В результате после разрыва первой группы волокон в ходе нагружения нагрузка воспринимается следующим пучком фибрилл, и т. д. до тех пор, пока оставшиеся волокна оказываются не в состоянии сопротивляться нагрузке растяжения, тогда нить рвется. Происходит катастрофическое полное разрушение, сопровождающееся интенсивным расщеплением и распушиванием нитей и повреждением участка ткани. Воздействие СВЧ электромагнитного поля, скорее всего, способствует росту количества межфибрилльных связей на уровне макромолекул. В результате при росте нагрузки формируются условия совместной, а не раздельной работы волокон, образующих нить. Возникновение упомянутых выше трещин, ослабляющее структуру, нивелируется в этом случае описанным действием образованных в СВЧ электромагнитном поле межволоконных структур и дополнительных связей фибрилл, а также формированием агломератов отделившихся волокон вследствие их деформации в электромагнитном поле. Последние заполняют пространство между нитями и вступают с ними в поверхностный контакт на макромеханическом и физическом уровне межмолекулярного взаимодействия. Происходящая остаточная дегидратация волокон и, как следствие, нитей приводит к их частичному укорачиванию и сближению, что облегчает взаимодействие с агломератами волокон и способствует образованию более прочных связей в структуре ткани.

Заключение

Обработка в СВЧ электромагнитном поле вызывает определенную перестройку структуры композита на основе арамидной ткани, которую можно назвать своего рода «квазиструктурированием». Это изменение структуры позволяет создать условия для улучшения сопротивляемости внешним воздействиям, в частности путем повышения прочности на разрыв отдельных нитей и прочности на прокол тканой структуры.



Следовательно, обработка арамидных тканей в СВЧ электромагнитном поле улучшает эксплуатационные, в частности защитные, характеристики элементов легкой бронезащиты, не внося изменения в существующие технологии синтеза волокон, плетения нитей и образования ткани.

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. **Bhatnagar Ashok.** Lightweight ballistic composites. Woodhead Publishing Limited, Cambridge England. 2006. 416 p.
2. **Чистяков Е.** Российские бронежилеты и новые броневые материалы [Электр. ресурс]. URL: http://ser-sarajkin.narod2.ru/ALL_OUT/TiVOut13/RuPersAr/RuPersAr001.htm
3. **Игнатова А.М., Артемов А.О.** Аналитический обзор современных и перспективных материалов и конструкций бронепреград и защит от поражения // Фундаментальные исследования. 2012. № 6–1. С. 101–105.
4. **Мусина Т.К., Волохина А.В., Щетинин А.М. [и др.]** Полиимидные и арамидные волокна и нити со специальными свойствами и изделия на их основе // В мире оборудования. 2010. № 2 (91). С. 4–8.
5. **Шустов Ю.С., Курденкова А.В.** Исследование физико-механических свойств тканей из нитей Рунсар // Научно-методический электронный журнал «Концепт». 2016. Т. 3. С. 36–40. [Электр. ресурс]. URL: <http://e-koncept.ru/2016/56019.htm>
6. Ударопрочные органопластики конструкционного назначения на основе волокон из сверхвысокомолекулярного полиэтилена отечественного производства. [Электр. ресурс]. URL: http://www.uncm.ru/files/uploaded/Composite_materials_2013/Presentations/17.pdf (дата последнего обращения 13.05.2018 г.).
7. **Железина Г.Ф., Зеленина И.В., Лукина Н.Ф. и др.** Легкие конструкционные органопластики, стойкие к ударным и баллистическим воздействиям // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2007. № 8. С. 29–33.
8. **Мураховский В.** Крылатые ткани России // Арсенал Отечества. 2015. № 4(18). URL: <http://arsenal-otechestva.ru/article/613-krylatye-tkani-rossii> (дата обращения 13.05.2018).
9. **Долганина Н.Ю.** Оценка баллистического предела и прогиба много- слойных тканевый пластин при ударе индентором // Вестник Юж.-Урал. гос. ун-та. 2010. № 10. С. 2–3.
10. **Шульдешова П.М., Железина Г.Ф.** Арамидный слоисто-тканый материал для защиты от баллистических и ударных воздействий // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. № 9. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-9-6-6.
11. **Сафонов П.Е.** Разработка оптимальных технологических параметров изготовления арамидных тканей технического назначения : Автореф. дисс. ... канд. техн. наук / М., 2013.
12. **Слугин А.И., Парфенов О.В., Николаева Н.А.** Исследование баллистических свойств тканей // Технология текстильной промышленности. 2011. № 4 (333). С. 74–78.
13. **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, Materials Science Forum. 2016. Vol. 870. P. 101–106.
14. **Zlobina I.V., Bekrenev N.V.** The Influence of Microwave Electromagnetic Field in Mechanical Properties of Composite Materials // Наукоемкие технологии. 2016. Т. 17. № 2. С. 25–30.
15. **Злобина И.В., Бекренев Н.В.** Влияние воздействия СВЧ электромагнитного поля на прочность и микроструктуру баллистических неметаллических материалов // Вопросы электротехнологии. 2017. № 1 (14), С. 40–47.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

ЗЛОБИНА Ирина Владимировна — кандидат технических наук доцент Саратовского государственного технического университета имени Ю.А. Гагарина
E-mail: irinka_7_@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 22.05.2018

REFERENCES

- [1] **Bhatnagar Ashok.** Lightweight ballistic composites. Woodhead Publishing Limited, Cambridge England. 2006. 416 p.
- [2] **Chistyakov Ye.** Rossiyskiye bronezhilye i novyye bronevyye materialy : URL: http://ser-sarajkin.narod2.ru/ALL_OUT/TiVOut13/RuPersAr/RuPersAr001.htm (rus.)
- [3] **Ignatova A.M., Artemov A.O.** Analiticheskiy obzor sovremennykh i perspektivnykh materialov i konstruktivnykh bronepregrad i zashchit ot porazheniya. *Fundamentalnyye issledovaniya*. 2012. № 6—1. S. 101—105. (rus.)
- [4] **Musina T.K., Volokhina A.V., Shchetinin A.M. [i dr.]**. Poliimidnyye i aramidnyye volokna i niti so spetsialnymi svoystvami i izdeliya na ikh osnove. *V mire oborudovaniya*. 2010. № 2 (91). S. 4—8. (rus.)
- [5] **Shustov Yu.S., Kurdenkova A.V.** Issledovaniye fiziko-mekhanicheskikh svoystv tkaney iz nitay Rusar // Nauchno-metodicheskiy elektronnyy zhurnal «Konsept». 2016. T. 3. S. 36—40. URL: <http://e-koncept.ru/2016/56019.htm> (rus.)
- [6] Udaroprochnyye organoplastiki konstruksionnogo naznacheniya na osnove volokon iz sverkhvyso-komolekulyarnogo polietilena otechestvennogo proizvodstva. URL: http://www.uncm.ru/files/uploaded/Composite_materials_2013/Presentations/17.pdf (data poslednego obrashcheniya 13.05.2018 g.). (rus.)
- [7] **Zhelezina G.F., Zelenina I.V., Lukina N.F. [i dr.]**. Legkiye konstruksionnyye organoplastiki, stoykiye k udaram i ballisticheskim vozdeystviyam. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*. 2007. № 8. S. 29—33. (rus.)
- [8] **Murakhovskiy V.** Krylatyye tkani Rossii. *Arsenal Otechestva*. 2015. № 4(18). <http://arsenal-otechestva.ru/article/613-krylatye-tkani-rossii> (13.05.2018). (rus.)
- [9] **Dolganina N.Yu.** Otsenka ballisticheskogo predela i progiba mnogo- sloynnykh tkanevyy plastin pri udare indentorom. *Vestnik Yuzh.-Ural. gos. un-ta*. 2010. № 10. S. 2—3. (rus.)
- [10] **Shuldeshova P.M., Zhelezina G.F.** Aramidnyy sloisto-tkanyy material dlya zashchity ot ballisticheskikh i udarnykh vozdeystviy. *Trudy VIAM: elektron. nauch.-tekhnich. zhurn.* 2014. №9. St. 06. URL: <http://ww.w.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-9-6-6. (rus.)
- [11] **Safonov P.Ye.** Razrabotka optimalnykh tekhnologicheskikh parametrov izgotovleniya aramidnykh tkaney tekhnicheskogo naznacheniya : Avtoref. diss. ... kand. tekhn. Nauk/ M., 2013. (rus.)
- [12] **Slugin A.I., Parfenov O.V., Nikolayeva N.A.** Issledovaniye ballisticheskikh svoystv tkaney. *Tekhnologiya tekstilnoy promyshlennosti*. 2011. № 4 (333). S. 74—78. (rus.)
- [13] **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, Materials Science Forum*. 2016. Vol. 870. P. 101—106.
- [14] **Zlobina I.V., Bekrenev N.V.** The Influence of Microwave Electromagnetic Field on Mechanical Properties of Composite Materials. *Naukoyemkiye tekhnologii*. 2016. T. 17. № 2. S. 25—30. (rus.)
- [15] **Zlobina I.V., Bekrenev N.V.** Vliyaniye vozdeystviya SVCh elektromagnitnogo polya na prochnost i mikrostrukturu ballisticheskikh nemetallicheskih materialov. *Voprosy elektrotekhnologii*. 2017. № 1(14), S. 40—47. (rus.)

THE AUTHOR

ZLOBINA Irina V. — *Yurii Gagarin State technical university or Saratov*
E-mail: irinka_7@mail.ru

Received: 22.05.2018