

КОРРЕЛЯЦИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И МИКРОСТРУКТУРЫ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ АРАМИДНЫХ ТКАНЕЙ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ В СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

И.В. Злобина, Н.В. Бекренев

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

Исследовано влияние СВЧ электромагнитного поля на прочность композиционных материалов на примере образцов, сформированных из арамидной ткани ТСВМ-ДЖ, пропитанной клеем 88 с последующим отверждением. Было проведено две серии экспериментов – в первом случае был использован монослой арамидной ткани без связующего, во втором – с использованием последнего. Установлено, что после воздействия на однослойную арамидную ткань СВЧ электромагнитного поля малой удельной мощности повышается сопротивление образца прокалыванию конусом от 1,8 до 2,2 раза. Эффект упрочнения опытных образцов, изготовленных с использованием связующего и прошедших СВЧ модифицирование, более выражен по сравнению с образцами без использования клея 88 – увеличение прочности составляет до 2 раз. Также произведено исследование микроструктуры указанных серий образцов. На полученных микрофотографиях показано, что в большей степени влияние СВЧ электромагнитного поля выражено на образцах с использованием связующего и проявляется в формировании агломератов меньшего размера, по сравнению с контрольным образцом, появлении у них выраженных граней, что позволяет получить большее число точек контакта, увеличить площадь поверхности соприкосновения, что, в свою очередь, делает их соединение более прочным. В статье показана корреляция приведенных значений роста прочностных характеристик опытных образцов по сравнению с контрольными и изменений микроструктуры, проявившихся после описанного электрофизического воздействия. Вышеперечисленные факты обуславливают возможность управления механическими характеристиками посредством влияния на микроструктуру готовых изделий. Полученные результаты позволяют прогнозировать улучшение эксплуатационных характеристик элементов конструкции летательных аппаратов из органопластиков и средств индивидуальной защиты 1-го, 2-го классов.

Ключевые слова: СВЧ электромагнитное поле, баллистические материалы, прочность, усилие прокалывания, композиционные материалы.

Введение

Высокие прочностные и термостойкие характеристики тканей на основе арамидных нитей определяют их применение в качестве армирующих компонентов композиционных материалов. Из них можно изготавливать конструкционные элементы транспортных средств, в частности – летательных аппаратов. Конструкционные органопластики, армированные арамидными волокнами, относятся к самым легким полимерным композиционным материалам авиационного назначения. Из арамидных органопластиков изготавливают легкие обшивки планера вертолетов, обшивки хвостовых секций несущих винтов вертолетов, обшивки зализов и носков крыла самолетов и др. [1–11]. Разрушение органопластиков в отличие от стекло- и углепластиков сопровождается множественным разрушением самих армирующих волокон с образованием обширной поверхности разрушения. Такой механизм разрушения требует больших затрат энергии, что обуславливает высокую ударную стойкость органопластиков. Поэтому указанные материалы все шире применяются наряду с традиционными в авиастроении стекло- и углепластиковыми.

Композиционные материалы на основе арамидных нитей и тканей применяются не только как конструкционные, но и в качестве 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. Хорошие защитные свойства арамидных тканей в сочетании с легкостью и гибкостью привели к их широкому применению в армии, авиации и во флоте [12, 13]. 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 [14, 15].

Постановка задачи

Исследования по повышению прочности органопластиков на основе арамидных тканей направлены на совершенствование технологий получения исходных компонентов и формирования тканей путем оптимизации плетения [16, 17], что усложняет и удорожает процесс, а также приводит к необходимости перестройки или перевооружения производства, что удлиняет цикл внедрения новых разработок. В этой связи целесообразно изыскание альтернативных методов повышения прочности и надежности изделий из композиционных материалов, содержащих арамидные нити и ткани, без изменений существующих технологий синтеза компонентов и формирования структуры. Одним из эффективных путей реализации данного подхода является модифицирование микроструктуры окончательно сформированных изделий в СВЧ электромагнитном поле. Поскольку в плане структуры и различий в физико-механических свойствах матрицы и наполнителя композиции, содержащие арамидные ткани в качестве армирующего компонента, мало отличаются от изученных нами материалов [18, 19], представляет интерес рассмотреть влияние СВЧ электромагнитного поля на механические свойства композиций арамидных тканей и дополнительно оценить изменение их защитных характеристик.

Целью исследования является изучение влияния воздействия микроволнового излучения на усилие прокола арамидных тканей ТСВМ-ДЖ артикул 56319А, являющихся армирующей основой конструкционных органопластиков и ряда защитных бронепакетов.

Методика исследований, оборудование и аппаратура

Во всех экспериментах использовали монослойные образцы в исходном состоянии и пропитанные клеем 88 с последующим отверждением. Последние представляли собой модели композиционных арамидных структур.

Эксперименты проводили на микроволновой установке «Жук-2-02» (ООО «АгроЭкоТех», г. Обнинск Калужской обл.), позволяющей регулировать мощность СВЧ электромагнитного поля частотой 2450 МГц путем изменения дистанции воздействия. Исследовали три уровня мощности: низкий, средний и высокий. Конкретные параметры удельной мощности не указываются в связи с проходящей процедурой патентования. Время обработки устанавливали равным 1, 4 и 8 минут.

Испытания образцов до и после обработки проводили на компьютерной установке, оснащенной тензометрическими датчиками усилий и червячным механизмом нагружения. Сигналы датчиков передавались через аналогово-цифровой преобразователь в компьютер. Обработка результатов измерения нарастания приложенной к образцу нагрузки по специальной заложенной в установке программе (LabVIEW, г. Орел) позволяла получить графики нагрузки (момента) в динамике от момента ее приложения до прокола образца, фиксируемого по спаду кривой нагружения. В экспериментах использовали образцы размерами 30×40 мм. Специальная оснастка позволяла зажимать образцы по контуру на блоке тензометрического датчика. В нагружающем рычаге установки закреплялся стальной индентор в виде конуса (90°) с радиусом округления вершины 0,1 мм. Микроструктуру образцов изучали при помощи электронного микроскопа MIRA II LMU (Tescan Ersa Holding, Чехия) в Лаборатории материалов специального назначения Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского.

Результаты и обсуждение

Анализ графиков кинетики нарастания усилия прокола исходных и пропитанных образцов (рис. 1) позволяет отметить следующие особенности.

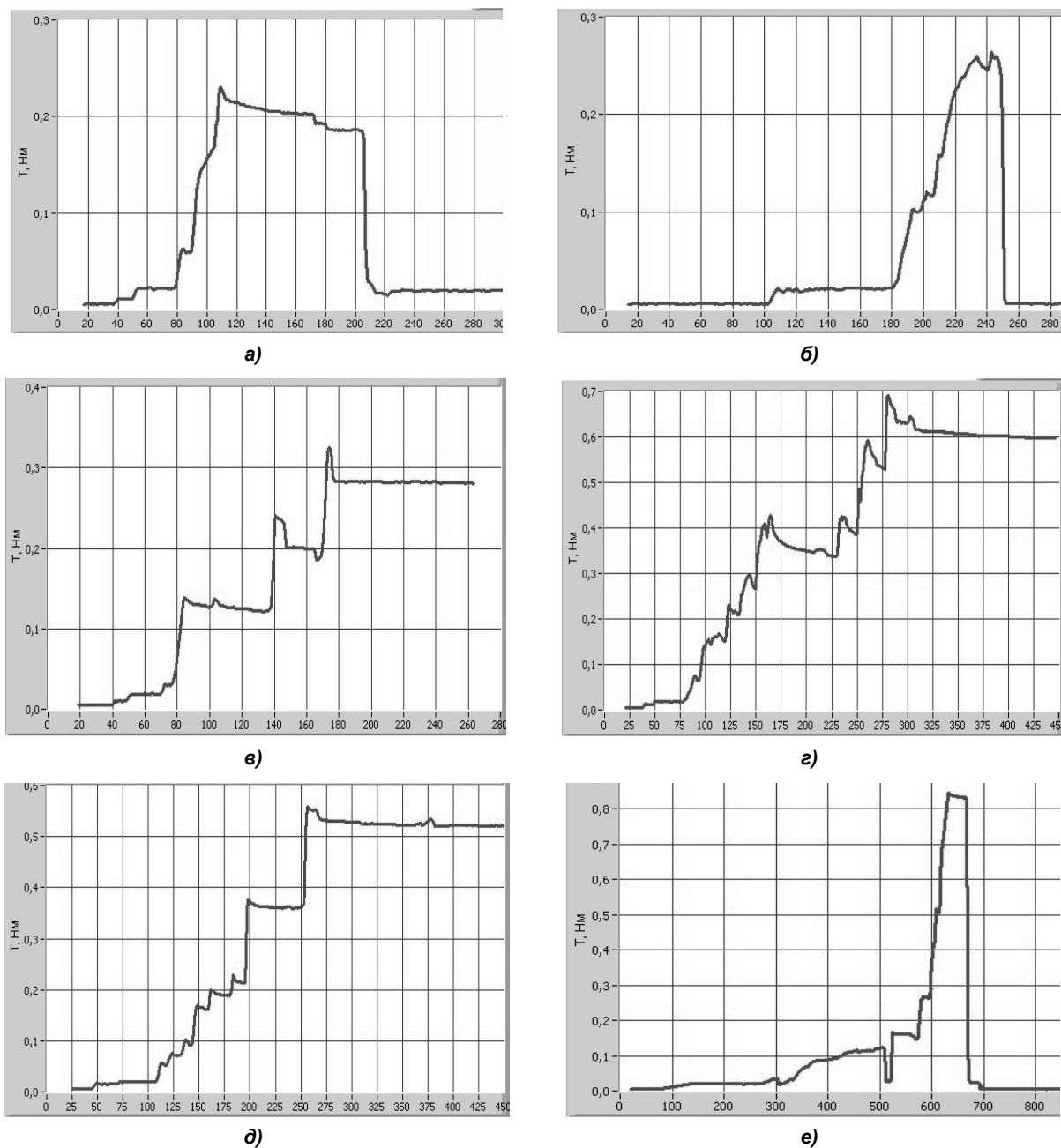


Рис. 1. Кинетика нагружения коническим индентором до момента прокола монослойных образцов ткани ТСВМ-ДЖ в исходном состоянии (а, в, д) и пропитанных клеем 88 с последующим отверждением (б, г, е). Графики а и б относятся к контрольным образцам, графики в и г – к модифицированным в СВЧ электромагнитном поле малой удельной мощности в течение 1 минуты, графики д и е – в течение 4 минут

Процесс нарастания усилия прокола исходных образцов имеет ступенчатый характер, что может быть связано с постепенным растяжением и разрывом отдельных групп нитей тканного материала. Это отмечается как для контрольного, так и для обработанного в СВЧ электромагнитном поле образцов. Разброс значений усилия прокола для контрольного образца составляет от 0,12 до 0,22 Н (в 1,8 раза), для обработанного в течение 4 минут – от 0,4 до 0,6 Н (в 1,5 раза). Для композиционного материала этот параметр существенно отличается. Контрольные образцы имеют разброс значений усилий прокола от 0,26 до 0,65 Н (в 2,5 раза), обработанные – от 0,6 до 0,7 Н (в 1,17 раза). Таким образом, если для исходного материала разброс усилий как контрольного, так и обработанного образцов отличается незначительно, для пропитанных клеем 88 и отвержденных образцов различие весьма существенно. Обработанные в СВЧ электромагнитном поле образцы обеспечивают снижение разброса значений усилия прокола почти в 2 раза. Одно-

временно можно констатировать практическое отсутствие ступенчатого характера нарастания нагрузки и относительно плавный характер графиков. Это возможно связано с тем, что эластичная клеевая матрица способствует выравниванию нагрузок, действующих на нити, также возможно влияние их объединения в жгуты, что также обеспечивает с одной стороны повышение значений максимальных усилий прокола, с другой стороны – нивелирует различия в прочности материала, вызванные погрешностями плетения и структуры нитей, состоящих из волокон и фибрилл. Одновременно эффект повышения прочности образца после обработки в СВЧ электромагнитном поле проявляется для композиции «арамидная ткань – клей 88» значительно в большей степени, чем для исходного монослоя (рис. 2–4).

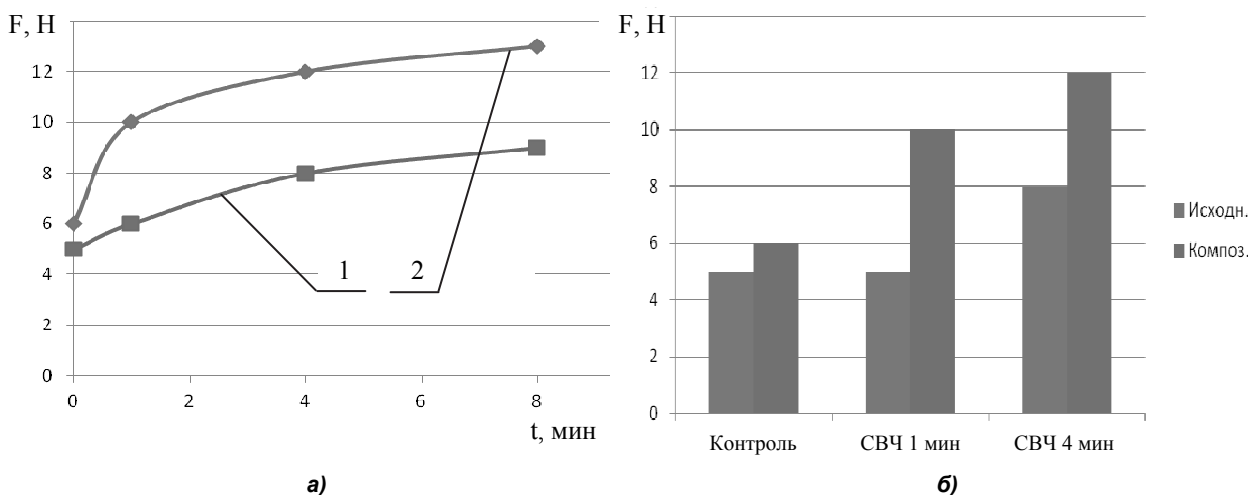


Рис. 2. Влияние мощности СВЧ электромагнитного поля и времени воздействия на изменение усилия прокола исходного монослоя ткани ТСВМ-ДЖ (1) и отвержденного монослоя, пропитанного клеем 88 (2). Закономерность изменения усилия от времени воздействия (а), сравнительная диаграмма (б)

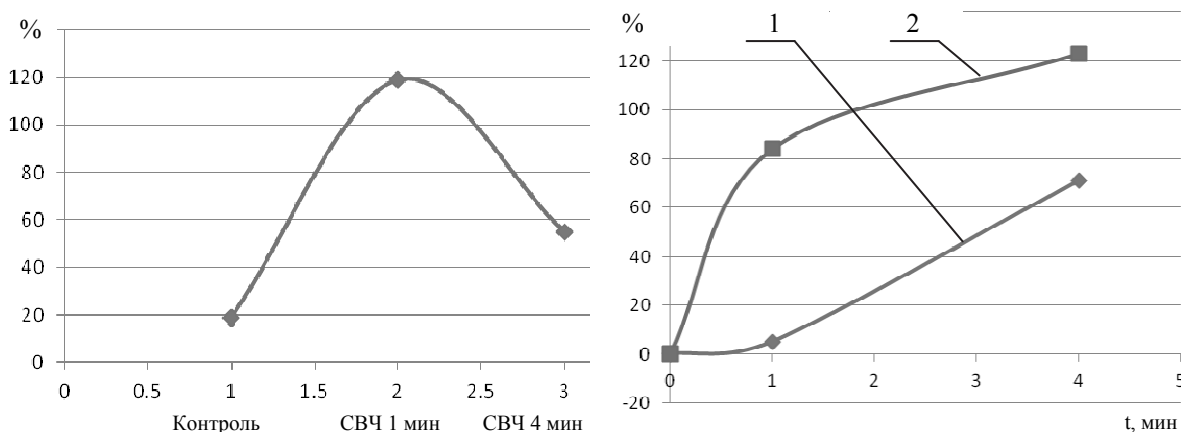


Рис. 3. Влияние связующего (клей 88) на изменение усилия прокола монослоя ткани ТСВМ-ДЖ в зависимости от вида обработки

Рис. 4. Влияние времени воздействия СВЧ электромагнитного поля на изменение усилия прокола исходного монослоя ткани ТСВМ-ДЖ (1) и отвержденного после пропитки клеем 88 монослоя (2)

График нарастания усилия в пропитанном клеем и отвержденном слое показывает его увеличение в 2 раза после обработки в течение 1 минуты. Зависимость имеет явный участок крутого нарастания в период времени 0,5–2 минуты, затем становится более пологой. График зависимости для исходной ткани плавно повышается с увеличением времени нахождения образца в СВЧ электромагнитном поле. После 8 минут СВЧ обработки различие в прочности исходной и пропитанной ткани составляет 1,5 раза и графики являются практически эквидистантными (рис. 2 а). Данный результат может быть обоснован большей эффективностью влияния СВЧ электромагнитного поля на молекулы клеевой матрицы, элементы которой перестраиваются и приобретают

Новые конструкционные материалы

большее число связей с волокнами и нитями армирующей ткани уже в первый момент помещения в поле.

С увеличением времени нарастает значение укрепления межфибрильных связей волокон в арамидных нитях, что приводит к упрочнению армирующего компонента. В то же время, по-видимому, клеевая матрица после отверждения фиксирует фибриллы и препятствует их взаимодействию, что замедляет упрочнение композита с течением времени СВЧ воздействия относительно исходного тканного материала.

Данное предположение иллюстрируется графиками влияния связующего и времени СВЧ воздействия на эффект повышения усилия прокола изучаемых материалов (см. рис. 3 и 4).

Видно, что проникновение клеевой матрицы между арамидными нитями способствует увеличению прочности образца при испытаниях на прокол на 19–20 %. Воздействие СВЧ электромагнитного поля на отвержденный композит с данным составом в течение 1 минуты вызывает рост усилия на 120 %. Более длительная обработка (4 минуты) хотя и обеспечивает дальнейшее повышение прочности образца (см. рис. 2 а и б), тем не менее вызывает относительно меньший рост прочности до 55 %. Аналогичные результаты дает и анализ зависимости от времени СВЧ воздействия увеличения прочности образцов при прокалывании индентором (см. рис. 4).

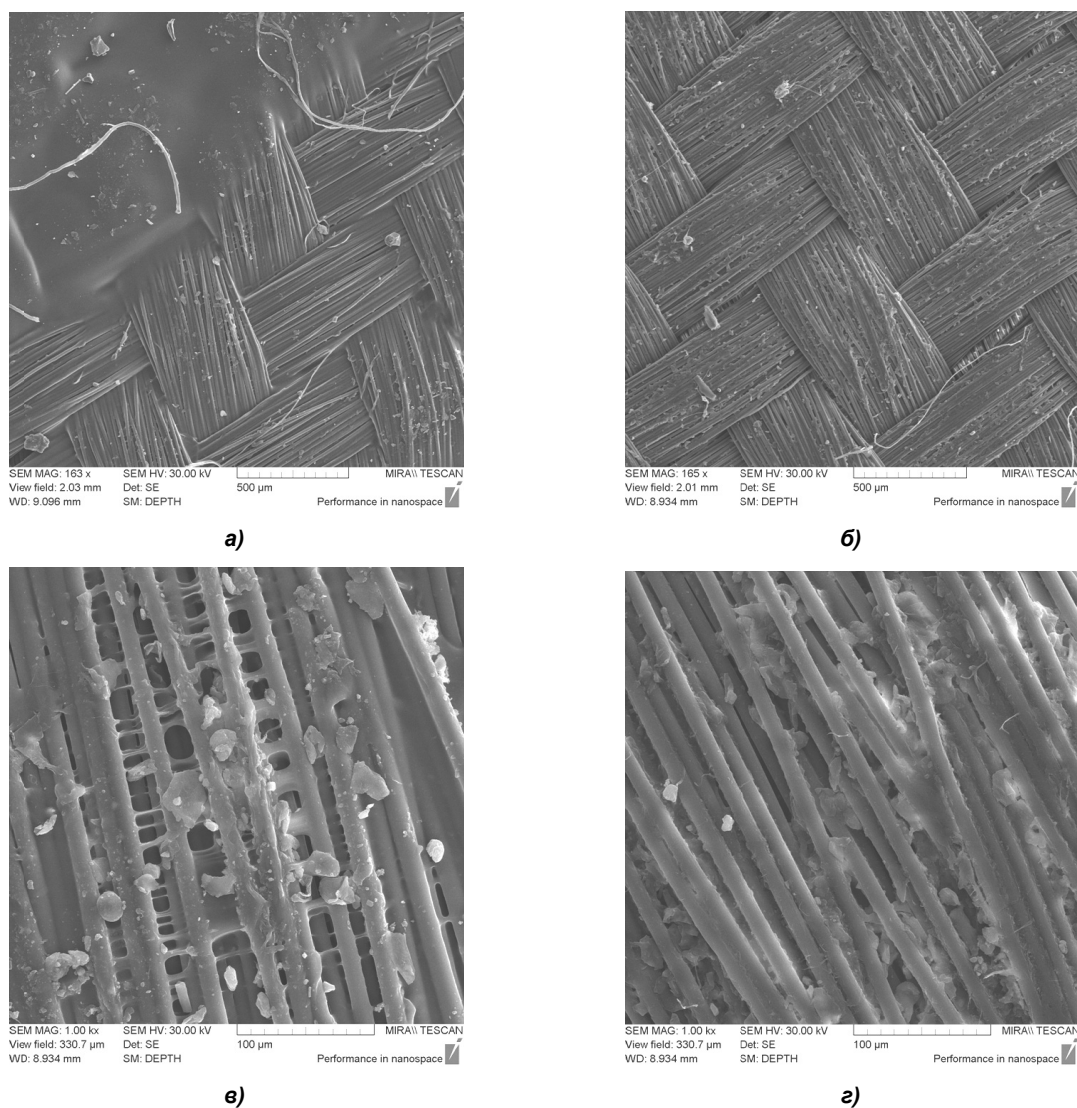


Рис. 5. Внешний вид отвержденного монослоя ткани ТСВМ-ДЖ, пропитанного клеем 88. Контрольные образцы (а, в), образцы, модифицированные в СВЧ электромагнитном поле (б, г). Поле зрения 2 мм (а, б) и 0,33 мм (в, г)

Изучение микрофотографий структуры отвержденного после пропитки клеем 88 образца арамидной ткани ТСВМ-Дж (рис. 5 и 6) подтверждает высказанные нами выше предположения о механизме упрочнения данного материала. При малом увеличении в поле зрения 2 и 0,33 мм не отмечаются существенные различия в структуре поверхности и межслоевой структуре контрольного и модифицированного в СВЧ электромагнитном поле образцов (рис. 5). Тем не менее в поле зрения 0,33 мм видны тонкие клеевые связи между нитями, в то время как промежутки между нитями обработанного образца частично или полностью заполнены монолитными клеевыми агломератами (рис. 5 в и з).

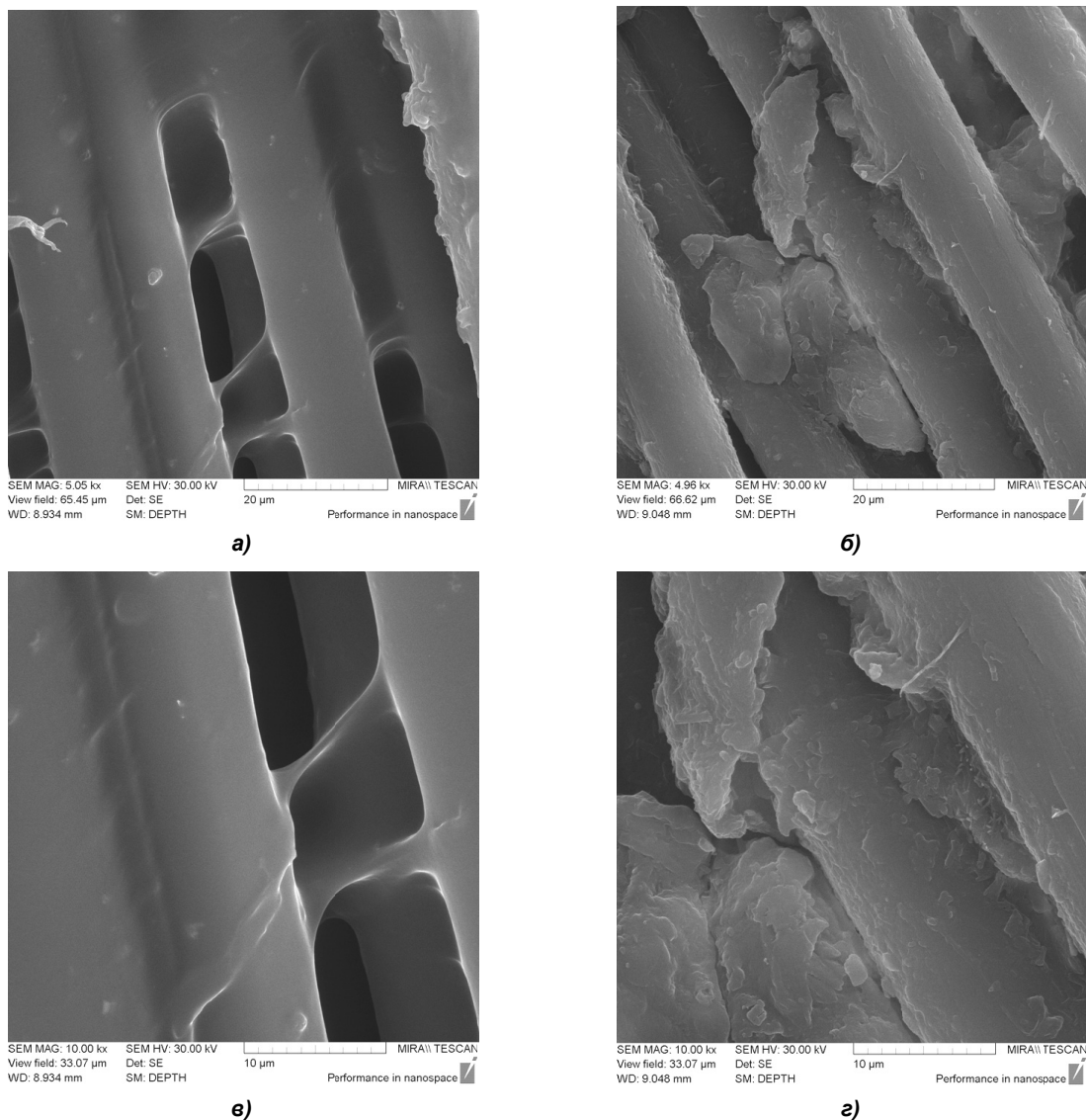


Рис. 6. Внешний вид отвержденного монослоя ткани ТСВМ-Дж, пропитанного клеем 88. Контрольные образцы (а, в), образцы, модифицированные в СВЧ электромагнитном поле (б, з). Поле зрения 65,45 мкм (а), 66,62 мкм (б), 33,07 мкм (в, з)

При большем увеличении (поле зрения 66,62–33,07 мкм) хорошо видно, что арамидные волокна контрольного образца покрыты слоем клеювого связующего в виде тонкой оболочки и связаны между собой тонкими (5–10 мкм) пленочными мостиками. Расстояние между волокнами составляет 10 мкм и более, т. е. структура достаточно рыхлая со слабыми связями между нитями и волокнами. В целом структура имеет вид округлых систем с плавными сопряжениями на относительно небольшом количестве участков.

Структура модифицированных в СВЧ электромагнитном поле образцов имеет существенно отличный вид. Все нити и волокна размещены достаточно близко друг от друга, что свидетельст-

Новые конструкционные материалы

вует о плотном контакте между ними. Клеевая матрица имеет вид не тонких пленок, а объемных агломератов с развитой поверхностью с многочисленными острыми выступами. Агломераты имеют угловатую форму и полностью заполняют промежутки между нитями на участках значительной протяженности.

Аналогичная структура отмечалась нами у отвержденных армированных углеродными волокнами композиционных материалов с квазиизотропной структурой [9], что свидетельствует о сходном механизме влияния СВЧ электромагнитного поля на полимерные диэлектрики. Очевидно, в результате взаимодействия с электромагнитным полем сверхвысоких частот происходит интенсивная дегидратация полимерной матрицы, приводящая к деформациям сжатия и уменьшению размеров агломератов, которые в процессе сжатия стягивают арамидные нити, уплотняя структуру и повышая сопротивление проникновению индентора. Одновременно молекулы полимера поляризуются и совершают колебания с частотой СВЧ электромагнитного поля. В условиях дегидратации и некоторого снижения пластичности и повышения твердости это вызывает значительные внутренние напряжения, приводящие к микрорастрескиванию и появлению характерной угловатой формы агломератов с большим количеством точек контакта. Последнее наряду с уплотнением структуры способствует увеличению количества механических связей матрицы и нитей и дополнительно повышению прочности арамидного композита.

Заключение

Таким образом, установлено, что модифицирование в течение 1–2 минут в СВЧ электромагнитном поле малой удельной мощности композиционных материалов на основе клея типа 88 с наполнителем из монослоя арамидной ткани ТСВМ-ДЖ приводит к увеличению сопротивления проникновению конического индентора до 2 раз при одновременном двухкратном повышении равномерности данного показателя по поверхности образца и в партии. Наибольший эффект по упрочнению достигается в первые 2 минуты модифицирования. Причиной данных изменений механических характеристик может быть установленный на основе изучения электронных микрофотографий факт изменения вида контактного механического взаимодействия матрицы и армирующих нитей. Редкие тонкие пленочные связи замещаются на агломерированные структуры с развитой угловатой поверхностью, обеспечивающей многоточечный контакт.

Указанное повышение прочностных характеристик изделий из композиционных арамидных материалов может быть использовано при конструировании облегченных несущих элементов и оболочек фюзеляжа, несущих плоскостей и оперения малогабаритных летательных аппаратов с высокими маневренными характеристиками, а также при совершенствовании легких систем бронезащиты личного состава ВВС, МЧС и вооруженных сил.

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».

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» / Е.Н. Каблов // *Авиационные материалы и технологии*. – 2015. – №1. – С. 3–33.
2. Каблов, Е.Н. *Материалы и химические технологии для авиационной техники* / Е.Н. Каблов // *Вестник Российской академии наук*. – 2012. – Т. 82. – № 6. – С. 520–530.
3. *Ударопрочные органопластики конструкционного назначения на основе волокон из сверхвысокомолекулярного полиэтилена отечественного производства* / Е.А. Беляева, Т.Е. Шацкая, А.Ф. Косолапов и др. – http://www.unctm.ru/files/uploaded/Composite_materials_2013/Presentations/17.pdf (дата обращения: 16.11.2018).
4. *Легкие конструкционные органопластики, стойкие к ударным и баллистическим воздействиям* / Г.Ф. Железина, И.В. Зеленина, Н.Ф. Лукина и др. // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. – 2007. – № 8. – <https://viam.ru/public/files/2007/2007-204775.pdf> (дата обращения: 16.11.2018).
5. *Мураховский, В.И. Крылатые ткани России* / В.И. Мураховский // *Арсенал Отечества*. – 2015. – № 4 (18). – <http://arsenal-otechestva.ru/article/613-krylatye-tkani-rossii> (дата обращения: 16.11.2018).

6. Влияние длительного климатического старения на микроструктуру поверхности эпокси-дных органоластиков и характер ее разрушения в условиях изгиба / И.С. Деев, Е.В. Куршев, С.Л. Лонский и др. // Вопросы материаловедения. – 2016. – № 3. – С. 104–114.
7. Конструкционные органоластики для защиты от ударных и баллистических воздействий / Г.Ф. Железина, И.В. Зеленина, Л.Г. Орлова и др. // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2007. – № 8. – <https://viam.ru/public/files/2007/2007-204914.pdf> (дата обращения: 16.11.2018).
8. Degradation of aramid fibers under alkaline and neutral conditions: Relations between the chemical characteristics and mechanical properties / G. Derombise, L. Vouyovitch Van Schoors, P. Davies // Journal of Applied Polymer Science. – 2010. – Vol. 116, № 5. – P. 888–898.
9. Long-term mechanical behavior of aramid fibers in seawater / G. Derombise, E. Chailleux, B. Forest et al. // Polymer Engineering & Science. – 2011. – Vol. 51. – № 7. – P. 1366–1375.
10. Hydrothermal aging mechanisms of aramid fibers via synchrotron small-angle X-ray scattering and dynamic thermal mechanical analysis / C. Li, M. Zhan, X. Huag et al. // Journal of Applied Polymer Science. – 2013. – Vol. 128. – № 2. – P. 1291–1296.
11. Дударев, А.С. Технологическая оснастка для проведения баллистических испытаний тканых материалов / А.С. Дударев, С.Д. Кускова // Masters Journal. – 2016. – № 1. – С. 45–50.
12. Bhatnagar, A. Lightweight ballistic composites / A. Bhatnagar. – England, Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2006. – 416 p.
13. Игнатова, А.М. Аналитический обзор современных и перспективных материалов и конструкций бронепреград и защит от поражения / А.М. Игнатова, А.О. Артемов // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 6-1. – С. 101–105.
14. Чистяков, Е.Н. Российские бронезилеты и новые броневые материалы / Е.Н. Чистяков // Техника и вооружение. – 2013. – № 8. – <https://knigogid.ru/books/405234-tehnika-i-vooruzhenie-2013-08/toread> (дата обращения: 16.11.2018).
15. Шустов, Ю.С. Исследование физико-механических свойств тканей из нитей Русар / Ю.С. Шустов, А.В. Курденкова // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2016. – Т. 3. – С. 36–40. – <http://e-koncept.ru/2016/56019.htm> (дата обращения: 16.11.2018).
16. Сафонов, П.Е. Разработка оптимальных технологических параметров изготовления арамидных тканей технического назначения: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.19.02 / П.Е. Сафонов. – М., 2013. – 16 с.
17. Слугин, А.И. Исследование баллистических свойств тканей / А.И. Слугин, О.В. Парфенов, Н.А. Николаева // Технология текстильной промышленности. – 2011. – № 4. – С. 74–78.
18. Zlobina, I.V. 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, Materials Science Forum. – 2016. – Vol. 870. – P. 101–106. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.870.101
19. Zlobina, I.V. The Influence of Microwave Electromagnetic Field on Mechanical Properties of Composite Materials / I.V. Zlobina, N.V. Bekrenev // Наукоемкие технологии. – 2016. – Т. 17. – No. 2. – С. 25–30.

Злобина Ирина Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая механика и детали машин», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов, irinka_7_@mail.ru.

Бекренев Николай Валерьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техническая механика и детали машин», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов, nikolaj.bekrenev@yandex.ru.

Поступила в редакцию 16 ноября 2018 г.

PHYSICOMECHANICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE OF COMPOSITE MATERIALS: A STUDY OF ARAMID FABRICS MODIFIED IN AN SHF ELECTROMAGNETIC FIELD

I.V. Zlobina, irinka_7_@mail.ru,

N.V. Bekrenev, nikolaj.bekrenev@yandex.ru

Yuri Gagarin Saratov State Technical University, Saratov, Russian Federation

We studied the effect of an SHF electromagnetic field on the strength of composite materials. We used samples of aramid fabric TSVM-DZh which was impregnated with glue 88 and cured. We carried out two series of experiments. In the first case, we used a single-layer of aramid fabric without a binder, and in the second - with a binder. We established that after single-layer aramid fabric was exposed to an SHF electromagnetic field of low specific power, the resistance of samples to cone puncturing increases from 1.8 to 2.2 times. The samples that were made with a binder and exposed to SHF modification had a greater strengthening effect than the samples without glue 88. The strength increased up to 2 times. We also studied the microstructure of these series of samples. The microphotographs show that the SHF electromagnetic field has a more pronounced effect on the samples with a binder, which results in formation of agglomerates smaller than in the control sample. The agglomerates have pronounced edges, which allows us to obtain more contact points, to increase the contact surface area, thus strengthening their connection. The paper shows the correlation between the corrected values of increase in strength properties of the experimental samples in comparison with the control ones and the changes in microstructure caused by the described electrophysical effect. The above facts make it possible to control the mechanical properties by influencing the microstructure of end products. The results allow us to predict an improvement in the performance of structural aircraft elements made of organoplastics and personal protective equipment of the 1st and 2nd classes.

Keywords: SHF electromagnetic field, ballistic materials, strength, puncturing force, composite materials.

References

1. Kablov E.N. [Innovative Developments FSUE "VIAM" SSC RF for the Implementation of "Strategic Directions for the Development of Materials and Technologies for Their Processing for the Period to 2030"]. *Aviation materials and technologies*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. (in Russ.)
2. Kablov E.N. [Materials and Chemical Technologies for Aviation Equipment]. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*, 2012, vol. 82, no. 6, pp. 520–530. (in Russ.)
3. Belyaeva E., Shackaya T., Kosolapov A. et al. *Udaroprochnye organoplastiki konstrukcionnogo naznacheniya na osnove volokon iz sverhvyssokomolekulyarnogo poliehtilena otechestvennogo proizvodstva* [Impact-Resistant Organoplastics of Structural Design on the Basis of Fibers of Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene of Domestic Production]. Available at: http://www.uncm.ru/files/uploaded/Composite_materials_2013/Presentations/17.pdf.
4. Zhelezina G.V., Zelenina I.F., Lukina N.F. et al. [Lightweight Structural Organoplastics Resistant to Shock and Ballistic Effects]. *Vse materialy. Enciklopedicheskij spravochnik*, 2007, no. 8. Available at: <https://viam.ru/public/files/2007/2007-204775.pdf>. (in Russ.)
5. Murahovskij V.I. [Winged Fabrics of Russia]. *Arsenal Otechestva*, 2015, no. 4. Available at: <http://arsenal-otechestva.ru/article/613-krylatye-tkani-rossii>. (in Russ.)
6. Deev I.S., Kurshev E.V., Lonskij S.L. et al. [The Effect of Long-Term Climatic Aging on the Microstructure of the Surface of Epoxy Organic Plastics and the Nature of Its Destruction under Conditions of Bending]. *Voprosy materialovedeniya*, 2016, no. 3, pp. 104–114. (in Russ.)
7. Zhelezina G.F., Zelenina I.V., Orlova L.G. et al. [Structural Organoplastics for Protection Against Shock and Ballistic Effects]. *Vse materialy. Enciklopedicheskij spravochnik*, 2007, no. 8. Available at: <https://viam.ru/public/files/2007/2007-204914.pdf>. (in Russ.)

8. Derombise G., Vouyovitch Van Schoors L., Davies P. Degradation of Aramid Fibers under Alkaline and Neutral Conditions: Relations Between the Chemical Characteristics and Mechanical Properties. *Journal of Applied Polymer Science*, 2010, vol. 116, no. 5, pp. 888–898.
9. Derombise G., Chailleux E., Forest B. et al. Long-Term Mechanical Behavior of Aramid Fibers in Seawater. *Polymer Engineering & Science*, 2011, vol. 51, no. 7, pp. 1366–1375.
10. Li C., Zhan M., Huag X. et al. Hydrothermal Aging Mechanisms of Aramid Fibers Via Synchrotron Small-Angle X-ray Scattering and Dynamic Thermal Mechanical Analysis. *Journal of Applied Polymer Science*, 2013, vol. 128, no. 2, pp. 1291–1296.
11. Dudarev A.S., Kuskova S.D. [Technological Equipment for Ballistic Testing of Woven Materials]. *Masters Journal*, 2016, no. 1, pp. 45–50. (in Russ.)
12. Bhatnagar A. *Lightweight Ballistic Composites*. England, Cambridge, Woodhead Publishing Limited, 2006. 416 p.
13. Ignatova A.M., Artemov A.O. Analytical Review of Modern and Promising Materials and Designs of Armored Obstacles and Defenses Against Destruction. *Fundamental'nye issledovaniya*, 2012, no. 6-1, pp. 101–105. (in Russ.)
14. Chistyakov E.N. Russian Body Armor and New Armor Materials. *Tekhnika i vooruzhenie*, 2013, no. 8. Available at: <https://knigogid.ru/books/405234-tehnika-i-vooruzhenie-2013-08/toread>. (in Russ.)
15. Shustov Yu.S., Kurdenkova A.V. Study of the Physicomechanical Properties of Fabrics from Rusar Threads. *Nauchno-metodicheskij ehlektronnyj zhurnal "Koncept"*, 2016, vol. 3, pp. 36–40. Available at: <http://e-koncept.ru/2016/56019.htm>. (in Russ.)
16. Safonov P.E. *Razrabotka optimal'nyh tekhnologicheskikh parametrov izgotovleniya aramidnyh tkaney tekhnicheskogo naznacheniya*. Kand. Abstract Diss. [Development of Optimal Technological Parameters for the Manufacture of Aramid Fabrics for Technical Purposes. Kand. Abstract Diss.]. Moscow, 2013. 16 p.
17. Slugin A.I., Parfenov O.V., Nikolaeva N.A. The Study of the Ballistic Properties of Tissue. *Tekhnologiya tekstil'noj promyshlennosti*, 2011, no. 4, pp. 74–78. (in Russ.)
18. 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, pp. 101–106. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.870.101
19. Zlobina I.V., Bekrenev N.V. The Influence of Microwave Electromagnetic Field in Mechanical Properties of Composite Materials. *Naukoemkie tekhnologii*, 2016, vol. 17, no. 2, pp. 25–30.

Received 16 November 2018

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Злобина, И.В. Корреляция физико-механических свойств и микроструктуры композиционных материалов на основе арамидных тканей, модифицированных в СВЧ электромагнитном поле / И.В. Злобина, Н.В. Бекренев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2018. – Т. 18, № 4. – С. 66–75. DOI: 10.14529/engin180407

FOR CITATION

Zlobina I.V., Bekrenev N.V. Physicomechanical Properties and Microstructure of Composite Materials: a Study of Aramid Fabrics Modified in an SHF Electromagnetic Field. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2018, vol. 18, no. 4, pp. 66–75. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin180407