

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

## ПРОЧНОСТНЫЕ ИСПЫТАНИЯ МОДИФИЦИРОВАННЫХ В СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

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

**Аннотация.** Выполнены исследования прочностных характеристик композиционных материалов, армированных углеродными волокнами, после их модифицирования в СВЧ электромагнитном поле различной подведенной мощности. На примере пултрузионного карбона установлено, что, по сравнению с контрольными образцами СВЧ, воздействие средней мощности в течение 2 минут на окончательно сформированный объект позволяет повысить предельные напряжения изгиба на 10–12%, среза – на 36–38%, растяжения – на 34%, смятия – на 81%. При этом продолжительность процесса разрушения при изгибе образца увеличивается на 50–60%, при срезе – до 5 раз, а остаточная деформация снижается с 10–15 мм до 1 мм и менее.

**Ключевые слова:** композиционные материалы, углеродные волокна, пултрузионный карбон, микроструктура, контактная зона, СВЧ электромагнитное поле.

УДК: 621.9.047/048

**Введение.** В конструкции современных и перспективных летательных аппаратов все шире применяются композиционные материалы на основе углепластиков.

В настоящее время на долю углепластиков приходится до половины веса современного самолета как боевого, так и гражданского, до 70 % их поверхности. Внедрение композиционных материалов позволяет снижать вес летательных аппаратов на тонны [1]. Анализ научно-технической литературы, материалов конференций и выставок свидетельствует об интенсивном развитии производства композиционных материалов

---

© Злобина И. В., Бекренев Н. В., Павлов С. П., 2017

*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.

*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.

*Павлов Сергей Петрович*

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

Поступила 13.07.2017

на основе углеродных волокон и стеклотканей и их широком применении в авиационной, автомобильной, судостроительной промышленности, ракетостроении и космической технике. По данным исследовательской компании Grand View Research, объем мирового рынка углепластиков достигнет к 2022 г. \$23,55 млрд. По данным другой исследовательской компании, MarketsandMarkets, глобальный рынок углепластиков уже к 2020 г. поднимется до уровня \$35,74 млрд. 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 [2]–[4]. 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 [2].

**Постановка задачи.** Изложенное свидетельствует о существовании и сохранении в близкой и отдаленной перспективе потребности высокотехнологичных производств с применением композиционных материалов высокого качества. Однако, композиционные материалы характеризуются выраженной анизотропией физико-механических характеристик, определяемой видом и ориентацией армирующих компонентов. В тоже время перспективные авиационные и ракетные комплексы будут высокоманевренными, использованы в условиях гиперзвуковых скоростей в атмосфере и ближнем космосе, что выдвигает повышенные требования к механической и термической прочности их конструктивных элементов, имеющих сложные формы, сильно влияющие на распределение опасных механических и температурных напряжений. В этой связи с целью снижения габаритно-массовых характеристик конструктивных элементов, особенно из полимерных материалов, целесообразно их армирование содержащими углеродные волокна композиционными материалами. Перспективно использование армированных микро- и наночастицами композитов с полимерной матрицей, обладающих малым весом, значительной прочностью и высоким температурным потенциалом. Весьма актуальными являются исследование и разработка методов определения эффективных термомеханических свойств армированных композитов и их оптимизация с учетом свойств межфазного слоя, конструктивных особенностей изделия и характера действующих нагрузок.

Путем моделирования полей напряжений в сложных по конструкции изделиях [5, 6] выявлена потенциальная возможность повышения их эксплуатационной прочности за счет размещения в составе материала изделия упрочненных областей, ориентация и форма которых коррелируют с формой полей напряжений, возникающих при функционировании изделия. Одним из новых путей реализации данной возможности по сравнению с предыдущими исследованиями является оптимизация микроструктуры посредством распределения включений, их ориентации, варьирования объемной доли и формы включений по отношению к заданной целевой функции. Путем внесения армирующих компонентов возможно создание элементарных ячеек, которые будут являться наименьшей структурой, периодически повторяющейся в композиционном материале. При изменении объемной доли или формы включений, топологии элементарной ячейки материал будет приобретать различные свойства. На основе анализа

априорной информации можно считать, что данная оптимизация может быть проведена не только путем внесения компонентов, но и их модифицированием электрофизическими воздействиями, что значительно проще реализовать, поскольку процесс является управляемым благодаря регулированию технологических режимов без вмешательства в синтез материала.

Однако наряду с известными преимуществами, композиционные армированные волокнами материалы имеют существенный недостаток – высокую анизотропию свойств. Например, обладая высокой прочностью на разрыв в направлении армирующих волокон, такие материалы имеют существенно меньшую изгибную прочность и прочность по межслоевому сдвигу [3, 4], что предопределяет сочетание двух описанных выше путей оптимизации конструкции изделий из неметаллических материалов, однако в этом направлении в настоящее время объем исследований еще невелик.

Применение СВЧ электромагнитного поля для тепловой и нетепловой обработки диэлектрических, в том числе композиционных, материалов позволяет интенсифицировать процесс и повысить степень равномерности обработки вследствие объемного характера воздействия [7]-[11]. В настоящее время благодаря работам отечественных и зарубежных ученых в основном создана теория СВЧ-нагрева диэлектрических материалов и разработаны научные основы расчета СВЧ-камер различного типа и технологических магнетронов, реализованные в установках промышленного и бытового назначения.

**Методика исследований и аппаратура.** Нами исследовано влияние воздействия СВЧ электромагнитного поля на прочностные характеристики пултрузионного карбона, наиболее распространенного композиционного материала в конструкциях ультралегких летательных аппаратов и возможного упрочняющего компонента в неметаллических изделиях, формируемых из термопластов путем экструзии, прессования или аддитивных технологий.

В экспериментах использовали СВЧ-установку с магнетроном OM75S(31) с частотой 2450 МГц. Применяли три режима СВЧ мощности: низкий РI, средний РII и высокий РIII. По результатам постановочных опытов и на основе априорной информации время СВЧ-воздействия выбрано равным 2 минуты. Одновременно обрабатывали по 3 образца длиной 80 мм и диаметром 5 мм. Образцы помещали на расстоянии 15 мм от нижней поверхности камеры установки. Для обеспечения нормальной работы магнетрона и недопущения перегрева в камере устанавливали балластную емкость с водой.

Испытания образцов до и после обработки проводили на установке, оснащенной тензометрическими датчиками усилий и червячным механизмом нагружения с постоянной скоростью (рис. 1). Сигналы датчиков передавались через аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) в компьютер. Обработка результатов измерения нарастания приложенной к образцу нагрузки производилась по специальной заложенной в установке программе (LabVIEW, г. Орел) и позволила получить графики нагрузки (момента на приводе) в динамике от момента приложения до разрушения. Специальное разработанное нами оснащение позволяло выполнять испытания образцов на срез, изгибную прочность, смятие и продольную устойчивость. Прочность образцов оценивали как среднюю величину измерений нагружающего момента по максимальным и минимальным точкам графика кинетики нагружения в пределах участка, соединяющего восходящую и нисходящую ветви. Затем по известным зависимостям механики материалов вычисляли напряжения среза и изгиба, а также модуль упругости.

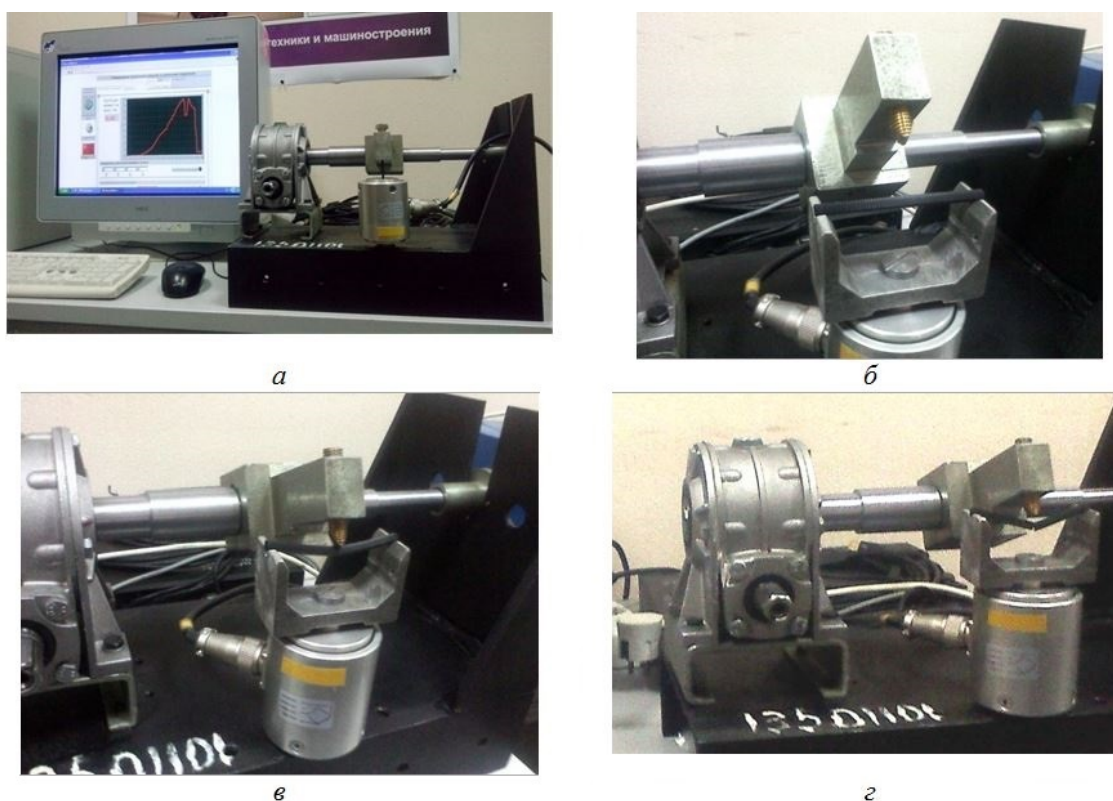


Рис. 1. Компьютерная установка для испытаний на изгиб, срез, смятие и продольную устойчивость: общий вид (а); рабочая зона (б); момент испытаний (в); момент разрушения образца (г)

При испытаниях на изгибную прочность образцы устанавливали на опоры оснастки, закрепленной на тензометрическом датчике, через АЦП связанным с компьютером, в котором обработка сигналов производилась и выдавалась на экран монитора в виде графика текущих величин нагружающего момента  $M$ . Расстояние между опорами – 60 мм. Нагружение осуществляли при помощи червячного редуктора с электроприводом, входящего в состав установки. С пуансоном контактировал индикатор, по которому фиксировали каждые 0,1 мм деформации. Соответственно с экрана монитора считывали значения нагружающего момента. Измерения останавливали после потери образцом целостности или после прекращения устойчивого падения нагрузки на датчике. Предельную нагрузку определяли как среднее по нескольким точкам значение нагружающего момента, согласно полученному графику от момента прекращения стабильного нарастания его величины до момента спада не менее, чем на 15%. Прочность оценивали по максимальному напряжению изгиба, определяемому расчетным путем на основе полученных значений нагрузок. Модуль упругости определяли также расчетным путем с учетом нарастания деформации и деформирующей силы по известным зависимостям сопротивления материалов.

При испытаниях на срез образцы длиной 30 мм (контрольные и после СВЧ обработки) устанавливали цилиндрической поверхностью в продольный паз в шейке вала экспериментальной установки. При этом глубина паза равнялась радиусу образца. На

вал надевали рычаг с внутренним пазом, в который попадала наружная часть цилиндрической поверхности образца. При вращении вала момент рычагу передавался через испытуемый образец. При этом рычаг воздействовал на тензометрический датчик, через АЦП связанный с компьютером, в котором производилась обработка сигналов и выдавалась на экран монитора в виде графика текущих величин нагружающего момента  $M$ . При нагружении в диаметральной плоскости образца действовали перерезывающие силы, при превышении предела прочности вызывающие деформацию сдвига и затем срез части образца. Измерения останавливали после потери образцом целостности. Прочность оценивали по максимальному касательному напряжению среза, определяемому расчетным путем на основе полученных значений нагрузок.

При испытаниях на смятие образцы длиной 15 мм (контрольные и после обработки) устанавливали цилиндрической поверхностью на подпятник (опору) оснастки, закрепленной на тензометрическом датчике, через АЦП связанным с компьютером, в котором производилась обработка сигналов и выдавалась на экран монитора в виде графика текущих величин нагружающего момента  $M$ . С пуансоном контактировал индикатор, по которому фиксировали каждые 0,05 мм деформации. Соответственно с экрана монитора считывали значения нагружающего момента. Измерения останавливали после потери образцом целостности или после прекращения устойчивого падения нагрузки на датчик. Прочность оценивали по максимальному напряжению сжатия, определяемому расчетным путем на основе полученных значений нагрузок.

При испытаниях на растяжение образцы (контрольные и после СВЧ обработки) закрепляли в захватах машины испытательной универсальной ИР 5082-100 (рис. 2).



Рис. 2. Рабочая зона установки ИР 5082-100 (а) и испытываемый образец в захватах (б)

Нагрузка воспринималась тензометрическими датчиками и через АЦП передавалась на компьютер, в котором производилась обработка сигналов и выдавалась на экран монитора в виде графика текущих величин нагружающей силы и соответствующей деформации. Нагружение осуществляли при помощи привода установки с программируемым выбором величины нагружающей силы и скорости ее нарастания. Измерения останавливались автоматически после потери образцом целостности. Предельная нагрузка выдавалась на экран монитора. Прочность оценивали по среднему

растягивающему напряжению, приводящему к разрушению образца и определяемому расчетным путем на основе полученных значений нагрузок.

Схемы испытаний представлены на рисунках 3–6.

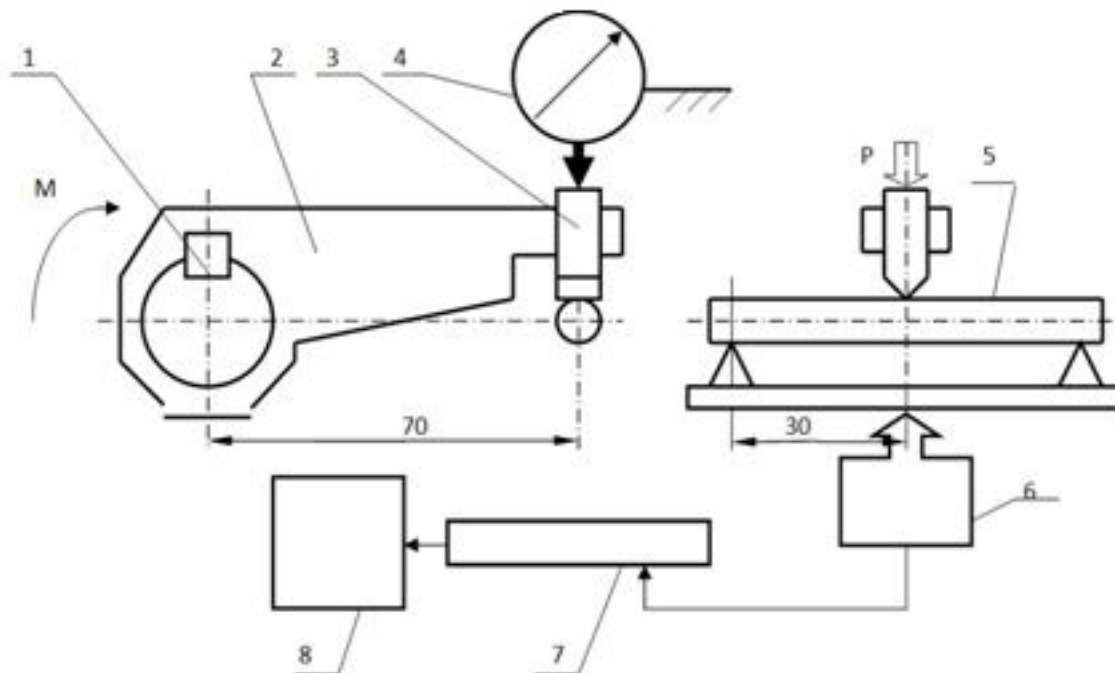


Рис. 3. Схема испытаний на изгибную прочность: 1 – шпонка; 2 – рычаг; 3 – пуансон; 4 – индикатор часового типа с ценой деления 0,01 мм; 5 – образец; 6 – тензометрический датчик; 7 – аналогово-цифровой преобразователь; 8 – компьютер

**Результаты и обсуждение.** Результаты испытаний в виде текущих графиков нагружения образцов, взятых с монитора лабораторной установки, представлены на рисунках 7 и 8, получены на основе их данных после пересчета зависимости величин напряжений при соответствующей схеме нагружения (рис. 9). Результаты испытания образцов на машине ИР 5082-100 представлены на рисунке 10.

Анализ графиков, описывающих кинетику нагружения, позволяет сделать вывод, что воздействие СВЧ электромагнитного поля не только приводит к увеличению предельных напряжений, но и способствует растянутому во времени процессу разрушения. На графиках в ряде случаев выделяются явные параллельные оси абсцисс участки от момента окончания нагружения до момента начала разрушения, определяющегося по началу спада графика. Это может быть проявлением пластической деформации образца, сопровождающейся накоплением внутренней энергии, т. е., возможно, СВЧ электромагнитное поле, воздействуя на компоненты матрицы, вызывает переориентацию больших молекул и увеличение точек их взаимодействия с армирующими волокнами.

Анализ графиков (рис. 9, 10) позволяет сделать следующие выводы:

Напряжения изгиба образцов в процессе испытаний после СВЧ воздействия возрастают относительно необработанных образцов на 5 % при малой мощности, что можно

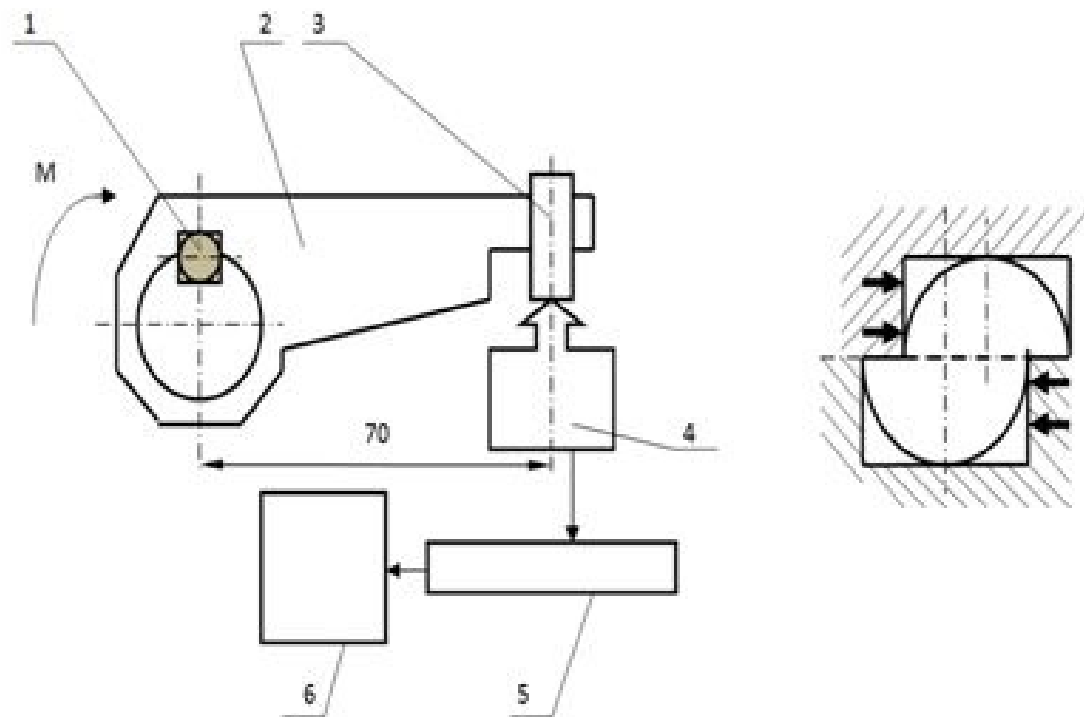


Рис. 4. Схема испытаний на срез: 1 – образец; 2 – рычаг; 3 – пуансон; 4 – тензометрический датчик; 5 – аналогово-цифровой преобразователь; 6 – компьютер

считать малозначимым, лежащим в пределах погрешности, и на (10–12%) – при средней и большой мощности. Модуль упругости материала увеличивается (3–6%). Указанные результаты можно считать лежащими в пределах погрешности измерения, то есть в исследованном диапазоне СВЧ мощности воздействие электромагнитного поля незначительно влияет на изгибную прочность стержней из карбона и практически не влияет на продольную устойчивость. Напряжения среза образцов изменяются более явно: при малой и средней СВЧ мощности увеличение составляет от 36 до 38%. При растяжении образцов после СВЧ обработки предельные напряжения в них возрастают по сравнению с контрольными на 34%. Также существенно увеличивается модуль упругости (на 23–24%). Наибольшие изменения касаются предельных напряжений смятия, которые увеличиваются практически на 81%.

Как уже отмечалось выше, СВЧ воздействие на карбоновые образцы способствует увеличению периода разрушения. Обобщенные диаграммы по данным графиков (рис. 7 и 8) представлены на рисунке 11.

По-видимому, при электрофизическом воздействии происходит дополнительное взаимодействие углеродных волокон со связующим и внешней полимерной оболочкой, приводящее к образованию местных сшивок и продольных связей. В результате эти дополнительные связи продолжают обеспечивать целостность образца после разрыва основной массы волокон и препятствуют полному разрушению. Часть волокон

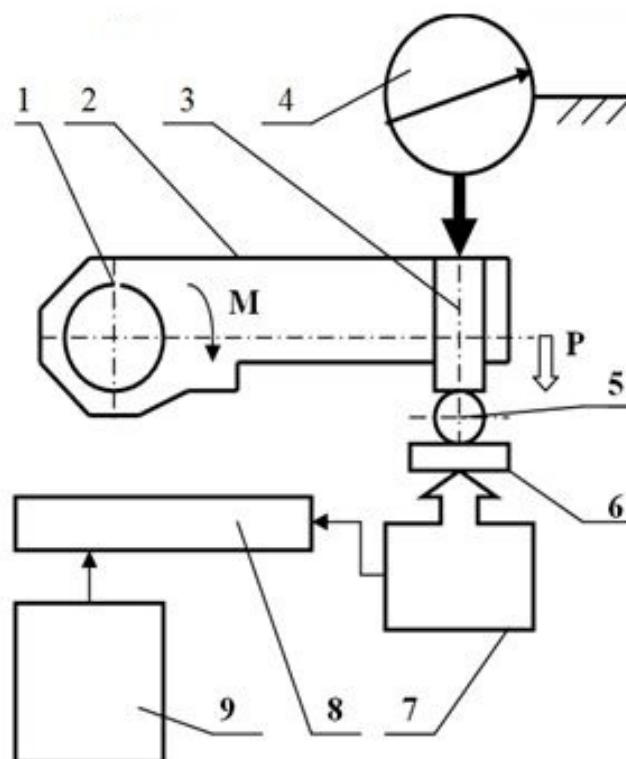


Рис. 5. Схема испытания на смятие: 1 - шпонка; 2 - рычаг; 3 - пуансон; 4 - индикатор часового типа с ценой деления 0,01 мм; 5 - образец; 6 - подпятник; 7 - тензометрический датчик; 8 - аналогово-цифровой преобразователь; 9 - компьютер

сохраняет целостность по причине возникновения дополнительных мостиков, воспринимающих нагрузку. При средней мощности происходит увеличение точек контакта связующего с волокнами и ускорение диффузионных процессов, образец становится более монолитным. Вследствие этого повышается упругость образца, он деформируется в большей степени под действием нагрузки без разрушения. Разрушение происходит уже не только в виде разрыва волокон, но и связующего. В результате разрушение происходит хаотически: по волокнам, по участкам с менее прочным связующим, по участкам с менее выраженной адгезией связующего и волокон. Это проявляется в «осколочном» характере зоны разрушения, на микрофотографии видны микрофрагменты, разнонаправленно заполняющие разлом. При воздействии большой (для данного материала) мощности описанный механизм можно считать сохраняющимся, однако возможно значительное повышение твердости и хрупкости связующего и разрушение углеродных волокон на уровне предположительно наноструктурных фрагментов. Образец разрушается вследствие роста количества и протяженности микротрещин в структуре, но спустя большее время, чем после электрофизического воздействия средней мощности. Это является причиной некоторого снижения прочностных характеристик по сравнению с образцами после воздействия СВЧ электромагнитного поля средней мощности.



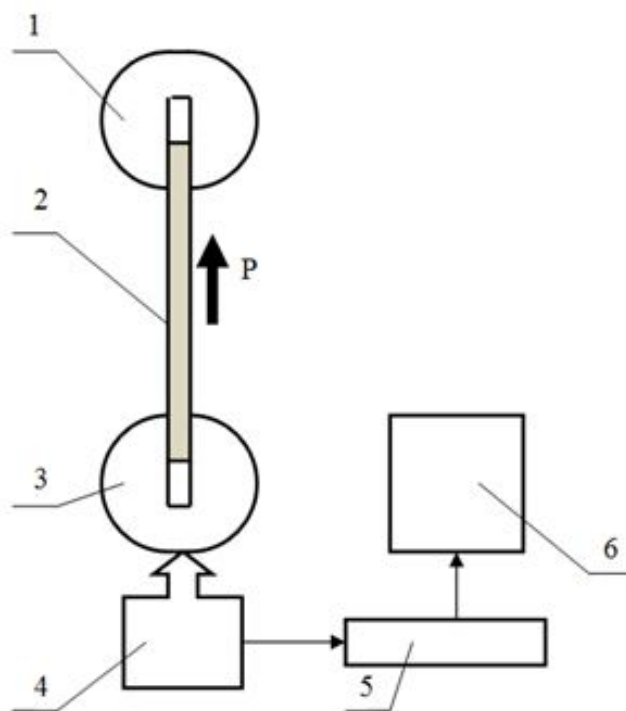


Рис. 6. Схема испытания на растяжение: 1 и 3 – захваты; 2 – образец; 4 – тензометрический датчик; 5 – аналогово-цифровой преобразователь; 6 – компьютер

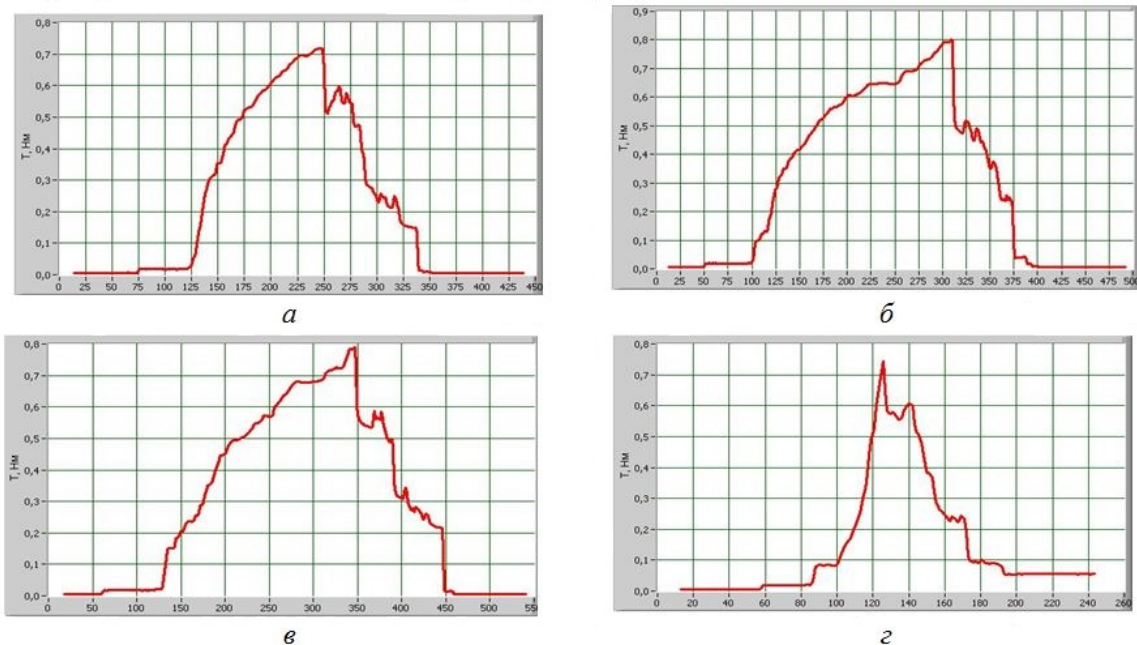


Рис. 7. Изменение воспринимаемой образцом нагрузки после модифицирования при малой (а), средней (б) и максимальной (в) СВЧ мощности; г – контрольный образец при испытании на изгиб (по оси абсцисс указано время в мс)

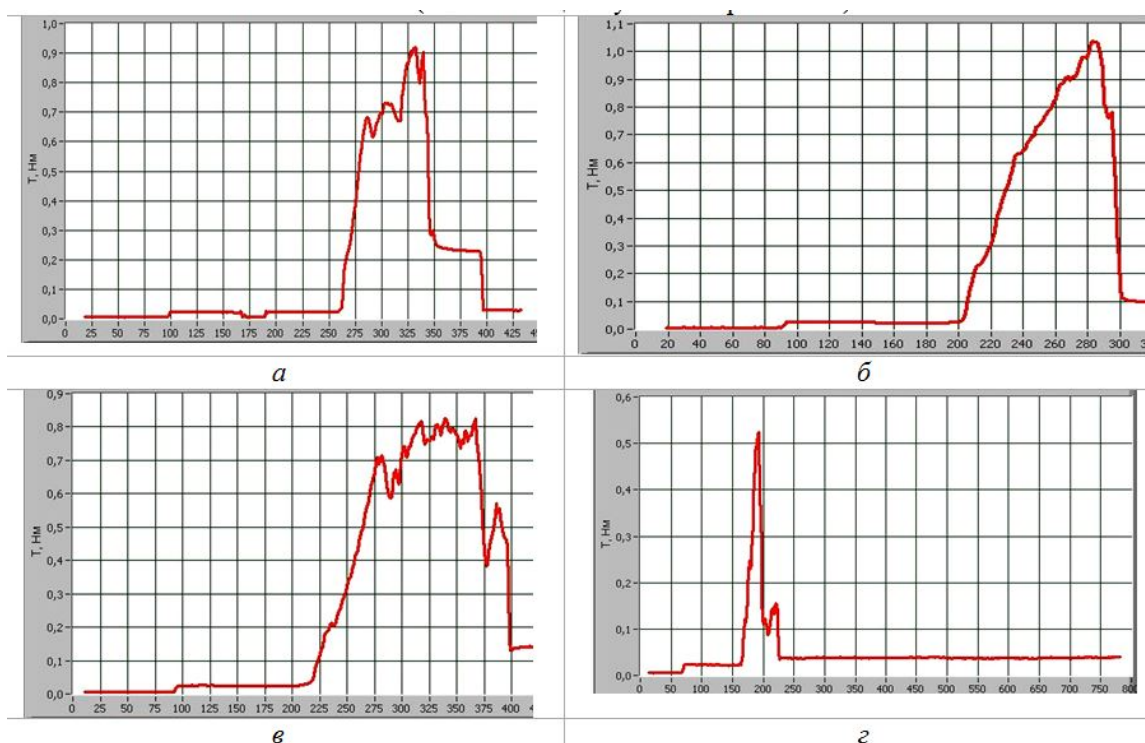


Рис. 8. Изменение воспринимаемой образцом нагрузки после модифицирования при малой (а), средней (б) и максимальной (в) СВЧ мощности; г – контрольный образец при испытании на срез (по оси абсцисс указано время в мс)

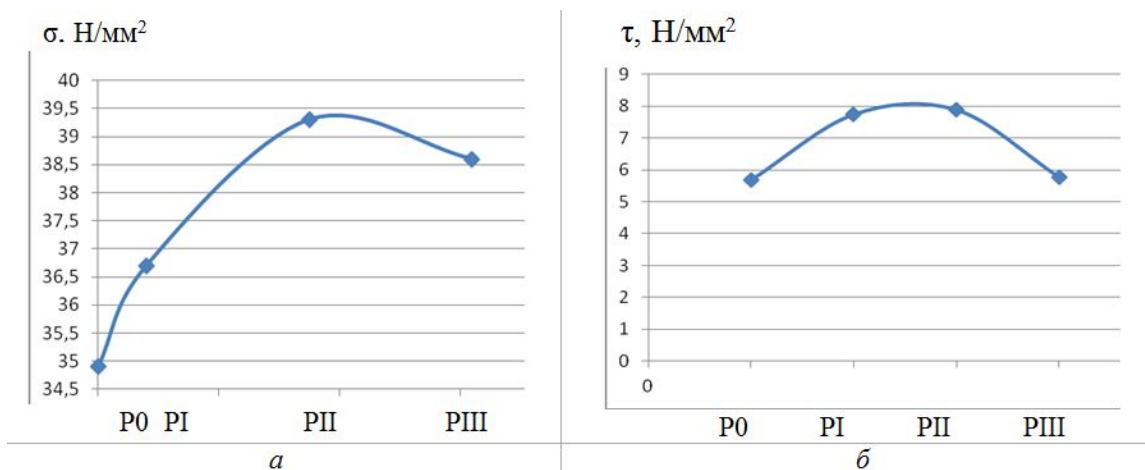


Рис. 9. Влияние мощности СВЧ электромагнитного поля на предельные напряжения изгиба (а) и среза (б) в сравнении с контрольным образцом (точка P0)

Изложенные предположения о механизме повышения прочности и времени сохранения целостности образца под нагрузкой после воздействия СВЧ электромагнитного поля подтверждаются фотографиями внешнего вида образцов. Во всех случаях разрушение начиналось после деформации образца с образованием стрелы прогиба в 10–15

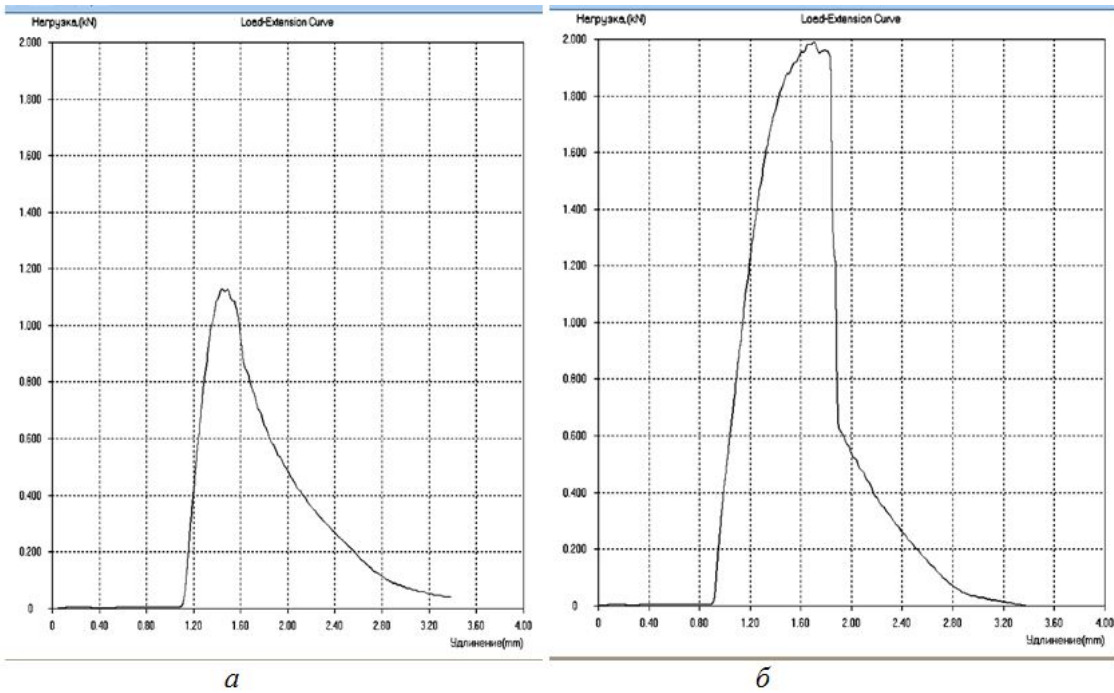


Рис. 10. Типичные графики нагружения образцов при растяжении: контрольного (а), после СВЧ воздействия средней мощности (б)

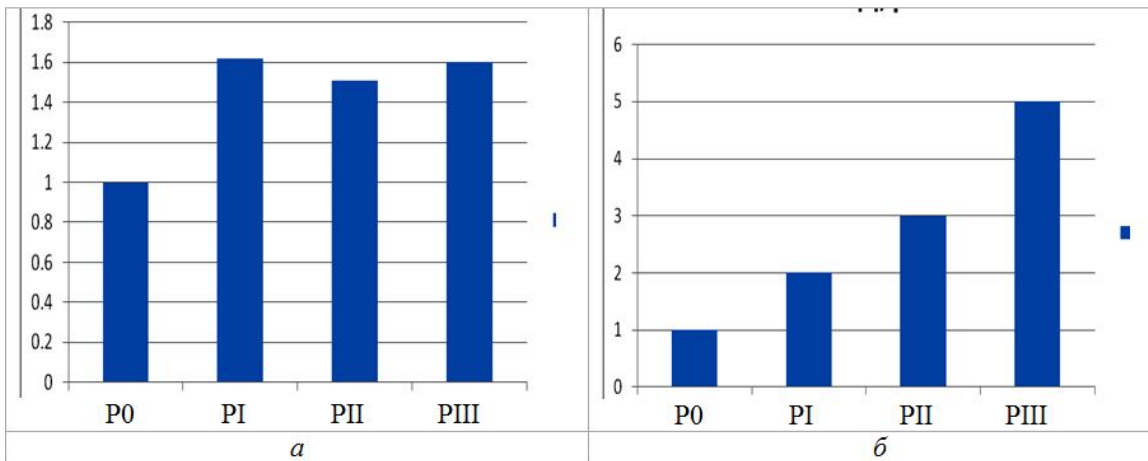


Рис. 11. Изменение периода времени от стабилизации нагрузки до разрушения образцов по сравнению с контрольным после СВЧ воздействия в относительных единицах: а – испытания на изгиб%; б – испытания на срез

мм. Однако, если контрольный образец после снятия нагрузки сохранял указанную деформацию (рис. 12 а), то образец, испытанный после СВЧ воздействия малой мощности, имел после снятия нагрузки остаточную деформацию не более 2–3 мм (рис. 12 б). СВЧ воздействие средней мощности практически исключает остаточную деформацию (рис. 12 в). После воздействия СВЧ электромагнитного поля большой мощности сохраняется остаточная деформация около 1–2 мм (рис. 12 г).

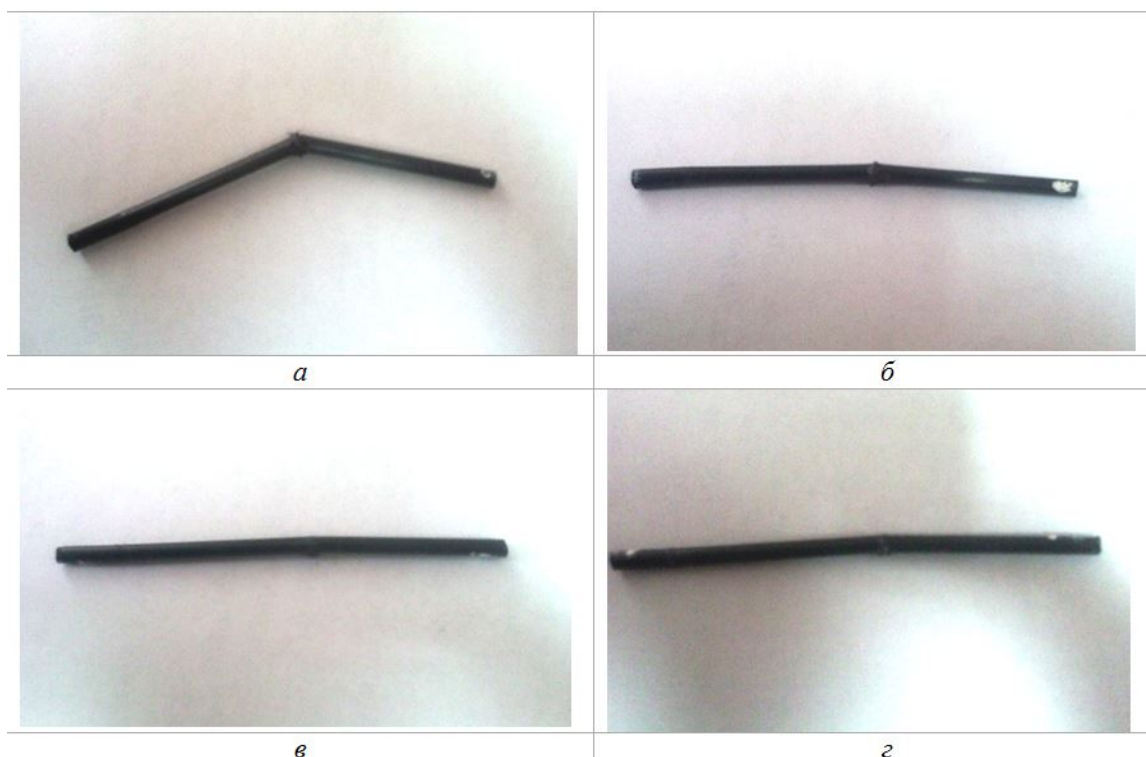


Рис. 12. Остаточная деформация после испытаний на изгибную прочность контрольного образца (а) и образцов, обработанных в СВЧ электромагнитном поле: при малой (б), средней (в) и большой (г) мощности

Данный эффект может быть связан с описанным выше фактом разрушения меньшего количества углеродных волокон у образцов, подвергнутых воздействию СВЧ электромагнитного поля, а также с образованием дополнительных связей между ними.

**Заключение.** Обобщая приведенные результаты экспериментов, можно сделать вывод, что в исследованном диапазоне входных параметров воздействие на образцы из карбона СВЧ электромагнитного поля средней мощности целесообразно использовать для увеличения прочностных характеристик изделий, поскольку при этом обеспечивается наибольшее увеличение времени воздействия нагрузок всех исследованных схем при достаточном увеличении абсолютных значений прочностных характеристик по напряжениям среза и смятия, а также некотором их увеличении по напряжениям изгиба.

Полученные результаты могут быть использованы для модифицирования путем СВЧ воздействия дополнительных упрочняющих структур в виде армированных углеродными волокнами композитов изделий из прессованных или литых термопластов, а также изделий сложной формы, сформированных при помощи аддитивных технологий.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кошкин Р. П. Основные направления развития и совершенствования беспилотных авиационных систем. URL: <http://spmagazine.ru/420>, (дата обращения: 28.01.2017).
- [2] URL: <http://mplast.by/novosti/2016-04-29-mirovoy-ryinok-ugleplastikov-dostignet-otmetki-v-23-mlrd-k-2022-godu/>, (дата обращения: сентябрь 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» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33.
- [4] Каблов Е. Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. № 6. С. 520–530.
- [5] Павлов С. П., Пальков Р.С. Влияние свойств межфазового слоя на эффективные механические характеристики нанокompозитов // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов (DFMN–2013): материалы V междунар. конф., г. Москва, 26–29 нояб. 2013 г. С. 554–556.
- [6] Tsuyoshi Nomura, Ercan M. Dede, Tadayoshi Matsumori, Atushi Kawamoto. Simultaneous Optimization of Topology and Orientation of Anisotropic Material using Isoparametric Projection Method // 11th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization, 7th–12th, June 2015, Sydney, Australia.
- [7] Злобина И. В., Коломейцев В. А., Бекренев Н. В. Повышение равномерности термической обработки композиций органических материалов СВЧ излучением // Научное обозрение, 2014. № 12. С. 80–83.
- [8] Злобина И. В., Коломейцев В. А. Применение СВЧ излучения для термической обработки диэлектрических органических материалов с неоднородной структурой и составом // Материалы 11-й Междунар. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП–2014». 2014. С. 235–241.
- [9] Zlobina I. V., Bekrenev N. V. The Influence of Microwave Electromagnetic Field on Mechanical Properties of Composite Materials // Научные технологии. 2016. Т. 17. № 2. С. 25–30.
- [10] 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. Vol. 870. P. 101–106.
- [11] 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. – 02023.

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

## STRENGTH TESTS OF THE COMPOSITE MATERIALS MODIFIED IN THE MICROWAVE OVEN THE ELECTROMAGNETIC FIELD

*Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov*

**Abstract.** Researches of strength characteristics of the composite materials reinforced by carbon fibers after their modifying in the microwave oven the electromagnetic field of various brought power are executed. On the example of carbon fabrics it is established that, in comparison with control samples of the microwave oven, influence of average power within 2 minutes on finally created object allows to increase the extreme tension of a bend on 10–12%, a cut – on 36–38%, stretchings – on 34%, a smashing – on 81%. At the same time duration of process of destruction at a bend of a sample increases on 50–60% , at a cut – up to 5 times, and residual deformation decreases from 10 – 15 mm to 1 mm and less.

**Keywords:** composite materials, carbon fibers, pultruzionny carbon fabrics, microstructure, contact zone, microwave oven electromagnetic field

### REFERENCES

- [1] Koshkin R. P. Osnovnye napravlenija razvitija i sovershenstvovanija bespilotnyh aviacionnyh sistem. URL: <http://spmagazine.ru/420> (data obrashhenija: 28.01.2017). (in Russian)
- [2] URL: <http://mplast.by/novosti/2016-04-29-mirovoy-ryinok-ugleplastikov-dostignet-otmetki-v-23-mlrd-k-2022-godu/>, (data obrashhenija: sentjabr' 2016). (in Russian)
- [3] Kablov E. N. Innovacionnye razrabotki FGUP "VIAM" GNC RF po realizacii «Strategicheskij razvitij razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda» // Aviacionnye materialy i tehnologii. 2015. № 1 (34). S. 3–33. (in Russian)
- [4] Kablov E. N. Materialy i himicheskie tehnologii dlja aviacionnoj tehniki // Vestnik Rossijskoj akademii nauk. 2012. Vol. 82. № 6. S. 520–530. (in Russian)
- [5] Pavlov S. P., Pal'kov R.S. Vlijanie svojstv mezhfazovogo sloja na jeffektivnye mehanicheskie harakteristiki nano kompozitov // Deformacija i razrushenie materialov i nanomaterialov (DFMN-2013) : materialy V mezhdunar. konf., g. Moskva, 26-29 nojab. 2013 g. S. 554-556. (in Russian)
- [6] Tsuyoshi Nomura, Ercan M. Dede, Tadayoshi Matsumori, Atushi Kawamoto. Simultaneous Optimization of Topology and Orientation of Anisotropic Material using Isoparametric Projection Method // 11th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization, 7th–12th, June 2015, Sydney, Australia. (in Russian)

---

*Zlobina Irina Vladimirovna*

e-mail: [irinka\\_7\\_@mail.ru](mailto:irinka_7_@mail.ru), Ph.D., Assoc. Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia.

*Bekrenev Nikilay Valeryevich*

e-mail: [nikolaj.bekrenev@yandex.ru](mailto:nikolaj.bekrenev@yandex.ru), Dr. Sci. Tech., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov.

*Pavlov Sergey Petrivich*

e-mail: [pspsar@yandex.ru](mailto:pspsar@yandex.ru), Dr. Sci. Phys. & Math., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia.

[7] Zlobina I. V., Kolomejcev V. A., Bekrenev N. V. Povyshenie ravnomernosti termicheskoy obrabotki kompozicij organicheskikh materialov SVCh izlucheniem // Nauchnoe obozrenie, 2014. № 12. S. 80–83. (in Russian)

[8] Zlobina I. V., Kolomejcev V. A. Primenenie SVCh izlucheniya dlja termicheskoy obrabotki dijelektricheskikh organicheskikh materialov s neodnorodnoj strukturoj i sostavom // Materialy 11-j Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. «Aktual'nye problemy jelektronnogo priborostroeniya APJeP–2014». 2014. S. 235–241. (in Russian)

[9] Zlobina I. V., Bekrenev N. V. The Influence of Microwave Electromagnetic Field on Mechanical Properties of Composite Materials // Naukoemkie tehnologii. 2016. Vol. 17. № 2. S. 25–30. (in Russian)

[10] 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. Vol. 870. P. 101–106. (in Russian)

[11] 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. – 02023. (in Russian)