

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ МОДИФИЦИРОВАННЫХ В СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ ОБЪЕКТОВ 3D ПЕЧАТИ, АРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИТОМ С УГЛЕРОДНЫМ ВОЛОКНОМ

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

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

На основе анализа развития транспортных технических систем установлена устойчивая тенденция к применению в их конструкциях композиционных материалов. Также отмечена перспективность использования аддитивных технологий трехмерной печати для изготовления объектов сложной формы. При этом проанализирован метод избирательного локального упрочнения путем формирования топологических структур, конфигурация которых соответствует полям возникающих в процессе эксплуатации напряжений. Предметом исследований явилась прочность образцов из композиционного материала. Цель исследований – экспериментальное обоснование возможности повышения прочности объектов аддитивного производства из термопластичных материалов путем их армирования топологическими композиционными структурами и СВЧ модифицирования. Выполнены исследования на стойкость к растягивающим нагрузкам трехмерных объектов с ослабленными сечениями, сформированных при помощи аддитивной технологии FDM. Согласно принятой методике выполняли определение конфигурации полей напряжений в композиционном материале на компьютерной твердотельной модели, изготавливали образцы с полостью, полученной путем моделирования конфигурации методом трехмерной печати, заполняли полость композитом с углеродными волокнами. Часть полученных образцов подвергали воздействию СВЧ электромагнитного поля. Проводили испытания на растяжение. Выявлено, что армирование образца из термопластичного материала ABS композиционным материалом, содержащим углеродные волокна, существенно повышает величину разрывного усилия, при этом наибольший эффект (повышение разрывного усилия в 1,5 раза) достигается при распределении армирующего материала в соответствии с прогнозируемыми полями эксплуатационных напряжений. Дополнительная обработка армированного образца в СВЧ электромагнитном поле частотой 2450 МГц в течение 10 с приводит к увеличению разрывного усилия по сравнению с контрольным в 1,74 раза, а модуля упругости – в 3,5 раза. Результаты могут быть использованы при изготовлении деталей различных технических и транспортных технических систем, в частности летательных аппаратов, к прочности и весовым характеристикам которых предъявляются повышенные требования.

*Ключевые слова: аддитивные термопластичные материалы, технология трехмерной печати, топология, напряжения, 3D модель, армирующий композиционный материал, прочностные характеристики, СВЧ электромагнитное поле.*

**Введение.** Разработка и внедрение перспективных транспортных систем, в частности летательных аппаратов, требуют опережающего создания новых высокопрочных и легких материалов и совершенствования технологий формообразования конструктивных элементов из них. 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 [1, 2]. Однако композиционные материалы характеризуются выраженной анизотропией физико-механических характеристик, определяемой видом и ориентацией армирующих компонентов. В то же время перспективные авиационные и ракетные комплексы будут высокоманевренными, использоваться в условиях гиперзвуковых скоростей в атмосфере и ближнем космосе, что выдвигает повышенные требования к механической и термической прочности их конструктивных элементов, имеющих сложные формы, силь-

но влияющие на распределение опасных механических и температурных напряжений. Дополнительную трудность создает крайняя неоднородность свойств по объему материала, вызванная укладкой армирующего компонента, равномерностью его пропитки материалом матрицы.

Путем моделирования полей напряжений в сложных по конструкции изделиях [3, 4] выявлена потенциальная возможность повышения их эксплуатационной прочности, размещая в составе материала изделия упрочненные тем или иным образом области, ориентация и форма которых коррелирует с формой полей напряжений, возникающих при функционировании изделия. Одним из новых путей реализации данной возможности по сравнению с предыдущими исследованиями является оптимизация макро- и микроструктуры (распределение включений, их ориентация, объемная доля включений и форма самих включений) по отношению к заданной целевой функции. Стандартные композиты состоят из двух или более материалов, в результате чего появляются преимущества по сравнению с использованием традиционных материалов. Возможно путем внесения армирующих компонентов по определенному закону создавать элементарные ячейки, которые будут являться наименьшей структурой, периодически повторяющейся в композитном материале. При изменении объемной доли включений, формы включений или даже топологии элементарной ячейки мы получаем различные эффективные свойства композиционных материалов. Поэтому при разработке композиционных материалов мы можем управлять его свойствами. Данная оптимизация может быть проведена не только путем внесения компонентов, но и их модифицированием путем электрофизических воздействий, что значительно проще реализовать, поскольку процесс является легко управляемым за счет регулирования технологических режимов без вмешательства в синтез материала. Использование традиционных технологий тем не менее для практической реализации данного результата представляется затруднительным, что вызывает необходимость дополнительного исследования в области создания научных основ технологического обеспечения данного решения.

К одному из наиболее актуальных технологических трендов в настоящее время относятся аддитивные технологии, в которых послойное наращивание материала в соответствии с заданной компьютерной твердотельной моделью практически заменяет традиционные процессы резания, прессования и штамповки [5–8]. Основным преимуществом данных технологий является прямое воспроизведение на основе твердотельной модели изделия любой сложности без применения сложного инструмента и дорогостоящего оснащения. При этом возможно производство по индивидуальным заказам без учета серийности, как одного из важнейших показателей технологичности изделий. В настоящее время достигнуты значительные успехи в использовании аддитивных технологий не только в быстром прототипировании, но и при изготовлении конструктивных элементов действующих технических систем. Так, компания Raytheon Missile Systems (США) сообщила о создании управляемой ракеты, до 80 % конструкции которой, включая боевую часть, может быть напечатано в полевых условиях. Сообщается, что компания Stratasyс представила самый большой и сложный беспилотный летательный аппарат, до 80 % деталей которого напечатано на 3D принтере из оригинальных инновационных материалов.

В то же время, несмотря на бурное развитие указанных технологий, весьма актуальной проблемой является недостаточная прочность и выносливость изделий особенно из полимерных и композиционных материалов, получаемых путем 3D печати, что сдерживает их применение в основном производстве динамичных технических систем, к которым относятся транспортные средства, особенно различные летательные аппараты. Особенно важной представляется неустойчивость характеристик от детали к детали и от установки к установке. Полученные по данным технологиям материалы отличаются высокой случайной анизотропией свойств и недостаточной прочностью по сравнению с материалами, получаемыми методами литья, штамповки, порошковой металлургии. Однако научные исследования в данной области направлены на разработку исходных материалов, методов соединения компонентов, программного обеспечения, обеспечивающих максимальную точность и производительность. На основании изложенного решение вопросов повышения прочности изделий, созданных на основе аддитивных технологий, представляет собой важную актуальную задачу научного и практического плана.

Отмечается [8, 9], что высокопрочные изделия формируются на основе технологий SLM из металлических и керамических порошков, однако эти технологии реализуются на дорогостоящем (500000 долл. и более) оборудовании, материалы также имеют высокую стоимость. Технологии 3DP, FDM и SLA существенно дешевле (стоимость оборудования около 1000 долл.), но изделия

имеют малую прочность и долговечность. Особенно важной представляется неустойчивость характеристик от детали к детали и от установки к установке. Полученные по данным технологиям материалы отличаются высокой случайной анизотропией свойств и недостаточной прочностью по сравнению с материалами, получаемыми методами литья, штамповки, порошковой металлургии. Разрабатываются методы [9, 10] повышения прочности изделий из аддитивных полимерных материалов путем применения новых термопластов с повышенными физико-механическими характеристиками (ПЭИ, ПЭЭК), создания композиций внедрением частиц, коротких или длинных волокон, карбоновых нанотрубок (УНТ-технологии). Одним из перспективных методов повышения прочности объектов аддитивных технологий из полимерных материалов можно рассматривать процесс управляемой укладки армирующих волокон по полученной расчетной топологической модели нагружения [11–17], являющийся аналогом выполненных нами исследований.

Также весьма перспективным является модифицирование структуры как основного, так и армирующего материала путем дополнительных электрофизических воздействий, например, в СВЧ электромагнитном поле. Многочисленными исследованиями отечественных и зарубежных ученых [18–21], установлены закономерности модифицирующего влияния СВЧ электромагнитного поля на различные диэлектрические материалы, в том числе с проявлением как диэлектрического нагрева, так и нетепловых эффектов. Достигнуты определенные результаты в повышении прочностных свойств композиционных неметаллических материалов. Однако, вопросу влияния СВЧ электромагнитного поля на структуру изделий из аддитивных материалов до последнего времени не уделялось должного внимания, не рассмотрен вопрос взаимодействия с СВЧ электромагнитным полем материалов, состоящих из компонентов с различными теплофизическими и диэлектрическими характеристиками, что имеет место при армировании термопласта углеродными композитами.

Целью исследований являлось экспериментальное обоснование возможности повышения прочности объектов аддитивного производства из термопластичных материалов путем их армирования топологическими композиционными структурами и СВЧ модифицирования.

**1. Метод исследования.** В качестве объекта исследований принята пластина из пластика ABS с концентраторами напряжений в виде поперечных пазов, доходящих до оси симметрии (рис. 1а) размерами  $120 \times 40 \times 4$  мм. На основе компьютерного моделирования полей напряжений при растяжении в программной среде Comsol получена область напряжений растяжения, имеющих максимальное значение (рис. 1б), на основе которой разработаны чертеж (рис. 1в) и трехмерная модель с полостью глубиной 3 мм. Образцы формировали на 3D принтере Felix 3.1 Single Extruder из полимерной нити ABS стандартного диаметра 1,75 мм. Полости послойно заполняли углеродным волокном производства ООО «Балаково Карбон Продакшн» (г. Балаково Саратовской обл.) и эпоксидной смолой ЭД-20 с отвердителем ПЭПА. Волокна распределяли таким образом, чтобы они без разрывов связывали все полости и углубления, сформированные принтером согласно твердотельной модели. Сформированная на 3D принтере основа и готовый образец с заполненной композиционным материалом профильной полостью представлены на рис. 2.

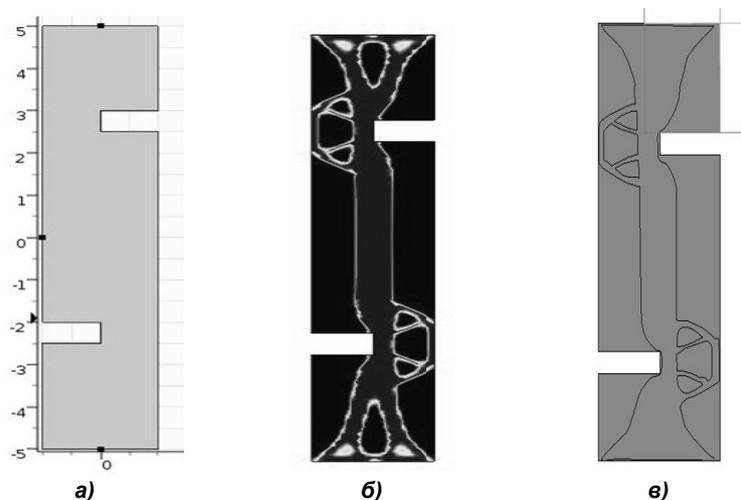


Рис. 1. Испытываемый образец: исходная схема (а), результаты моделирования полей напряжений при действии растягивающей нагрузки (б), чертеж образца с контуром полости под заполнение композитом (в)

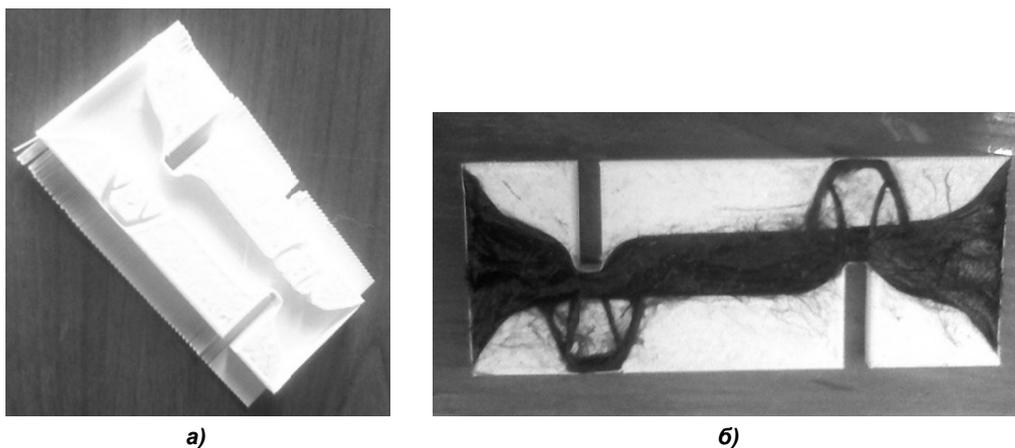


Рис. 2. Сформированный на 3D принтере образец с полостью, рассчитанной на основе моделирования (а) и образец со сформированной топологической композиционной структурой (б)

Дополнительно как сравнение вариантов упрочнения, изготавливали образцы увеличенной до 7 мм толщины и образцы толщиной 4,0 мм с углублением в 2,0 мм, равномерно заполненным композитом, аналогичным топологической структуре. Исследовали контрольные образцы и подвергнутые СВЧ модифицированию. СВЧ модифицирование проводили с использованием микроволновой рупорной установки «Жук-2-02» (ООО НПП «АгроЭкоТех» г. Обнинск, Калужской обл.). Мощность СВЧ излучения установки – 1200 Вт, частота 2450 МГц. Устанавливали режимы СВЧ воздействия путем подбора дистанции до образца и времени таким образом, чтобы исключить термические эффекты, особенно вероятные при обработке образцов с армирующим углеродсодержащим композиционным материалом; для цельного термопласта ABS время обработки составляло 2 минуты, дистанция – 100 мм; для образца с топологией – время 10 с, дистанция – 250 мм. При большем количестве времени и меньшей дистанции наблюдался повышенный нагрев образца с углеродсодержащим композитом, приводящий к деформации полимерной основы.

Испытания на разрыв образцов проводили на разрывной машине ИР-5082-100 с компьютерной обработкой результатов при скорости растяжения 50 мм/мин.

**2. Экспериментальные исследования.** Графики нарастания разрывного усилия при испытаниях контрольных образцов на растяжение представлены на рис. 3. Анализ изменения максимального разрывного усилия и модуля упругости представлен в виде диаграммы на рис. 4.

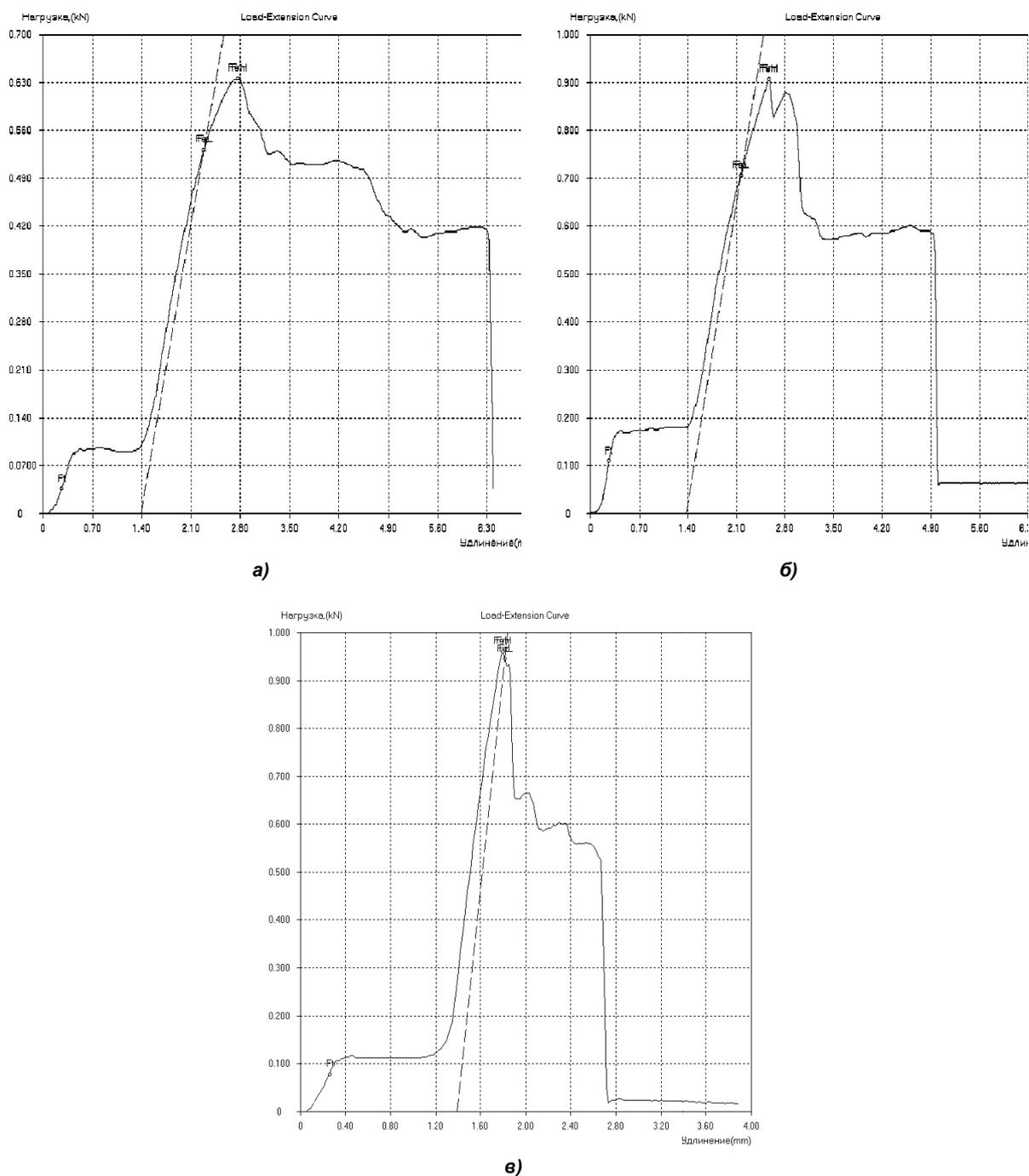
Ввиду большей эффективности по упрочнению образцов с использованием формирования топологических структур влияние СВЧ электромагнитного поля на образцы из пластика ABS, армированного равномерно композиционным материалом, не исследовали. Графики нарастания разрывного усилия при испытаниях образцов на растяжение после модифицирования в СВЧ электромагнитном поле представлены на рис. 5, анализ изменения максимального разрывного усилия и модуля упругости – в виде диаграммы на рис. 6.

Анализ полученных зависимостей позволяет сделать вывод, что армирование относительно малопрочного термопласта ABS, применяемого в технологии FDM композиционным материалом с наполнителем из углеродных волокон, обеспечивает увеличение предельного разрывного усилия на 42,7 % даже по сравнению с образцом увеличенной толщины. Использование армирования из одинаковых по объему и содержанию углеродных волокон композиционным материалом по специальной схеме, учитывающей прогнозируемое распределение полей напряжений при растяжении, увеличивает предельное разрывное усилие на 51,3 %, т. е. обеспечивается прирост степени упрочнения практически на 20 %. При этом модуль упругости повышается в 3 раза. Изменение схемы армирования не оказывает влияния на модуль упругости.

Воздействие на образцы СВЧ электромагнитным полем способствует существенному повышению прочности. Разрывное усилие образца из пластика ABS возрастает на 46,5 %, т. е. образец оказывается более прочным, чем даже армированный по схеме с равномерной укладкой композиционного материала. При этом модуль упругости возрастает в 1,5 раза. Модифицирование образца с композиционной топологической структурой способствует увеличению разрывного уси-

## Аддитивные технологии

лия на 74 %, а модуля упругости – в 3,5 раза. Сравнивая образцы, армированные топологической композиционной структурой, можно заключить, что СВЧ модифицирование позволяет дополнительно повысить предельное разрывное усилие почти на 15 %, а модуль упругости – на 17 %.



**Рис. 3. Графики нагружения образцов: из пластика ABS (а); из пластика ABS, армированного равномерно композиционным материалом (б); из пластика ABS с топологической армирующей структурой, сформированной на основе модели полей напряжений (в)**

Следует отметить различный характер графиков нагружения. Контрольные образцы как однородные, так и армированные по разным схемам имеют после начала разрушения в диапазоне нагрузок, находящемся на уровне приблизительно 70 % от максимальной, площадку стабильной нагрузки, соответствующей, очевидно, области пластического течения материала, которую можно назвать зоной вторичной пластичности по сравнению с начальной зоной, соответствующей величине нагрузки  $F_t$ , равной для исследованных материалов, соответственно, 36, 110 и 78 Н.

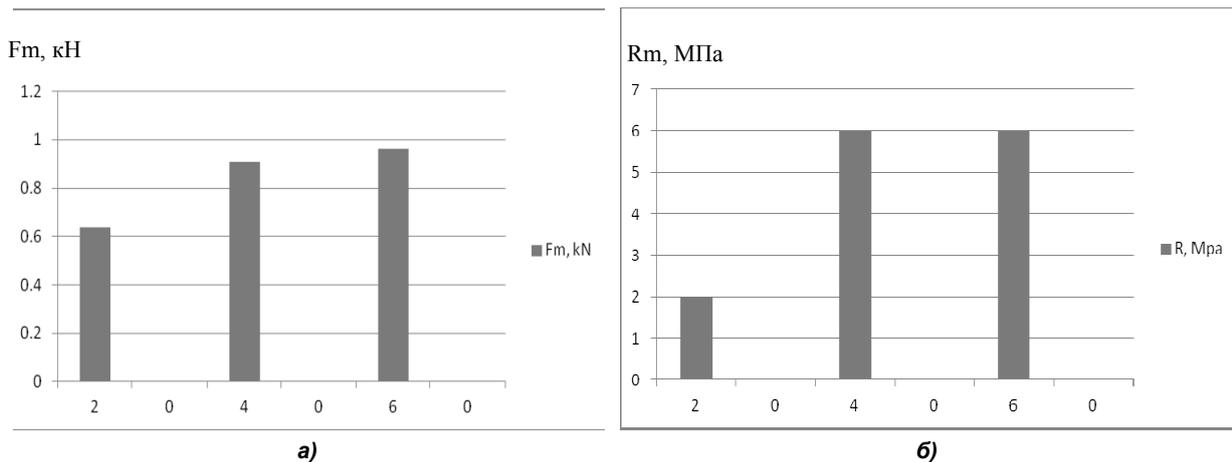


Рис. 4. Максимальные разрывные усилия (а) и модуль упругости (б) при растяжении образцов: из пластика ABS (2); из пластика ABS, армированного равномерно композиционным материалом (4); из пластика ABS с топологической армирующей структурой, сформированной на основе модели полей напряжений (6)

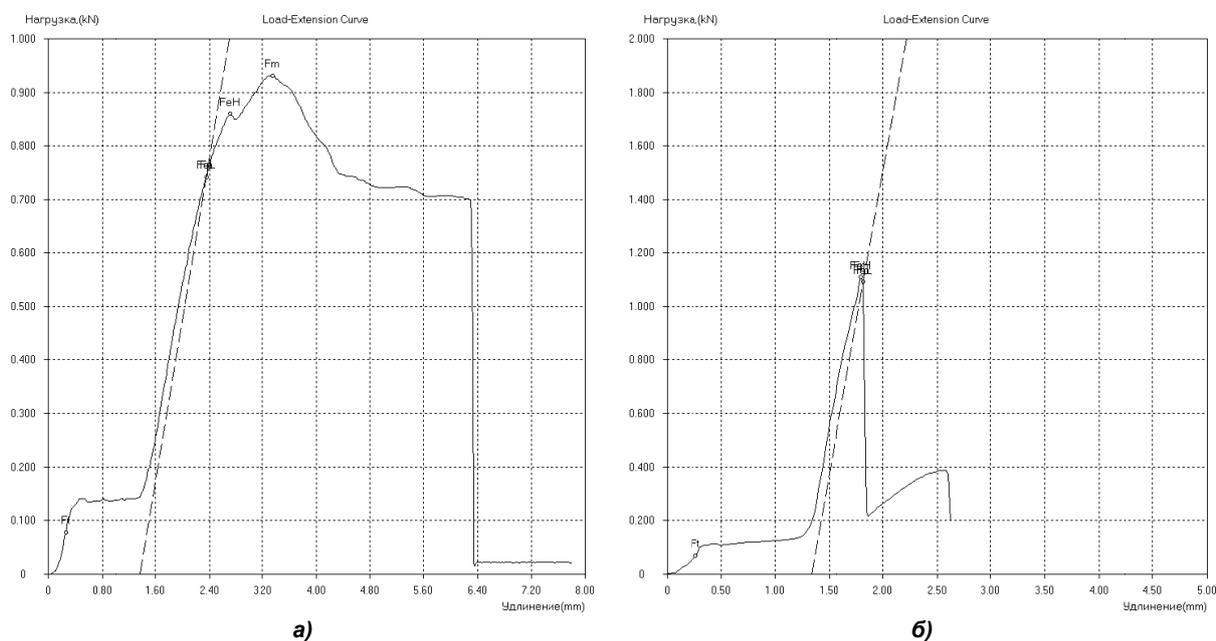


Рис. 5. Графики нагружения образцов после модифицирования в СВЧ электромагнитном поле: из пластика ABS (а); из пластика ABS с топологической армирующей структурой, сформированной на основе модели полей напряжений (б)

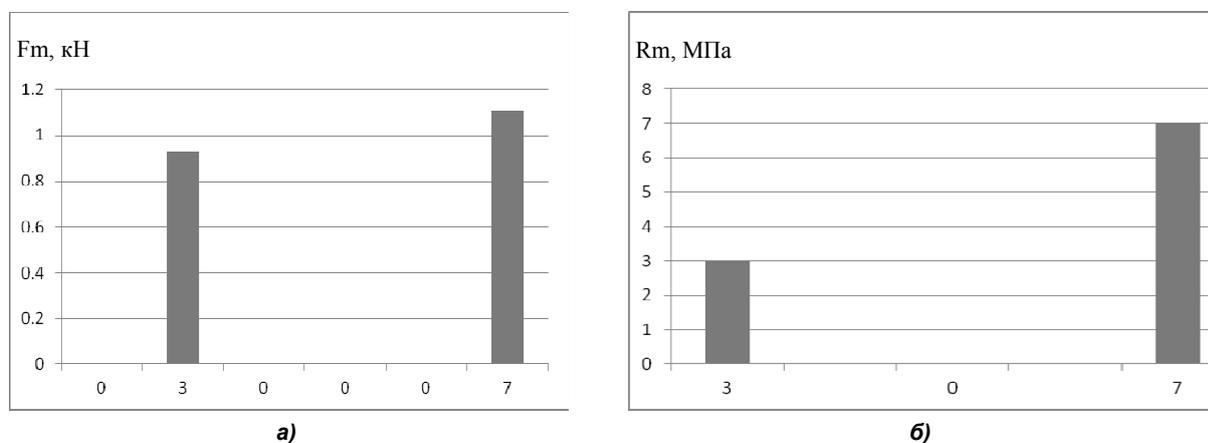
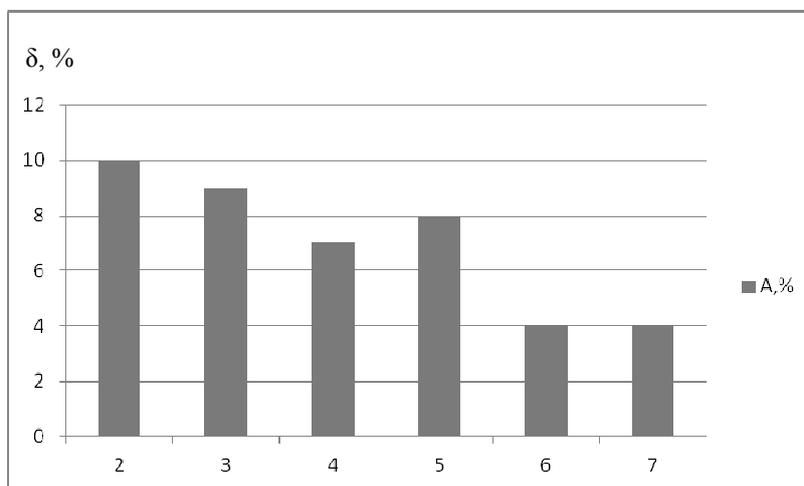


Рис. 6. Максимальные разрывные усилия (а) и модуль упругости (б) при растяжении образцов после модифицирования в СВЧ электромагнитном поле: из пластика ABS (3); из пластика ABS с топологической армирующей структурой, сформированной на основе модели полей напряжений (7)

## Аддитивные технологии

Для обработанных в СВЧ электромагнитном поле образцов из однородного материала зона вторичной пластичности располагается выше, примерно на уровне 75–80 %, при этом площадка короткая и не явно выраженная. У образца с армирующей топологией после падения графика до уровня 18 % от максимального усилия начинается снова рост до уровня 36 % и резкий спад графика без площадки пластичности. Отмеченные различия можно объяснить на основе сравнения величины относительного удлинения образцов (рис. 7).



**Рис. 7.** Относительное удлинение образцов: из пластика ABS (2); то же после СВЧ обработки (3); из пластика ABS, армированного равномерно композиционным материалом (4); то же после СВЧ обработки (5); из пластика ABS с топологической армирующей структурой, сформированной на основе модели полей напряжений (6); то же после СВЧ обработки (7)

Видно, СВЧ модифицирование в среднем приводит к снижению относительного удлинения образцов при растяжении, в то же время введение армирующей структуры также снижает относительное удлинение, поскольку углеродные волокна, имея высокую прочность на разрыв, хуже деформируются, чем пластики. Поэтому скорее всего сначала и полимер и армирующий материал деформируются совместно, но затем происходит разрыв углеродных волокон, чему соответствует быстрое нарастание и спад величины нагрузки. Затем продолжают воспринимать нагрузку длинные молекулы полимера, испытывая пластическую деформацию. Этот этап соответствует второй нарастающей ветви графика. Вследствие снижения пластичности полимера в СВЧ электромагнитном поле, что показывают элементы диаграммы 2 и 3, происходит быстрый разрыв данного материала. Этот вывод хорошо согласуется с оценкой времени разрушения образца с топологией: в сравнении с однородным образцом разрушение происходит почти в 2 раза быстрее.

Принятая модель распределения напряжений в образце с ослабленным сечением и эффективность ее реализации путем формирования топологической упрочняющей структуры иллюстрируют фотографии зоны разрушения (рис. 8), на которых явно заметно повторение картины, показанной на рис. 1б.

Максимальные напряжения возникают в области ослабленного вырезами сечения, при этом они локализованы в дугообразных зонах. Зона разрушения контрольного образца из пластика ABS практически лишена остатков волокон структуры, разрушение произошло одновременно для всей области материала (рис. 8а). В зоне разрушения образца, подвергнутого воздействию СВЧ электромагнитного поля, видны волокна сохранившихся растянутых материалов, что свидетельствует о постепенном развитии разрушения с первоначальным разрывом отдельных волокон, а затем конгломератов волокон (жгутов), по видимому образовавшихся под действием СВЧ электромагнитного поля вследствие сшивок больших молекул полимера (рис. 8б). Образцы с армирующей топологической структурой имеют более узкую зону разрушения. При этом образец, подвергнутый воздействию СВЧ электромагнитного поля, характеризуется симметричным разрушением в верхней и нижней зонах, что может свидетельствовать о более равномерном его механизме, связанном с повышением равномерности прочностных свойств вследствие модифицирования структуры армирующей вставки, играющей основную роль в формировании стойкости

образца к разрушению. Также видно, что зоны разрушения «прошиты» волокнами пластика, сохранившими целостность (рис. 8г) по причине, указанной выше, однако их больше вследствие того, что первичную нагрузку, по видимому, воспринимала на себя армирующая топологическая структура, волокна пластика пластически растягивались вместе со структурой, а затем после ее разрыва продолжали воспринимать нагрузку. Этой стадии отвечает участок роста разрывной нагрузки на графике рис. 5б.

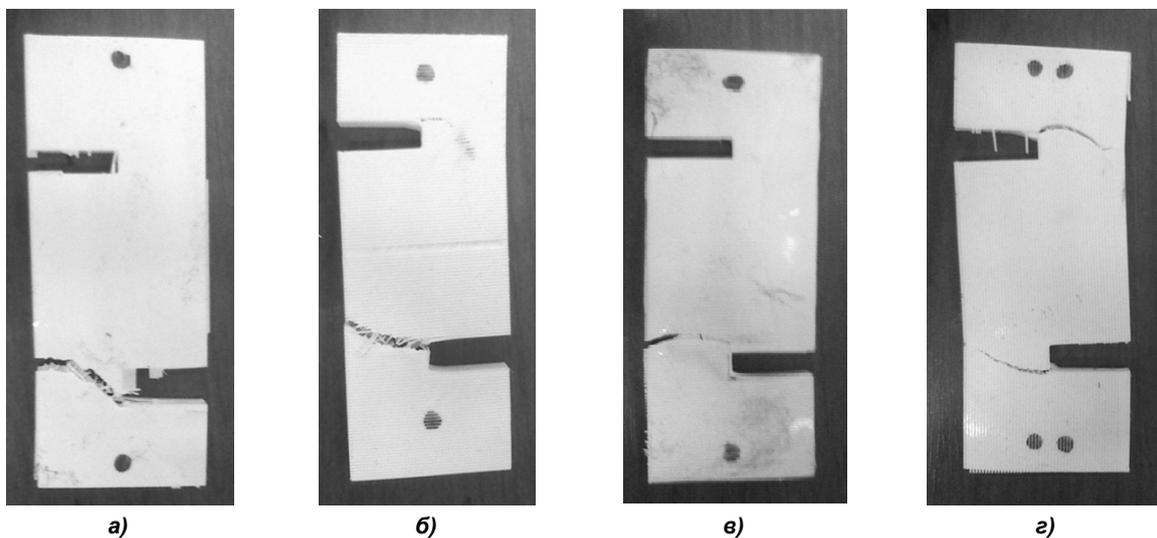


Рис. 8. Области разрушения образцов при растяжении: из пластика ABS (а); то же после СВЧ обработки (б); из пластика ABS с топологической армирующей структурой, сформированной на основе модели полей напряжений (е); то же после СВЧ обработки (г)

### Выводы

1. Установлено, что армирование изделий из термопластичных материалов, полученных путем трехмерной печати содержащими углеродные волокна композиционными структурами, конфигурация которых соответствует конфигурации возникающих в процессе эксплуатации полей напряжений, по сравнению с обычным армированием обеспечивает увеличение прочности на растяжение на 20 % и повышение модуля упругости до 3 раз.

2. Модифицирование структуры окончательно сформированных трехмерной печатью образцов в СВЧ электромагнитном поле увеличивает прочность при растяжении почти на 46 %, модуль упругости – на 50 %.

3. При сравнении образцов, армированных топологической композиционной структурой, установлено, что СВЧ модифицирование позволяет дополнительно повысить предельное разрывное усилие почти на 15 %, а модуль упругости – на 17 %.

4. Выявлено, что СВЧ модифицирование в среднем приводит к снижению относительного удлинения образцов при растяжении с 10 % до 8–9 %, сплошное армирование композитом с углеродными волокнами – на 6–7 %, в то же время введение армирующей структуры также снижает относительное удлинение с 10 % – до 4–5 %.

**Обсуждение и применение.** Таким образом, выполненные исследования подтверждают эффективность упрочнения объектов 3D печати путем формирования структур армированного углеродными волокнами композиционного материала, топология которых коррелирует с моделью полей напряжений, возникающих в процессе эксплуатации. Реализация серийного варианта данной технологии упрочнения возможна на базе 3D принтеров, оснащенных двух или четырех струйными печатающими головками-экструдерами. Для полного раскрытия механизма полученного эффекта необходимо проведение исследования микроструктуры основного и армирующего материалов в зоне разрушения и в зоне их контакта между собой.

Модифицирование структуры ABS пластика в СВЧ электромагнитном поле после окончательного формирования объекта является дополнительным фактором, повышающим не только прочность композиционного изделия, но и равномерность распределения прочностных характеристик по объему, что может повысить его надежность в условиях эксплуатации. Результаты ис-

следований могут быть использованы при изготовлении деталей различных технологических и транспортных технических систем, в частности – летательных аппаратов, к прочности и весовым характеристикам которых предъявляются повышенные требования.

**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 (34). – 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. Павлов, С.П. Оптимизация формы термоупругих тел: моногр. / С.П. Павлов, В.А. Крысько. – Саратов: Изд-во СГТУ, 2000. – 160 с.
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. *A Brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking Ahead* / D.L. Bourell, J.J. Beaman, M.C. Leu, D.W. Rosen // *Proceedings of Rapid Tech. 2009: US – Turkey Workshop on Rapid Technologies*. – Istanbul, 2009. – P. 1–8.
6. Ehrenberg, R. The 3-D Printing Revolution: Dreams Made Real One Layer at a Time / R. Ehrenberg // *Science News*. – 2013. – Vol. 183. – Iss. 5. – P. 20–25.
7. Holmes, L.R. Research Summary of an Additive Manufacturing Technology for the Fabrication of 3D Composites with Tailored Internal Structure / L.R. Holmes, J.C. Riddick // *JOM*. – 2014. – Vol. 66. – Iss. 2. – P. 270–274.
8. Козлов, Б.Г. Предпосылки роста аддитивных технологий в России / Б.Г. Козлов. – <http://www.innoprom.com/media/presentations/kruglyy-stol-additivnye-tekhnologii-luchshie-praktiki/> (дата обращения: 23.11.2017).
9. Антонов, Ф. 3D-печать композитов: тренды, перспективы, применение / Ф. Антонов. – <http://www.innoprom.com/media/presentations/kruglyy-stol-additivnye-tekhnologii-luchshie-praktiki/> (дата обращения: 23.11.2017).
10. Ahmad, A.A. Optimal Design of Tow-Placed Pressurized Fuselage Panels for Maximum Failure Load with Bucking Considerations / A.A. Ahmad, M.M. Abdalla, Z. Gurdal // *Journal of Aircraft*. – 2010. – Vol. 47. – No. 3. – P. 775–782.
11. Simultaneous Optimization of Topology and Orientation of Anisotropic Material using Isoparametric Projection Method / T. Nomura, E.M. Dede, T. Matsumori, A. Kawamoto // *Advances in Structural and Multidisciplinary Optimization – Proceedings of the 11<sup>th</sup> World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization (WCSMO-11)*. – The University of Sydney, Australia, 2015. – P. 728–733.
12. Akash, D. Topology Optimization of Bridge Structures Using Optimality Criteria Method / D. Akash, M. Anadi // *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRAS ET)*. – May 2015. – Vol. 3. – Iss. 5. – P. 1034–1038.
13. Allaire, G. Topology Optimization for Minimum Stress Design with the Homogenization Method / G. Allaire, F. Jouve, H. Maillot // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. – 2004. – Vol. 28. – Iss. 2–3. – P. 87–98.
14. Bendsoe, M.P. *Topology Optimization: Theory, Methods and Applications* / M.P. Bendsoe, O. Sigmund. – Berlin: Springer, 2003. – 370 p.
15. Stainko, R. Phase-field Relaxation of Topology Optimization with Local Stress Constraints / R. Stainko, M. Burger // *S I A M Journal on Control and Optimization*. – 2006. – Vol. 45. – No. 4. – P. 1447–1466.
16. Luo, Y. An Enhanced Aggregation Method for Topology Optimization with Local Stress Constraints / Y. Luo, M.Y. Wang, Z. Kang // *Comput Methods Appl. Mech. Eng.* – 2013. – Vol. 254. – P. 31–41.

17. Luo, Y.J. *Topology Optimization of Continuum Structures with Drucker Prager Yield Stress Constraints* / Y.J. Luo, Z. Kang // *Journal Computers and Structures*. – 2012. – Vol. 90–91. – P. 65–75.
18. Архангельский, Ю.С. *Справочная книга по СВЧ-электротермии: справ.* / Ю.С. Архангельский. – Саратов: Науч. кн., 2011. – 560 с.
19. Злобина, И.В. *Исследование микроструктуры конструкционных слоистых углепластиков, модифицированных путем электрофизических воздействий* / И.В. Злобина, Н.В. Бекренев // *Вестник РГАТУ*. – 2017. – № 1(40). – С. 236–242.
20. *Microwave Assisted Blow Molding of Polyethylene-Terephthalate (PET) Bottles* / L. Estel, Ph. Lebaudy, A. Ledoux et al. // *Proceedings of the Fourth World Congress on Microwave and Radio Frequency Applications*. – 2004. – № 11. – P. 33.
21. Kachmar, M. *Microwave Heating: 50MW and Counting* / M. Kachmar // *Microwaves & RF*. – 1992. – № 9. – P. 41–44.

**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.

**Павлов Сергей Петрович**, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Математика и моделирование», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов, pspasar@yandex.ru.

*Поступила в редакцию 23 ноября 2017 г.*

DOI: 10.14529/engin170407

## RESEARCH OF DURABILITY OF THE OBJECTS 3D OF THE PRESS MODIFIED IN THE ELEKTROMAGNINOM MICROWAVE OVEN THE FIELD REINFORCED BY THE COMPOSITE WITH CARBON FIBRE

*I.V. Zlobina, irinka\_7\_@mail.ru,*

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

*S.P. Pavlov, pspasar@yandex.ru*

*Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russian Federation*

On the basis of the analysis of development of transport technical systems the steady tendency to application in their designs of composite materials is established. The prospects of use of additive technologies of the three-dimensional press for production of objects of irregular shape are also noted. At the same time the method of selective local hardening by formation of topological structures which configuration corresponds to fields of tension arising in use is analysed. A subject of researches was durability of samples from composite material. The purpose of researches was experimental justification of a possibility of increase in durability of objects of additive production from thermoplastic materials by their reinforcing by topological composite structures and the microwave oven of modifying. Researches on resistance to the stretching loadings of the three-dimensional objects with the weakened sections created by means of additive FDM technology are executed. According to the accepted technique carried out definition of a configuration of fields of tension in composite material on computer solid-state model, made samples with the cavity received by modeling of a configuration by method of the three-dimensional press filled a cavity with a composite with carbon fibers. A part of the received samples subjected to influence of the microwave oven of the electromagnetic field. Carried out tests on stretching. It is revealed that reinforcing of a sample from the thermoplastic material ABS the composite material

containing carbon fibers significantly increases the size of explosive effort, at the same time the greatest effect (increase in explosive effort by 1,5 times) is reached at distribution of the reinforcing material according to the predicted fields of operational tension. Additional processing of the reinforced sample in the microwave oven the electromagnetic field with a frequency of 2450 MHz during 10 with leads to increase in explosive effort in comparison with control by 1,74 time, and the elasticity module – by 3,5 times. Results can be used at production of details of various technological and transport technical systems, in particular – aircraft to which durability and weight characteristics increased requirements are imposed.

*Keywords: Additive thermoplastic materials, technology of the three-dimensional press, topology, tension, a 3D model, the reinforcing composite material, strength characteristics, the microwave oven the electromagnetic field.*

### 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. Pavlov S.P., Krys'ko V.A. *Optimizatsiya formy termouprugikh tel* [Optimization of the Shape of Thermoelastic Bodies]. Saratov, Yuri Gagarin State Technical University Publ., 2000. 160 p.
4. Pavlov S.P., Zhigalov M.V., Balabukha M.V. [Optimal Reinforcement of Rods in Torsion Problems]. *Problemy prochnosti elementov konstruksiy pod deystviyem nagruzok i rabochikh sred* [Problems of Strength of Structural Elements under the Influence of Loads and Working Media]. Saratov, Yuri Gagarin State Technical University Publ., 2009, pp. 151–157. (in Russ.)
5. Bourell D.L., Beaman J.J., Leu M.C., Rosen D.W. A Brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking Ahead. *Proceedings of Rapid Tech. 2009: US – Turkey Workshop on Rapid Technologies*. Istanbul, 2009, pp. 1–8.
6. Ehrenberg R. The 3-D Printing Revolution: Dreams Made Real One Layer at a Time. *Science News*, 2013, vol. 183, iss. 5, pp. 20–25.
7. Holmes L.R., Riddick J.C. Research Summary of an Additive Manufacturing Technology for the Fabrication of 3D Composites with Tailored Internal Structure. *JOM*, 2014, vol. 66, iss. 2, pp. 270–274. DOI: 10.1007/s11837-013-0828-4
8. Kozlov B.G. *Predposylki rosta additivnykh tekhnologiy v Rossii* [Preconditions for the Growth of Additive Technologies in Russia]. Available at: <http://www.innoprom.com/media/presentations/kruglyy-stol-additivnye-tekhnologii-luchshie-praktiki/> (accessed 23.11.2017).
9. Antonov F. *3D-pechat' kompozitov: trendy, perspektivy, primeneniye* [3D Printing of Composites: Trends, Perspectives, Application]. Available at: <http://www.innoprom.com/media/presentations/kruglyy-stol-additivnye-tekhnologii-luchshie-praktiki/> (accessed 23.11.2017).
10. Ahmad A.A., Abdalla M.M., and Gurdal Z. Optimal Design of Tow-Placed Pressurized Fuselage Panels for Maximum Failure Load with Bucking Considerations. *Journal of Aircraft*, 2010, vol. 47, no. 3, pp. 775–782.
11. Tsuyoshi Nomura, Ercan M. Dede, Tadayoshi Matsumori and Atushi Kawamoto. Simultaneous Optimization of Topology and Orientation of Anisotropic Material using Isoparametric Projection Method *Advances in Structural and Multidisciplinary Optimization – Proceedings of the 11<sup>th</sup> World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization (WCSMO-11)*. The University of Sydney, Australia, 2015, pp. 728–733.
12. Akash D., Anadi M. Topology Optimization of Bridge Structures Using Optimality Criteria Method. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRAS ET)*, 2015, vol. 3, iss. 5, pp. 1034–1038.
13. Allaire G., Jouve F., Maillot H. Topology Optimization for Minimum Stress Design with the Homogenization Method. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2004, vol. 28, iss. 2–3, pp. 87–98. DOI: 10.1007/s00158-004-0442-8
14. Bendsoe M.P., Sigmund O. *Topology Optimization: Theory, Methods and Applications*. Springer, 2003. 370 p.

15. Burger M, Stainko R. Phase-Field Relaxation of Topology Optimization with Local Stress Constraints. *SIA M Journal on Control and Optimization*, 2006, vol. 45, no. 4, pp. 1447–1466.
16. Luo Y., Wang M.Y., Kang Z. An Enhanced Aggregation Method for Topology Optimization with Local Stress Constraints. *Comput Methods Appl. Mech. Eng.*, 2013, vol. 254, pp. 31–41.
17. Luo Y.J., Kang Z. Topology Optimization of Continuum Structures with Drucker Prager Yield Stress Constraints. *Journal Computers and Structures*, 2012, vol. 90–91, pp. 65–75. DOI: 10.1016/j.compstruc.2011.10.008
18. Arkhangel'skiy Yu.S. *Spravochnaya kniga po SVCH-elektrotermii: spravochnik* [Reference Book on Microwave Electrothermy: a Reference Book]. Saratov, Nauchnaya kniga Publ., 2011. 560 p.
19. Zlobina I.V., Bekrenev N.V. [Investigation of the Microstructure of Structural Layered Carbon Plastics, Modified by Electrophysical Influences]. *Bulletin of the Rybinsk State Aviation Technical University*, 2017, no. 1 (40), pp. 236–242. (in Russ.)
20. Estel L., Lebaudy Ph., Ledoux A., Bonnet C., Delmotte M. Microwave Assisted Blow Molding of Polyethylene-Terephthalate (PET) Bottles. *Proceedings of the Fourth World Congress on Microwave and Radio Frequency Applications*, 2004, no. 11, pp. 33.
21. Kachmar, M. Microwave Heating: 50MW and Counting. *Microwaves & RF*, 1992, no. 9, pp. 41–44.

*Received 23 November 2017*

---

**ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ**

Злобина, И.В. Исследование прочности модифицированных в СВЧ электромагнитном поле объектов 3D печати, армированных композитом с углеродным волокном / И.В. Злобина, Н.В. Бекренев, С.П. Павлов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2017. – Т. 17, № 4. – С. 70–81. DOI: 10.14529/engin170407

**FOR CITATION**

Zlobina I.V., Bekrenev N.V., Pavlov S.P. Research of Durability of the Objects 3D of the Press Modified in the Elektromagninom Microwave Oven the Field Reinforced by the Composite with Carbon Fibre. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2017, vol. 17, no. 4, pp. 70–81. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin170407