

УДК 691.322:004.421

**МОДЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КРИТЕРИЕВ ПРОЧНОСТИ  
СТЕКЛОПЛАСТИКОВОЙ АРМАТУРЫ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ  
И НАПЕЧАТАННЫХ НА 3D-ПРИНТЕРЕ ОБРАЗЦОВ****канд. техн. наук Д.Н. ШАБАНОВ; Е.А. ЗЯБКИН; Е.А. ТРАМБИЦКИЙ  
(Полоцкий государственный университет)**

*Представлен анализ деформационно-прочностных характеристик волокнистых композитов, а также напечатанных на 3D-принтере образцов. Обнаружены некоторые специфические направленные механизмы разрушения (расслоения, расщепления, скол вдоль волокон, полосы сдвига). Сделан вывод, что для численного описания таких видов разрушения необходимы нетрадиционные подходы, новые специальные модели разрушения и критерии прочности, учитывающие взаимодействие нормальных и касательных напряжений на плоскости разрушения. Показано, что использование простых линейных критериев прочности позволяет лучше интерпретировать экспериментальные данные и оценивать в опытах прочностные параметры целостности композитных структур.*

**Ключевые слова:** *растяжение, напряжение, 3D-принтер, стеклопластиковая арматура, деформация.*

**Введение.** Актуальность развития новых методов, учитывающих неоднородность полей напряжений и деформаций в структурных элементах, а также многостадийность процессов микро- и макроразрушения, связана с необходимостью получения новых данных о влиянии параметров структуры на неупругое механическое поведение и эффективные деформационные и прочностные свойства структурно неоднородных сред [1–10].

Одна из особенностей неупругого поведения материалов – закритическая стадия деформирования. Вопросы теоретического и экспериментального изучения закономерностей закритического деформирования материалов привлекают внимание исследователей в связи с необходимостью использования деформационных резервов материалов, повышения несущей способности и живучести конструкций. Развитие методов расчета ответственных конструкций с оценкой их живучести и безопасности требует получения информации о закономерностях механического поведения композиционных материалов на стадии закритического деформирования [2].

Разрушение конструкционных материалов может происходить по одному из двух направлений: может быть пластичным или хрупким. Эта классификация основана на том, могут ли в материале создаваться пластические деформации. Для пластических материалов характерны большие *пластические деформации*, т.е. материалы поглощают большую энергию деформирования до наступления разрушения. При *хрупком разрушении*, напротив, пластические деформации либо отсутствуют, либо очень малы, и поглощения энергии до разрушения не происходит [3].

В последние годы на мировом рынке активно применяются решения, способные преобразить всю инвестиционно - строительную деятельность – это широко известные в мире информационные технологии, в частности BIM & IPD-технологии, а также 3D-печать.

Изучение факторов пластичности и хрупкости, влияющих на характер процессов образования и развития дефектов, связано с исследованиями явления деформационного разупрочнения материалов на закритической стадии деформирования, непосредственно предшествующей моменту разрушения [1].

«Пластичность» и «хрупкость» – это лишь условные термины. То, каким образом разрушение происходит в действительности, зависит от конкретных обстоятельств. Пластичность можно количественно охарактеризовать относительным удлинением или относительным уменьшением поперечного сечения; пластичность зависит от температуры, скорости деформации, а также от вида напряженного состояния [3].

Любой процесс разрушения происходит в два этапа: вначале образуется трещина, которая затем распространяется. Характер разрушения в высокой степени зависит от механизма разрушения. Для пластичных материалов характерно то, что впереди растущей трещины и вокруг нее развивается область пластических деформаций, при этом процесс распространения трещины происходит относительно медленно. Такие трещины часто характеризуют термином «стабильные». В этом случае материал сопротивляется дальнейшему развитию трещины, если только напряжение не увеличивается. Кроме того, визуально наблюдаются крупномасштабные деформации на поверхности разрушения в виде полос кручения и задира. В случае же хрупкого разрушения, напротив, трещина распространяется очень быстро без каких-либо заметных пластических деформаций. Трещину в этом случае характеризуют как неустойчивую, а развитие трещины после того, как она возникла, происходит самопроизвольно без увеличения приложенного напряжения.

Разрушение не происходит при фиксированном для данного материала значении какой-либо меры напряженного состояния в точке. Условия разрушения формируются в процессе деформирования, имеют нелокальный характер и ключевым образом определяются не только свойствами среды, но и механическими свойствами нагружающей системы, что приводит к отказу от использования критериев прочности в традиционном их понимании. Предлагаемый альтернативный подход заключается в том, что условия разрушения в результате потери устойчивости процесса неупругого деформирования определяются непосредственно из решения краевой задачи, при формулировке которой диссипативные свойства материала учитываются в определяющих соотношениях с помощью материальных функций, а условия нагружения – с помощью локальных или нелокальных граничных условий контактного типа [2].

Теоретические положения иллюстрируются аналитическими решениями простейших задач для тел с зонами разупрочнения и стержневых систем, численными решениями краевых задач механики неупругого деформирования и разрушения для тел с концентраторами напряжений и композитов волокнистой, слоистой и зернистой структур [2].

Испытания проводились в лабораторных условиях на стенде, предназначенном для проведения статических испытаний прочности материалов на осевое растяжение/сжатие.



Рисунок 1. – Образец в разрывной машине

Разрывная машина (рисунок 1) имеет механизированный привод управления активным захватом с программным управлением, осуществляемым при помощи персонального компьютера. Программное обеспечение позволяет проводить испытания образцов по заранее заданным параметрам с установкой требуемой скорости испытания. Графический вывод экспериментальных зависимостей в режиме реального времени. Возможность сохранения результатов эксперимента в отдельный файл для дальнейшей обработки в сторонних приложениях облегчает проведение эксперимента и делает его более наглядным. Конструктивно разрывная машина выполнена в виде двух полурам, причем верхняя полурама имеет возможность перемещаться вдоль вертикальной оси относительно нижней. Неподвижная полурама – сварная конструкция, соединенная с подвижной, выполняющей функцию приводного механизма. Испытуемые образцы устанавливаются в захваты, имеющие бортики для фиксации. Усилия, возникающие в образцах при растяжении, регистрируются весовым датчиком. Показания величины усилий и деформаций передаются на компьютер, который подключен к внешнему блоку измерения.

На рисунке 2 представлены результаты испытаний образцов (А – стеклопластик; Б – напечатанный на 3D-принтере) на растяжение в разрывной машине НТЦ-13.04.20.

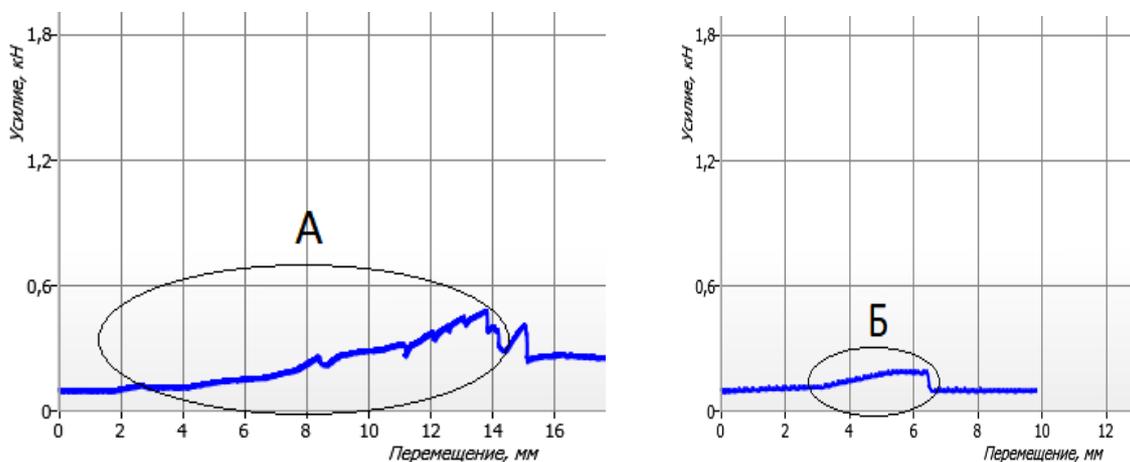


Рисунок 2. – Результаты испытаний образцов на растяжение

В ходе анализа напряженно-деформированного состояния стеклопластикового образца установлена зависимость, представленная на рисунке 3.

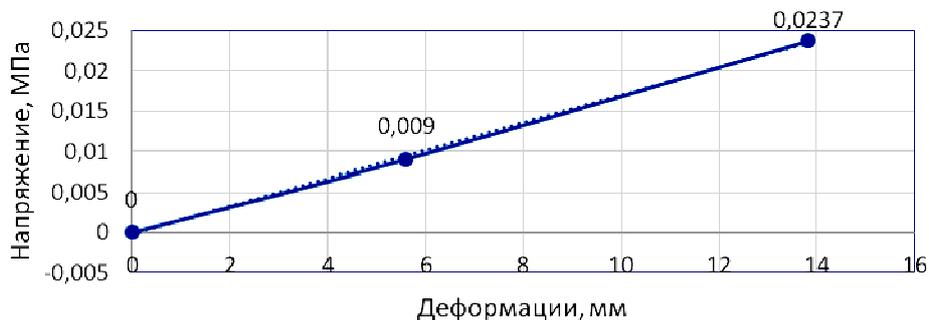


Рисунок 3. – Напряженно-деформированное состояние стеклопластикового образца

Установлено, что разрушение образца из стекловолокна (рисунок 4) происходило в несколько стадий:  
- при достижении напряжений в образце 0,0237 МПа наблюдается разрыв внешних волокон;  
- при дальнейшем нагружении стержень разрывается по своему сечению.  
Диаграмма «напряжение – деформация» практически линейная вплоть до разрушения арматуры.



Рисунок 4. – Результат испытания стеклопластикового образца

Исследование напряженно-деформированного состояния образца, напечатанного на 3D-принтере, выявило схожую зависимость (рисунок 5).

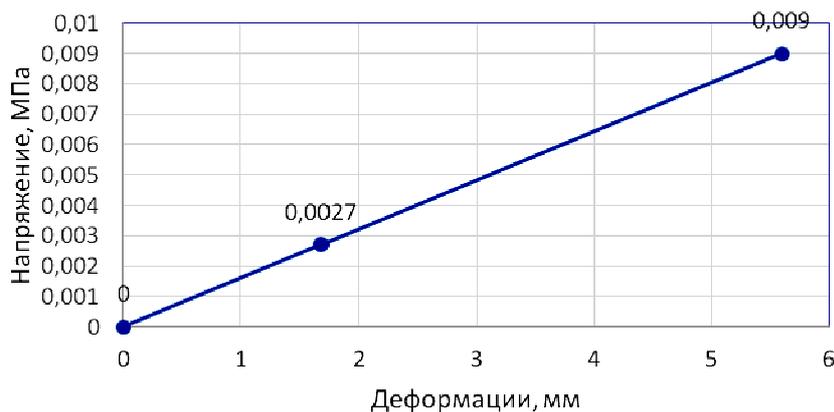
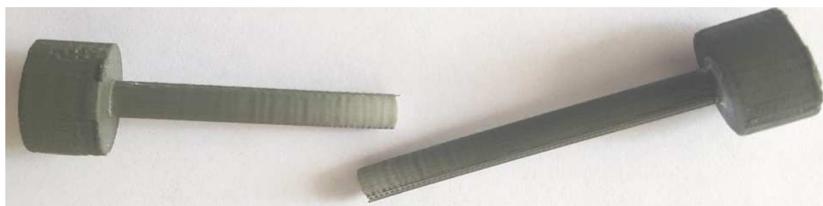


Рисунок 5. – Напряженно-деформированное состояние образца, напечатанного на 3D-принтере

Изучив характер разрушения напечатанного образца (рисунок 6), сделаны следующие **выводы**:  
- *характер разрушения хрупкий*. Такое разрушение происходит в отсутствие заметных деформаций путем быстрого распространения трещины. Направление развития трещины близко к строго перпендикулярному направлению приложения нагрузки, а поверхность разрыва в этом случае сравнительно гладкая;

- *предел прочности полимерных материалов невелик по сравнению с прочностью стеклопластиков*. Как правило, термореактивным полимерам присуще хрупкое разрушение. Процесс разрушения

происходит таким образом, что трещина образуется в области, в которой имеет место концентрация напряжений (т.е. царапины, надрезы и полости).



**Рисунок 6. – Результат испытания напечатанного на 3D-принтере образца**

Таким образом, подытоживая результаты проведенного модельного анализа критериев прочности стеклопластиковой арматуры периодического профиля и напечатанных на 3D-принтере образцов, можно сделать вывод, что характер разрушения образцов кардинально отличается друг от друга.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вильдеман, В.Э. Механика неупругого деформирования и разрушения композиционных материалов / В.Э. Вильдеман, Ю.В. Соколкин, А.А. Ташкинов. – М. : Наука. Физматлит, 1997. – 288 с.
2. Вильдеман, В.Э. Моделирование процессов структурного разрушения и масштабных эффектов разупрочнения на закритической стадии деформирования неоднородных сред / В.Э. Вильдеман, А.В. Ильиных // Физическая мезомеханика. – 2007. – Т. 10, № 4. – С 23–31.
3. Каллистер, У. Материаловедение: от технологии к применению (металлы, керамика, полимеры) / У. Каллистер, Д. Ритвич. – СПб. : Науч. основы и технологии, 2011. – 896 с.
4. Мекеров, Б.А. Аналитические описания для диаграммы растяжения высокопрочной арматурной стали / Б.А. Мекеров, Р.Л. Маилян // Новые виды арматуры и ее сварка : сб. докл. Всесоюз. совещ. в Волгограде, 1982. – С. 166–171.
5. Джигрин, А.В. Исследование структуры композита со спирально армированным наполнителем для анкерной крепи / А.В. Джигрин, И.В. Махраков // Изв. высш. учеб. заведений. Горный журн. – 2012. – № 2. – С. 38–43.
6. Полилов, А.Н. Экспериментальное обоснование критериев прочности волокнистых композитов, проявляющих направленный характер разрушения / А.Н. Полилов, Н.А. Татусь // Вестн. Перм. нац. исслед. Политехн. ун-та. Механика. – 2012. – № 2. – С. 140–166.
7. Луговой, А.Н. Композитная арматура миф или будущее [Электронный ресурс] / А.Н. Луговой, В.Ф. Савин. – URL: [http://www.sskural.ru/meropriyatiya/?ELEMENT\\_ID=3040](http://www.sskural.ru/meropriyatiya/?ELEMENT_ID=3040). – Дата обращения: 10.08.2013.
8. Белянкин, Ф.П. Прочность и деформативность слоистых пластиков / Ф.П. Белянкин, В.Ф. Яценко, Г.И. Дыбенко. – Киев : Наукова думка, 1964. – 220 с.
9. С.А. Лурье, Юсефи Шахрам Об определении эффективных характеристик неоднородных материалов // Механика композиционных материалов и конструкций. – 1997. – Т. 3, № 4. – С. 76–92.
10. Полилов, А.Н. Неупругие свойства композиционных материалов / А.Н. Полилов // Новое в зарубежной науке. Механика. Вып. 16. – М. : Мир, 1978. – 296 с.

Поступила 18.05.2017

#### MODEL ANALYSIS OF STRENGTH CRITERIA FIBERGLASS REINFORCEMENT FOR THE PERIODIC PROFILE AND PRINTED ON 3D-PRINTER SAMPLES

*D. SHABANOV; E. ZIABKIN; E. TRAMBITSKY*

*The article presents analysis of deformation-strength characteristics of fibrous composites, as well as samples printed on a 3D printer. Some specific directional mechanisms of destruction (stratification, splitting, cleavage along the fibers, shear bands) are found. The conclusion is drawn that non-traditional approaches, new special models of fracture and strength criteria, which take into account the interaction of normal and tangential stresses on the failure plane, are needed to numerically describe these types of fracture. It is shown that the use of simple linear strength criteria makes it possible to better interpret the experimental data and to evaluate the strength parameters of the integrity of composite structures in the experiments.*

**Keywords:** extension, tension, 3D printer, fiberglass reinforcement, deformation.