

УДК 691.322:004.421

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТЕКЛОПЛАСТИКОВОЙ АРМАТУРЫ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ОЦЕНКИ ЕЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ**канд. техн. наук Д.Н. ШАБАНОВ; Е.А. ЗЯБКИН; Е.А. ТРАМБИЦКИЙ
(Полоцкий государственный университет)**

Рассматриваются свойства смоделированного композиционного материала. Показана их зависимость от исходных компонентов, вида и расположения волокон в армирующем наполнителе, метода и технологических условий изготовления изделий, ряда других факторов. Внимание акцентируется на выборе компонентов композиционно-волоконистых материалов, осуществляемом с учетом индивидуальных свойств волокнистого полуфабриката и полимерного связующего (полимерной матрицы), а также их взаимного влияния, обусловленного соотношением деформационных свойств компонентов, изменением свойств волокон под влиянием компонентов полимерной матрицы, смачиванием на границе раздела фаз.

Ключевые слова: 3-D моделирование, быстрое прототипирование, композиционный материал, стеклопластиковая арматура, эксплуатационные свойства.

Изучение деформационных свойств полимерных материалов неразрывно связано с задачами по сравнительному анализу особенностей материалов, с исследованиями взаимосвязи свойств со структурой, с целенаправленным технологическим регулированием свойств, а также прогнозированием кратковременных и длительных механических воздействий. На изучаемые деформационные свойства полимерных материалов оказывают влияние температурные воздействия, а также уровни и длительность механических воздействий. Для проведения сравнительного анализа и прогнозирования указанных свойств необходима разработка математической модели на основе физически обоснованного аналитического описания этих влияний. Особого внимания заслуживают решения с физической обоснованностью выбранных уравнений в сочетании с минимумом количества используемых параметров.

Следует заметить, что изучение механических свойств полимерных материалов, проявляющихся в условиях эксплуатации, гораздо сложнее, чем измерение только лишь разрывных характеристик, которые не позволяют в полной мере объективно оценить свойства материала. Особую ценность имеет решение такой задачи для полимерных материалов, когда помимо сопоставления механических свойств материалов необходимы расчеты на условия эксплуатации изделий. Задача состоит в разработке принципиально нового вида периодического профиля стеклопластиковой арматуры для получения более высоких механических свойств, а также в возможности ее предварительного напряжения с последующим применением в строительстве.

Исследовательская часть. Определяющим при создании изделий из стекловолокна, является связующее (волокно – матрица), удовлетворяющее требованиям, которые включают следующие характеристики [1; 2]:

- модуль упругости при растяжении и сдвиге стекловолокна должен быть больше, чем связующего:

$$E_B > E_M; G_B > G_M,$$

где E_B , G_B и E_M , G_M – модуль упругости при растяжении и сдвиге соответственно стекловолокна и связующего;

- прочность стекловолокон должна быть больше, чем связующего $s_B > s_M$;
- удлинение при разрыве волокон должно в незначительной степени отличаться от связующего:

$$e_B < e_M;$$

- коэффициенты Пуассона для стекловолокна и матрицы должны быть максимально близкими:

$$\mu_B \geq \mu_M,$$

чтобы при деформации композита на границе «волокно – матрица» не возникало напряжений, отрывающих их друг от друга и тем самым снижающих адгезию.

Взаимодействие стекловолокна с матрицей должно обеспечивать высокую реализацию механических свойств волокон в армированном материале и его монолитность, что обеспечивается за счет хорошей смачиваемости волокон матрицей (связующим), а также высоким уровнем адгезии между волокном и матрицей. Немаловажную роль играет релаксация внутренних напряжений в элементарном объеме «волокно – матрица».

Армирующий волокнистый материал, а именно стеклоровинг, содержащий заданное количество волокнистого накопителя (стеклонитей), позволяет регулировать диаметр получаемых стержней. В качестве связующего обычно используются смолы (Norpol Dion 6694; Atlas-580; ЭВС-9133), обладающие высокой стойкостью к кислотам, щелочам, особенно к хлорным средам. Винилэфирные смолы отверждаются, как и полиэфирные, близки по физико-механическим характеристикам к эпоксидным; имеют лучшие свойства по пропитке и смачиванию армирующих материалов-наполнителей и полимеризации, легче подвергаются переработке, чем эпоксидные смолы; отличаются высокой водостойкостью [4].

Как видно из графика (рис. 1), отверждение эпоксидных связующих сопровождается образованием пространственно-сшитой структуры и усадкой полимера, которая достигает приблизительно 3,5%. Большие усадки приводят к образованию трещин, пустот, дефектов в структуре материала, что снижает уровень физико-механических характеристик [6; 7].

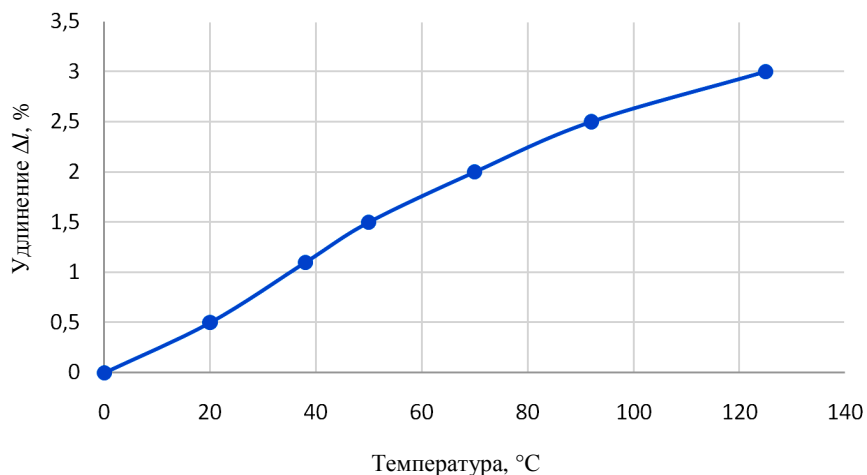


Рисунок 1. – Зависимость линейной усадки от температуры

Разработанная в Полоцком государственном университете технология, которая может быть использована для 3D-печати продукции, армированной непрерывными нитями из стекловолкна, позволяет получать арматуру периодического профиля. На рисунках 2, 3 изображен общий вид смоделированных арматурных композитных стержней, которые можно использовать для армирования изделий как конструктивно, так и с расчетом в зависимости от условий эксплуатации. Профиль арматуры формируется за счет силы натяжения ровингов на бобине, при ослаблении натяжения формируется эллиптический вид профиля, а при усилении прямоугольный вид профиля.

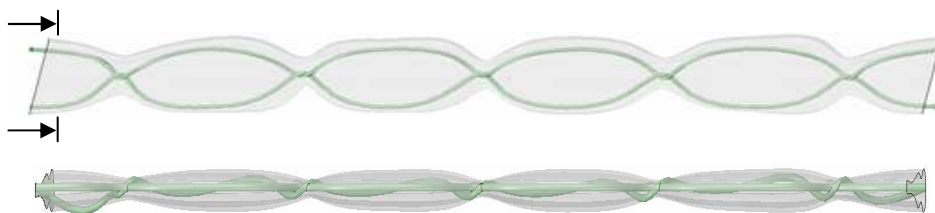


Рисунок 2. – Профиль стеклопластиковой арматуры эллиптического вида



Рисунок 3. – Профиль стеклопластиковой арматуры прямоугольного вида

На рисунке 4 изображен зигзагообразный профиль, формируемый в результате отклонения в поперечном направлении одного из жгутов, который применяется для изготовления преднапряженных цементно-бетонных конструкций. Преднапряжение данной стеклопластиковой арматуры предполагается за счет вытягивания стержня на величину Δl .

Арматурный композитный стержень содержит два жгута, которые подвергают завивке путем обвода одного из жгутов вокруг другого жгута с образованием петли, последующим ее затягиванием и многократным повторением процесса завивки.

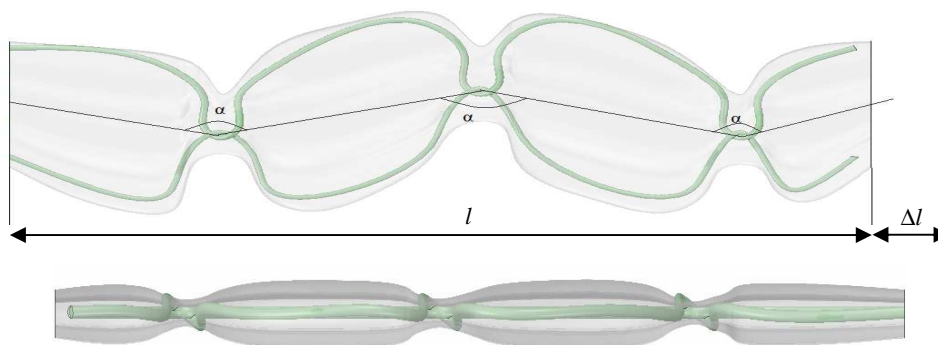
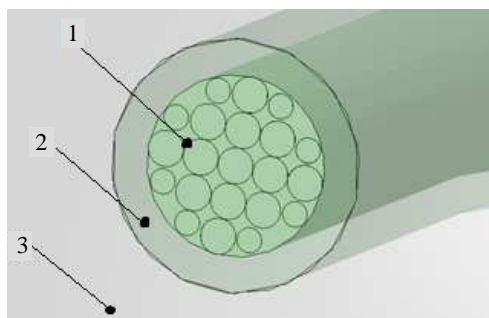


Рисунок 4. – Профиль стеклопластиковой арматуры зигзагообразной формы

Отличительными признаками смоделированного арматурного стержня являются:

- другая форма выполнения элементов, а именно арматурного композитного стержня, имеющего места переплетения из жгутов нитей;
- взаиморасположение элементов – места переплетения расположены с равным шагом между ними (регулируемым);
- дополнительная обработка стеклоровингов специальными видами смол, обладающими таким свойством, как память, которое будет стремиться вернуть стержень в первоначальное состояние – до его вытягивания (рис. 5).



- 1 – ровинг, состоящий из стеклонитей;
- 2 – дополнительная обработка стеклоровинга;
- 3 – основное покрытие стержня

Рисунок 5. – Дополнительная защита стеклоровинга обработкой смолой

Предполагаемое изготовление арматурного композитного стержня предусматривает модернизацию существующих технологических линий либо использование принципиально новых технологий, которые бы позволили формировать профиль по специально созданным программам. Использование модели позволяет повысить надежность строительных конструкций за счет увеличения площади сцепления арматурного композитного стержня с бетоном и формирования предварительного напряжения.

Физическое экспериментирование предоставляет возможность не только выяснить осуществимость того или иного технологического процесса и получить первые представления об изучаемой сложной системе, но и в большинстве случаев решить конкретную технологическую задачу.

Результаты эксперимента могут быть более значимыми при использовании теории подобия и моделирования. Основополагающим и общепризнанным принципом в технологии строительных материалов и изделий является учение о связи состава и внутреннего строения материала с его свойствами. Руководствуясь этим принципом, можно проникнуть в физику происходящих в сложной системе процессов и создать информационную базу для принятия инженерных решений, имея лишь приблизительное представление о средних интегральных показателях скоростей процессов структурообразования и степеней их завершенности, к определенным технологическим или эксплуатационным периодам.

В настоящее время на основе экспериментальных данных и развитых представлениях о строении материалов установлен ряд зависимостей между их основными свойствами и наиболее существенными факторами, которые используются в технологических расчетах для отыскания приближенных оценок [12; 13].

Таким образом, при обработке экспериментальных данных, представленных в таблице 1, получена зависимость абсолютных деформаций стеклопластиковой арматуры периодического профиля от нагрузки, позволяющая предположить, что возможность получения предварительного напряжения осуществима.

Таблица 1. – Экспериментальные данные стеклопластиковой арматуры периодического профиля

Нагрузка по этапу Q , кН	1	3	6	9	12	15	18
Удлинение Δl , мм	0,0004	0,0013	0,0024	0,0034	0,0045	0,0056	0,0073

На примере регрессионной модели можно вывести зависимость прочности композита (y) от нагрузки по этапу (Q , кН). Эту зависимость из физических соображений можно считать линейной:

$$y = b_0 + b_1 \cdot Q.$$

В матричной записи:

$$XB = Y.$$

Для оценивания коэффициентов линейной модели, меняя нагрузку Q от 1 кН с шагом 18 кН, проведены семь опытов без повторений до разрыва. Результаты представлены вектором:

$$Y = \begin{bmatrix} 0,0004 \\ 0,0013 \\ 0,0024 \\ 0,0045 \\ 0,0056 \\ 0,0073 \end{bmatrix}.$$

Расчетная матрица, второй столбец которой задает условия опытов, имеет вид:

$$X = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 3 \\ 1 & 6 \\ 1 & 9 \\ 1 & 12 \\ 1 & 15 \\ 1 & 18 \end{bmatrix}.$$

Вектор коэффициентов

$$B = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \end{bmatrix}.$$

Для вычисления этих коэффициентов найдем последовательно: матрицу X^T :

$$X^T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 3 & 6 & 9 & 12 & 15 & 18 \end{bmatrix};$$

матрицу $X^T X$:

$$X^T X = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 3 & 6 & 9 & 12 & 15 & 18 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 3 \\ 1 & 6 \\ 1 & 9 \\ 1 & 12 \\ 1 & 15 \\ 1 & 18 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7 & 64 \\ 64 & 820 \end{bmatrix}.$$

Определитель

$$\det(X^T X) = \det \begin{bmatrix} 7 & 64 \\ 64 & 820 \end{bmatrix} = 1644.$$

Обратная матрица $(X^T X)^{-1}$ имеет вид:

$$(X^T X)^{-1} = \begin{bmatrix} 0,49 & -0,039 \\ -0,039 & 0,0042 \end{bmatrix}.$$

Матрицу $X^T Y$ представим следующим образом:

$$X^T Y = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 3 & 6 & 9 & 12 & 15 & 18 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0,0004 \\ 0,0013 \\ 0,0024 \\ 0,0045 \\ 0,0056 \\ 0,0073 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,025 \\ 0,32 \end{bmatrix}.$$

Находим B :

$$B = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,49 & -0,039 \\ -0,039 & 0,0042 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,025 \\ 0,32 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,00023 \\ 0,00037 \end{bmatrix}.$$

Таким образом, выполнив оценку параметров линейной эконометрической модели с помощью МНК (метод наименьших квадратов), получили зависимость удлинений от механического и температурного воздействий, описанную выражением

$$\hat{y} = -0,00023 + 0,00037Q$$

и представленную на рисунке 6.

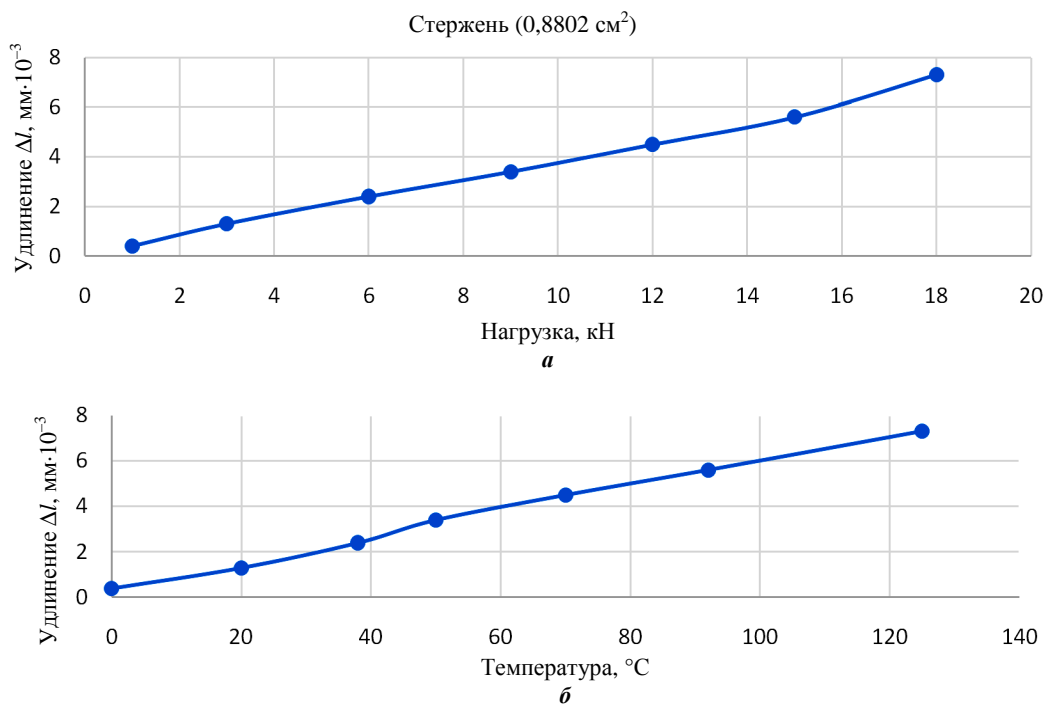


Рисунок 6. – Зависимость удлинений от механического (а) и температурного (б) воздействий

Заключение. Выполненные исследования позволяют выдвинуть гипотезу о возможности использования стеклопластиковой арматуры периодического профиля в преднапряженных бетонных изделиях.

Исходя из литературного анализа и полученных при помощи математического планирования эксперимента и математической статистики результатов, можно констатировать, что при температурном и механическом воздействии на стеклопластиковую арматуру периодического профиля можно достичь удлинения, которое необходимо для получения предварительного напряжения. При обработке специальными видами смол участки переплетения программно-смоделированных стержней будут обладать таким свойством, как «память», стремящемся вернуть стержень к первоначальному виду – до механического и температурного воздействия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фролов, Н.П. Стеклопластиковая арматура и стеклопластбетонные конструкции / Н.П. Фролов. – М. : Стройиздат, 1980. – 104 с.
2. Сопротивление стеклопластиков / В.Л. Бажанов [и др.]. – М. : Химия, 1968. – 304 с.
3. Галкин, И.С. О влиянии конструкции арматурного каната на его сцепление с бетоном / И.С. Галкин // Новые виды арматуры. – М. : Стройиздат, 1964. – 136 с.
4. Полилов, А.Н. Неупругие свойства композиционных материалов / А.Н. Полилов // Новое в зарубежной науке. Механика. Вып. 16. – М. : Мир, 1978. – 296 с.
5. Богословский, В.Н. Строительная физика. – 2-е изд., перераб и доп. / В.Н. Богословский. – М. : Высш. школа, 1982. – 415 с.
6. Аскадский, А.А. Компьютерное материаловедение полимеров / А.А. Аскадский, В.И. Кондращенко. – М. : Науч. мир, 1999. – Т. 1 : Атомно-молекулярный уровень. – 544 с.
7. Фазовые равновесия и фазовая структура смесей полимеров / А.Е. Чалых [и др.] // Усп. хим. – 2004. – Т. 73, вып. 1. – С. 63–78.
8. Полилов, А.Н. Критерии прочности полимерных волокнистых композитов, описывающие некоторые экспериментально наблюдаемые эффекты / А.Н. Полилов, Н.А. Татусь // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2008. – № 3. – С. 103–110.
9. Соломатов, В.И. Элементы общей теории композитных строительных материалов // В.И. Соломатов // Изв. вузов. Сер. Стр-во и архитектура. – 1980. – № 8 – С. 61–70.
10. Соломатов, В.И. Полиструктурная теория композиционных строительных материалов / В.И. Соломатов // Новые композиционные материалы в строительстве : науч. тр. Саратов. политехн. ин-та ; под ред. В.И. Соломатова. – Саратов, 1981. – С. 5–9.
11. Арматура стеклопластиковая СПА-6. Технические условия. ТУ 7 БССР I-81 / Гос. ком. Белорусской ССР по делам строительства.
12. Питлюк, Д.А. Расчет строительных конструкций на основе моделирования / Д.А. Питлюк. – М. : Изд-во лит. по стр-ву, 1965. – 154 с.
13. Сороговец, И.Б. Теория вероятностей и математическая статистика : учеб.-метод. компл. для студентов техн. специальностей / И.Б. Сороговец. – Новополоцк : ПГУ, 2009.
14. Способ изготовления композитной арматуры периодического профиля : полож. реш. пат. Респ. Беларусь, МПК E 04 C 5/07, B 29 C 55/30, B 29 C 53/26 / Н.Н. Попок, Д.Н. Шабанов, О.А. Ерошова, Е.А. Менжинский ; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № a20130798 ; заявл. 2013.06.24.
15. Бетонные и железобетонные конструкции : СНиП 52-01-2003. – Введ. постановлением Гос. ком. Рос. Федерации по стр-ву и жилищно-коммунальному комплексу от 30.06.2003 № 127. – М. : ФГУП ЦПП, 2004.

Поступила 09.12.2016

COMPUTER SIMULATION FIBERGLASS REINFORCEMENT WITH PERIODIC PROFILE AND COMPUTER EXPERIMENT EVALUATING ITS PERFORMANCE PROPERTIES

D. SHABANOV, E. ZIABKIN, E. TRAMBITSKIY

Discusses the properties of the modeled composite material. Shows their dependence on the source component, type and arrangement of fibers in the reinforcing filler, the method and technological conditions of manufacturing the product and other factors. Focuses on the selection of components of composite-fiber materials, which take into consideration the individual properties of the fibrous material and polymeric binder (polymeric matrix), as well as their mutual influence caused by properties of, in particular, as the ratio of deformation properties of components, changing properties of the fibers under the influence of the components the polymer matrix, the wetting at the interface between the phases.

Keywords: 3-D modeling, rapid prototyping, composite material, fiberglass reinforcement, performance properties.