

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЫСОКОМОДУЛЬНЫХ ВОЛОКОН ДЛЯ КОМБИНИРОВАННОЙ КОМПОЗИТНОЙ АРМАТУРЫ

В. Г. Барсуков¹, А. Р. Волик², С. А. Сазон³

*¹ д.т.н., доцент, заведующий кафедрой механики и строительных конструкций,
УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», Гродно, Беларусь,
e-mail: v.g.barsukiov@grsu.by*

² к.т.н., доцент, декан инженерно-строительного факультета, УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», Гродно, Беларусь, e-mail: a.volick@grsu.by

*³ старший преподаватель кафедры механики и строительных конструкций, УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», Гродно, Беларусь,
e-mail: ssazon@grsu.by*

Реферат

Интенсивное развитие исследований во многих научных центрах мира в области создания комбинированной (гибридной) композитной арматуры обусловлено тем обстоятельством, что высокая прочность и коррозионная стойкость стеклопластиковой и базальтопластиковой арматуры не позволяет в настоящее время массово использовать ее в строительных конструкциях вследствие значительно более низкого модуля упругости в сравнении с арматурой из стали. Введение высокомодульных волокон в комбинированную композитную арматуру требует обоснованного выбора конкретного вида волокон не только по ценовым и технологическим параметрам, но также с учетом возможных механизмов многостадийного процесса разрушения при испытаниях на разрыв. Предложена комплексная методика структурно-механического анализа механизмов разрушения комбинированной композитной арматуры, учитывающая вид высокомодульных волокон (хрупкие типа углеродных или пластичные типа стальных), степень наполнения, модули упругости и показатели прочностных свойств (предел прочности и предел текучести). Показана возможность и определены условия снижения прочности комбинированных угле-стеклопластиков в сравнении с исходными стеклопластиком, наряду с увеличением модуля упругости на первом этапе нагружения. На примере углеродных волокон ведущих мировых производителей, а также углеродных волокон производства Республики Беларусь произведена расчетная оценка теоретической прочности комбинированного композита с учетом характерных стадий диаграммы растяжения, обусловленных несовпадением свойств стеклянных (базальтовых) и высокомодульных (углеродные) волокон. Полученные результаты позволяют модернизировать методику прогнозной оценки прочности композитной строительной арматуры и могут быть использованы инженерно-техническими работниками предприятий-изготовителей и потребителей такой арматуры, а также в учебном процессе при подготовке инженерных кадров строительного профиля.

Ключевые слова: комбинированная композитная арматура, прочность, механизмы разрушения, многостадийность разрыва, растяжение, армирующие волокна.

COMPARATIVE ANALYSIS OF HIGH-MODULUS FIBERS FOR COMBINED COMPOSITE REINFORCEMENTS

V. G. Barsukov, A. R. Volik, S. A. Sazon

Abstract

The intensive development of research in many scientific centers of the world in the field of creating combined (hybrid) composite reinforcement is due to the fact that the high strength and corrosion resistance of fiberglass and basalt-plastic reinforcement does not currently allow it to be widely used in building structures due to a significantly lower modulus of elasticity in comparison with steel one. The introduction of high-modulus fiber into combined composite reinforcement requires a reasonable choice of a specific type of fiber, not only in terms of price and technological parameters, but also taking into account the possible mechanisms of the multi-stage fracture process during tensile test. A comprehensive method for the structural – mechanical analysis of the mechanisms of combined composite reinforcement destruction is proposed, taking into account the type of high-modulus fibers (brittle carbon type or ductile), degree of filling, elastic moduli and indicators of strength properties (tensile strength and yield stresses). The possibility is shown and the condition for reducing the strength of combined carbon fiber glass plastics in comparison with the original glass-reinforced plastics, along with an increase in the elastic modulus at the first stage of loading, are determined. On the example of carbon fiber from the world's leading manufacturers, as well as carbon fiber produced by the Republic of Belarus, a calculated estimate of the theoretical strength of the combined composite was made, taking into account the characteristic stage of the tension diagram, due to the mismatch between the properties of glass (basalt) and high-modulus (carbon) fiber. The results obtained make it possible to modernize the method of predictive assessment of the composite building reinforcement and can be used by engineering and technical workers of manufacturers and consumers of such reinforcement, as well as in the educational process in the training of engineering personnel of the construction profile.

Key words: combined composite reinforcement, strength, destruction mechanisms, multi-stage fracture, tension, reinforcing fibers.

Введение

При работе в условиях воздействия влаги и других коррозионно-активных сред композитная арматура во многих случаях является эффективным заменителем металлической арматуры. В научно-исследовательских и инженерно-технических центрах Российской Федерации [1 – 3], Республики Беларусь [4 – 9] и ряда зарубежных стран [10 – 15] осуществляются исследования и разработки, направленные на создание строительной композитной арматуры. В основу разработок положены не только наиболее экономичные и ставшие уже традиционными стеклянные и базальтовые волокна [12, 13], но также создаются комбинированные

рованные (гибридные) композиты, включающие дополнительно высокомодульные углеродные, арамидные или металлические волокна [2, 9, 17 – 20]. Однако широкое использование таких материалов сдерживается рядом факторов, среди которых можно выделить недостаточную изученность работы под нагрузкой и механизмов разрушения конструктивных элементов комбинированной композитной арматуры (далее ККА), а также обусловленное этим несовершенство нормативно-правовой базы для назначения механических характеристик, методов контроля и испытания [16].

Проблема выбора высокомодульных волокон для создания ККА не является однозначно решенной. Теоретическая и экспериментальная база находятся в стадии становления. Многие вопросы механики разрушения и упрочняющего действия высокомодульных волокон изучены недостаточно. Имеющиеся экспериментальные данные противоречивы, что обусловлено влиянием не только состава композита и технологии получения образцов, но также и зависимостью результатов испытаний от метода испытаний и так называемого масштабного фактора (существенная зависимость свойств от размеров образцов). Применительно к таким материалам и методам испытаний корректно разделять теоретическую (структурно-механическую) прочность и измеренную (ослабленную условиями испытаний) прочность [8, 17].

Не в полной мере разработана нормативная база для производства, испытаний и применения строительной композитной арматуры.

Несмотря на кажущуюся простоту анализа, вопрос прогнозирования прочности комбинированных композитов до сих пор решен только в приближенной, оценочной постановке. Возможной причиной расхождения теоретических и экспериментальных результатов, наряду с масштабным фактором, обусловленным концентрацией напряжений в испытуемом образце вблизи захватов (отсутствие переходной зоны от стержня к крепежной муфте захвата) [8, 17], являются изгиб армирующих волокон при пропитке их полимерным связующим, а также технологическая химическая и термическая усадка связующего в процессе изготовления композита. Кроме того, различия деформационно-прочностных свойств основных (стеклянных, базальтовых) и высокомодульных (углеродных, металлических) волокон приводят к многостадийности процесса разрушения, проявлению эффекта «квасивязкости» даже для хрупких волокон, что также не разработано в должной мере.

Поэтому проблема выбора высокомодульных волокон, кроме экономической составляющей, также требует научного обоснования с позиций структурной механики.

Целью исследования является разработка методики и осуществление с ее помощью сравнительного структурно-механического анализа закономерностей разрушения комбинированной композитной арматуры при разрыве с учетом различий в механизмах деформирования и разрушения на примере основных видов высокомодульных волокон ведущих мировых и отечественных производителей.

Методика исследований.

Исследования закономерностей разрушения строительной композитной арматуры при разрыве производили в два этапа. На первом этапе производился

структурно-механический анализ особенностей деформирования и разрушения комбинированной композитной арматуры с выявлением предельных деформаций с позиций прочности наиболее хрупкого компонента (углеродного волокна) с учетом снижения прочности пучка волокон в сравнении с прочностью единичного волокна вследствие неизбежного разброса свойств и изгиба отдельных волокон в пучке (ровинге).

На втором этапе анализировали деформационно-прочностные свойства композита, у которого произошло разрушение более хрупкого волокна с учетом изменившегося механизма разрушения (расслаивание и растрескивание полимерного связующего).

Полученные теоретические результаты сравнивали с экспериментальными данными других исследователей, опубликованными в научно-технической литературе.

При теоретическом анализе исходили из того, что прочность хрупких материалов имеет значительный разброс, который может быть описан функцией распределения Вейбулла [10, 21]. Распределение прочности пучков (ровингов) хрупких волокон, к которым относятся и армирующие волокна для композитов (стеклянные, базальтовые, углеродные), также может быть описано этой функцией. Основной причиной рассматриваемого явления следует считать колебания длины волокон при производстве, обусловленные колебаниями размеров фильер в пределах допусков на их изготовление, а также локальными колебаниями температуры и реологических свойств расплава при вытяжке волокон. В связи с изложенным, прочность σ_p пучка волокон меньше средней прочности элементар-

ных волокон σ_f , причем отношение $\eta = \sigma_p / \sigma_f$ зависит от дисперсии (степени разброса) прочности волокон и от особенностей их укладки при производстве. Как правило, хрупкие и чувствительные к изгибу углеродные волокна имеют прочность пучка в пределах 50 – 65% от их средней прочности отдельных волокон, а для менее хрупких стеклянных это отношение составляет от 65% до 80% средней прочности волокон [10].

Одним из факторов, не учитываемым при использовании «правила смесей», является термическая и химическая усадка полимерного связующего при его отверждении и охлаждении. Вследствие этой усадки компоненты композита оказываются предварительно напряженными, причем волокна предварительно сжаты в радиальном и осевом направлении, а смола (связующее, матрица) – растянута. Анализ усадочных напряжений в полимерных композитах посвящен ряд работ [19, 20]. Однако применительно к композитной строительной арматуре этот фактор не исследован в необходимой мере. Сложность анализа состоит в том, что в композитах свободная усадка связующего ограничена влиянием волокон и сопровождается одновременно релаксационными явлениями. Не отрелаксировавшие в полимерном связующем напряжения снижают величину остаточной деформации под нагрузкой в сравнении со значениями, приведенными в таблице 1.

Таблица 1 – Свойства армирующих волокон для производства строительной композитной арматуры

Материал	Плотность, кг/м ³	Модуль упругости, ГПа	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительная деформация при разрыве, %
Волокна стеклянные и базальтовые				
Стеклянные тип E	2540	70	2200	3,1*
	2600	60	2000	3,0*
	2570	72,5	3300 – 3500	4,5 – 4,8*
	2560	73	3330	4,4
Стеклянные тип S	2490	80	2600	3,25*
	2470	88	4600	3,0 – 5,2
	2540	87	4300	4,9
Базальтовые	2700-2850	79-93	3000 – 3800	3,0 – 3,9*
Волокна арамидные				
Кевлар 49	1450	125	2800 – 3600	2,2 – 2,8
	1440	124	3620	2,9
Кевлар 29	1440	69	2900	4,4
	1440	58	3620	3,7
Волокна углеродные и графитовые				
Углеродные высокомодульные	1760	903	2700	0,3
	1760	647	2911	0,45
Волокна графитовые				
T300	1760	230	3530	1,5
T400H	1800	250	4410	1,8
T700S	1800	230	4900	2,1
T800H	1810	294	5490	1,9
T1000G	1800	294	6370	2,2
M40J	1770	377	4410	1,2
M60J	1940	588	3920	0,7
Графитизированные вискозные углеродные волокна производства ОАО «СветлогорскХимволокно»				
Урал (Т-Р; Т-1; М-4; ТР 3/2; Н), Карбопон -22	1400-1500	40-100	500-1200	1,2-1,25*

Примечание: * – значения, полученные на основании закона Гука как отношение разрушающих напряжений к модулю упругости материала при растяжении.

Значения, представленные в таблице 1, получены в результате обработки данных, представленных в научно-технической литературе [10, 22], а также в интернет-источниках на сайтах фирм-производителей.

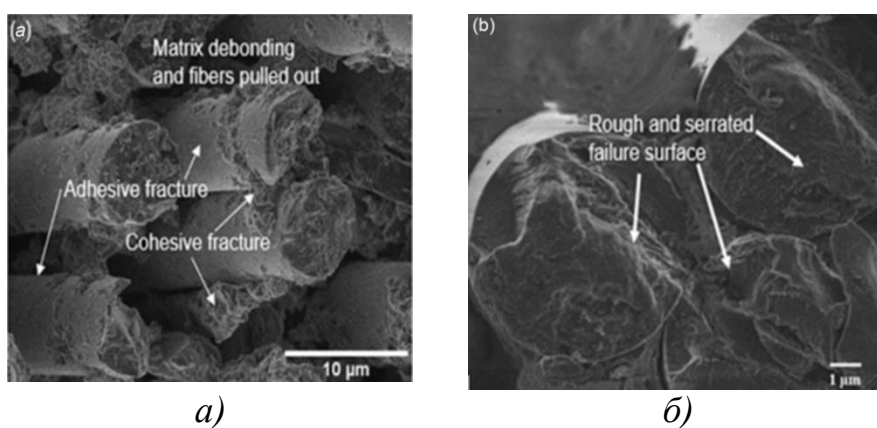
Из этого следует, что для армирующих волокон с повышенными значениями деформаций при разрыве возможно первоначальное разрушение связующего (матрицы) при не полностью исчерпанной прочности волокон.

В частности, применительно к стеклопластиковой и базальтопластиковой композитной арматуре в результате экспериментальных работ, выполненных лабораторией «НИИЖБ», ООО «АСП» и ООО «МБА-проект» и представленных в технических рекомендациях по применению неметаллической композитной арматуры периодического профиля в бетонных конструкциях (ТР 013-1-04, Москва,

2004) определено, что деформация при разрыве стеклопластиковой арматуры номинальным диаметром 5; 8 и 10 мм составляет 2,3% и не зависит от диаметра арматуры. Для базальтопластиковой арматуры тех же номинальных диаметров деформация при разрыве составила 2,5% и также не зависит от диаметра арматуры. К тому же СТБ 1103-98 «Арматура стеклопластиковая», который распространяется на арматуру стеклопластиковую диаметром 6 мм, предусматривает близкую величину контролируемого относительного удлинения – 2,7%.

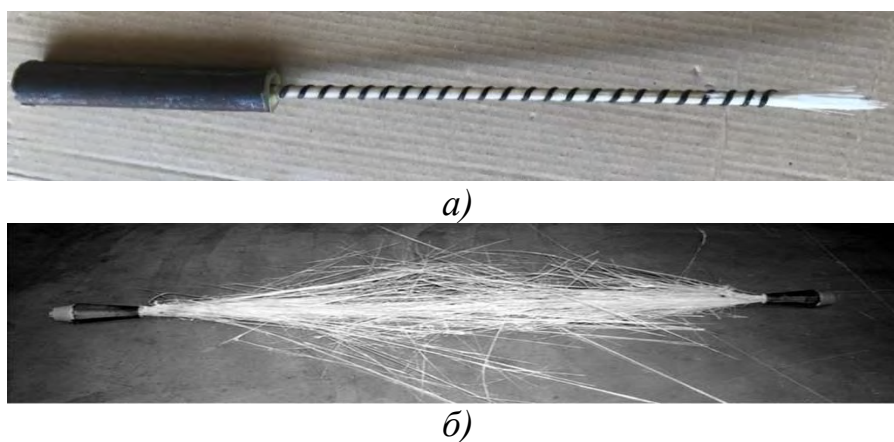
Все эти значения существенно меньше предельных, представленных в таблице 1 для выделенных жирным шрифтом марок стеклянных и базальтовых волокон, и указывают на возможность именно второго механизма разрушения.

В процессе экспериментальных исследований прочности образцов из композитной арматуры было установлено, что механизмы разрушения стеклопластиковой и углепластиковой арматуры различны. Для углепластиковых стержней характерен хрупкий разрыв с образованием рваной поверхности (рисунок 1).



*а) – характер разрушения смолы вблизи волокон; б) – разрушение волокон
Рисунок 1 – Поверхность разрыва углепластикового стержня*

У стеклопластиковой арматуры нет четко выраженной поверхности разрыва, а разрушение происходит с образованием «метелки» (рис. 2).



*а) – образец испытан в соответствии с ГОСТ 12004 [8],
б) – образец испытан в специальных зажимах, минимизирующих масштабный эффект концентрации напряжений*

Рисунок 2 – Общий вид образцов после разрушения стеклопластиковой арматуры

Структурно-механический анализ деформаций и разрушения комбинированной композитной арматуры при разрыве

При создании композитов исходят из того, что для получения максимальной прочности необходимо, чтобы материал имел высокое содержание волокон θ_f , а разрушение происходило вследствие разрыва волокон, а не матрицы [10]. Как правило, в композитной арматуре объемное содержание волокон составляет $\theta_f = 0,6 - 0,7$, так как при более высоком объемном содержании волокон не всегда обеспечивается увеличение прочности композита вследствие технологических сложностей качественной пропитки полимерным связующим ровингов и получения безпористого продукта.

При теоретическом анализе физико-механических свойств однонаправленных композитов обычно используют формулы, основанные на так называемом «правиле смесей», которые для модуля упругости и текущих значений напряжения в композитном стержне имеют следующий вид [10]:

$$E_c = E_{gf}\theta_{gf} + E_{af}\theta_{af} + E_m\theta_m \quad (1)$$

$$\sigma_c = \sigma_{gf}\theta_{gf} + \sigma_{af}\theta_{af} + \sigma_m\theta_m \quad (2)$$

где E_c , E_{gf} ; E_{af} , E_m – соответственно, модули упругости композита, стеклянного и дополнительного высокомодульного армирующего волокна, а также полимерного связующего (матрицы); θ_{gf} , θ_{af} , θ_m – соответственно, объемное содержание стеклянного и дополнительного высокомодульного армирующего волокна, а также связующего; σ_c , σ_{gf} , σ_{af} и σ_m – соответственно, напряжения в композите, стеклянном и дополнительном высокомодульном волокне и связующем.

Многочисленные эксперименты подтвердили, что формулы (1) и (2) дают хорошее согласование с практикой. Погрешность обычно не превышает 5%, что вполне приемлемо в технических расчетах [10].

Примем двухстадийную модель разрушения, для которой первая стадия соответствует совместной работе всех элементов композита, а вторая – работе без высокомодульных добавочных волокон, разрушившихся в конце первой стадии нагружения (рис. 3).

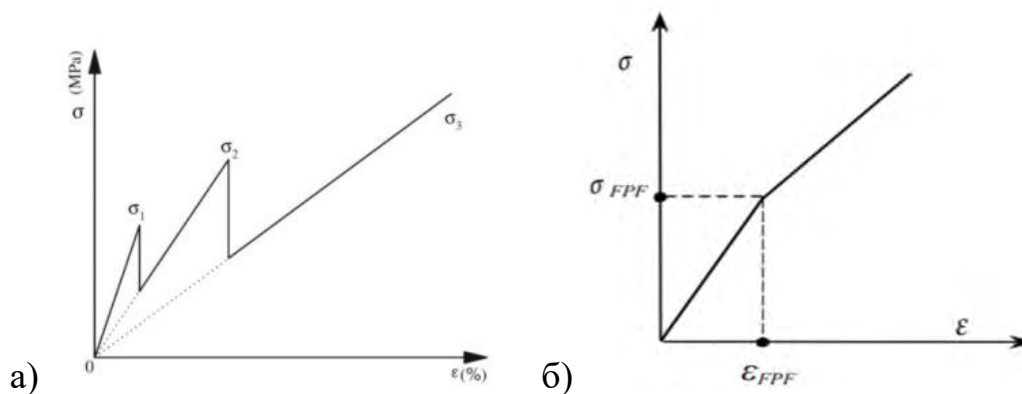


Рисунок 3 – Теоретические диаграммы деформирования трёхкомпонентного гибридного стержня с хрупкими (а) и пластичными (б) высокомодульными волокнами [12]

Применительно к прогнозированию модуля продольной упругости и напряжений в композите на второй стадии нагружения, после разрушения более хрупких высокомодульных волокон, «правило смесей» может быть записано в следующем виде:

$$E_c = E_{gf} \theta_{gf} + E_m \theta_m \quad (3)$$

$$\sigma_c = \sigma_{gf} \theta_{gf} + \sigma_m \theta_m \quad (4)$$

Определим возможную (ожидаемую) прочность композита при таком механизме разрушения. В соответствии с законом Гука, и учитывая, что деформации волокон и связующего к моменту разрушения композита равны ε_{bm} для взаимосвязи разрушающих напряжений в матрице σ_{bm} и деформаций можем записать:

$$\varepsilon_{bm} = \frac{\sigma_{gf}}{E_{gf}} = \frac{\sigma_{bm}}{E_m} \quad (5)$$

Напряжения в композите к моменту разрушения связующего на основании (3) будут описываться следующей зависимостью

$$\sigma_{ci} = \varepsilon_{bm} (E_{gf} \theta_{gf} + E_m \theta_m) \quad (6)$$

Формула (6) позволяет производить прогнозную оценку прочности однонаправленных волокнистых композитов по второму рассмотренному механизму на второй (заключительной) стадии разрушения.

Однако при использовании формул (4) и (6) следует учитывать также масштабный фактор, который заключается в снижении измеренной прочности композитной арматуры при увеличении ее диаметра.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты испытаний и структурно-механического анализа некоторых видов стеклопластиковой арматуры, производимой в Республике Беларусь, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты испытаний и структурно-механического анализа видов стеклопластиковой арматуры, производимой в Республике Беларусь

Наименование параметра	Марка арматуры		
	АКС 6	АКС 10	АКС 12
Номинальный диаметр, мм	6	10	12
Плотность, кг/м ³	2018	1980	1944
Массовое содержание связующего, %	19,3	18,63	19,25
Объемное содержание связующего, %	66,2	67,2	66,3
Расчетная деформация при разрыве, %	2,7*	2,3**	2,3**
Расчетный модуль упругости, МПа	49340	50040	49410

Примечания: * – принято в соответствии с СТБ 1103-98;

** – принято в соответствии с ТР 013-1-04 для стеклопластика.

При оценочных расчетах приняты следующие значения показателей механических свойств: модули упругости стеклянных волокон – 73 ГПа; полимерного связующего – 3ГПа.

Арамидные волокна из материала Кевлар 29 не рассматривали как высокомодульные, поскольку их модуль упругости ($E = 58 - 69$ ГПа) ниже модуля упругости стеклянных и базальтовых волокон.

В качестве суммарной объемной степени наполнения принято содержание волокон 68%, т.к. на практике (табл. 2) обычно более высокие степени наполнения трудно реализуемы вследствие сложностей пропитки пучков (ровингов) волокон полимерными связующими и связанной с этим опасностью появления дефектов в виде микропор [17].

В таблице 3 приведены результаты структурно-механического анализа по влиянию вида и объемного содержания высокомодульных волокон на продольный модуль упругости комбинированного стеклопластикового композита, а также результаты моделирования деформаций и разрушения комбинированных композитных стержней на основе стеклянных волокон с добавкой типовых представителей высокомодульных волокон в диапазоне содержания последних от 4 до 10% по объему.

Для сравнения принято, что расчетное значение модуля упругости однонаправленного стеклопластикового композита с объемным содержанием стеклянных волокон 68% составляет 50,6 ГПа, а расчетное значение предела прочности при деформации разрушения 2,7% составляет 1366,2 МПа.

Полученные в результате структурно-механического моделирования данные хорошо согласуются с требованиями стандарта СТБ 1103-98 «Арматура стеклопластиковая», который распространяется на арматуру стеклопластиковую диаметром 6 мм, предназначенную для армирования предварительно напряженных бетонных конструкций. В данном документе (с учетом внесенных изменений) описаны требования к механическим характеристикам арматуры: временное сопротивление разрыву должно быть не менее 1300 МПа, нормативное – не менее 1200 МПа, начальный модуль упругости – не менее 50 000 МПа, относительное удлинение – не менее 2,7%. При этом за нормативное сопротивление должно быть принято наименьшее контролируемое значение временного сопротивления разрыву, гарантируемое с обеспеченностью 0,98.

Таблица 3 – Влияние вида и объемного содержания высокомодульных волокон на продольный модуль упругости и разрушающие напряжения в стеклопластиковом стержне, усиленном высокомодульными волокнами

Тип высокомодульного волокна	Объемное содержание высокомодульного волокна, %	Модуль продольной упругости, ГПа		Разрушающие напряжения в композите, МПа	
		Первая фаза	Вторая фаза	Первая фаза	Вторая фаза*
Кевлар 49	4	52,64		1421,3	
	6	53,66		1448,8	
	8	54,68		1476,4	
	10	55,7		1503,9	
Углеродное высокомодульное (E = 903 ГПа)	4	83,8	47,68	125...150	1287
	6	100,4	46,22	150...180	1248
	8	117,0	44,76	175...210	1208
	10	133,6	44,3	200..240	1169
Графитовые Т300	4	56,88	47,68	437..523	1287
	6	60,02	46,22	461..553	1248
	8	63,16	44,76	485..582	1208
	10	66,3	44,3	509...611	1169

Продолжение таблицы 3

Графитовые T1000G	4	59,44	47,68	644...773	1287
	6	62,4	46,22	692..830	1248
	8	68,28	44,76	740...888	1208
	10	72,7	44,3	788...830	1169
Графитизированные вискозные углеродные волокна производства ОАО «СветлогорскХимволокно» (E = 100 ГПа)	4	51,68	47,68	310...372	1287
	6	52,22	46,22	313...376	1248
	8	52,76	44,76	317..379	1208
	10	53,3	44,3	320...384	1169

Из результатов структурно-механического анализа следует, что введение арамидных волокон из материала Кевлар 29 сопровождается незначительным увеличением модуля продольной упругости комбинированной композитной арматуры, не приводя к двухстадийной модели разрушения. В силу этого такие волокна недостаточно эффективны для создания комбинированной композитной арматуры.

Графитизированные вискозные углеродные волокна производства ОАО «СветлогорскХимволокно» также недостаточно эффективны, что обусловлено сравнительно низким модулем упругости, значительно уступающим высокомодульным и среднемодульным углеродным и графитовым волокнам ведущих мировых производителей. Кроме того, для комбинированной композитной арматуры с участием таких волокон характерно двухстадийное разрушение при сравнительно низких значениях критических напряжений, соответствующих границе первой фазы – разрушению более хрупких (углеродных) волокон.

Наиболее существенное увеличение модуля продольной упругости дает применение углеродных высокомодульных волокон. Однако вследствие их повышенной хрупкости первая фаза разрушения наблюдается при сравнительно низких напряжениях в композите (125...240 МПа). Учитывая высокую стоимость этих волокон и зависимость от импорта, их также можно считать малоперспективными для создания комбинированной композитной арматуры.

Графитовые волокна типа T300 (E = 230 ГПа) и T1000 G (E = 294 ГПа) являются менее хрупкими и позволяют заметно увеличить модуль упругости. При этом разрушающие напряжения для первой стадии разрыва (разрушение более хрупких волокон) составляют для T300 437 – 611 МПа в зависимости от рассмотренного содержания волокон, а для T1000 G 644 – 45 МПа.

Исследования показывают также, что в комбинированной композитной арматуре прочность базовых стеклянных волокон используется не в полной мере.

Например, для композита на основе стеклянных волокон типа E (модуль упругости 73 000 МПа) и эпоксидной смолы (E = 3000 МПа) деформация при разрушении составляет 2,7%. Расчетная структурно-механическая оценка дает ожидаемую прочность композита:

$$\sigma_{ct} = \varepsilon_{bm} (E_{gf} \theta_{gf} + E_m \theta_m) = 0,027 (73000 \cdot 0,68 + 300 \cdot 0,32) = 1366 \text{ МПа}$$

Напряжения в стеклянном волокне в момент разрушения композита:

$$\sigma_{fi} = \varepsilon_{bm} E_f = 0,027 \cdot 73000 = 1971 \text{ МПа}$$

Учитывая, что прочность стеклянных волокон составляет 3300 МПа, то из полученных данных следует, что в композите реализовано к моменту разрушения при испытаниях на разрыв только около 60% от прочности волокон.

Приведенный выше расчет является приближенным, поскольку модуль упругости смолы зависит от степени ее отверждения и характера укладки молекул в приповерхностном к волокнам слое. Однако влияние этого параметра на прочность композита незначительна. Основной вклад вносит деформация разрушения композита, увеличение которой следует рассматривать как перспективное направление для исследований и разработок.

Заключение

Выполнен сравнительный анализ механизмов разрушения при испытаниях на растяжение комбинированной композитной строительной арматуры. Результаты выполненных исследований позволили разработать комплексную методику расчетной оценки действия высокомодульных волокон при введении в комбинированную композитную арматуру, основанную на сравнительном структурно-механическом анализе механизмов и условий разрушения такой арматуры при растяжении. На примере нескольких групп высокомодульных волокон произведена расчетная оценка характерных точек диаграмм растяжения комбинированной композитной арматуры с определением теоретической прочности. Показано, что увеличение модуля упругости арматуры на первом этапе растяжения для многих видов высокомодульных волокон не сопровождается соответствующим увеличением прочности композита при испытаниях на разрыв.

Полученные результаты позволяют модернизировать методику прогнозной оценки прочности комбинированной композитной строительной арматуры и могут быть использованы предприятиями-изготовителями и потребителями такой арматуры, а также в учебном процессе при подготовке инженерных кадров строительного профиля.

Список цитированных источников

1. Степанова, В. Ф. Арматура композитная полимерная / В. Ф. Степанова, А. Ю. Степанов, Е. П. Жирков – М.: Бумажник, 2013. – 200 с.
2. Степанова, В. Ф. Гибридная композитная арматура с повышенным модулем упругости / В. Ф. Степанова, Д. А. Ильин, А. В. Бучкин // Естественные и технические науки. – 2014. – № 9–10. – С. 435 – 437.
3. Пронозин, Я. А. Применение неметаллических материалов в качестве основного армирования бетонных изгибаемых элементов. / Я. А. Пронозин, В. Ф. Бай, Ю. В. Зазуля, Р. В. Мельников // Промышленное и гражданское строительство. – 2009. – №7. – С. 60 – 61.
4. Ощепков, М. Ю. Союз науки и производства в белорусской индустрии композитов / М. Ю. Ощепков // Композитный мир. – 2018. – С. 34 – 41.
5. Садин, Э. Я. Анкеровка в бетоне стеклопластиковой арматуры, производимой в Республике Беларусь / Э. Я. Садин // Архитектура и строительство, 2016. – №3. – С. 68 – 71.
6. Садин, Э. Я. Расчетная оценка анкеровки в бетоне стеклопластиковой арматуры, производимой в Республике Беларусь / Э. Я. Садин // Наука и техника, 2016. – Т. 15, №4. – С. 308 – 314.
7. Барсуков, В.Г. Влияние арматуры из композитных материалов на положение нейтрального слоя при изгибе несимметрично армированных бетонных балок / В.Г. Барсуков, А.Р. Волик, А.А. Марук // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 6, Тэхніка. – 2019. – Т. 9. – № 1. – С. 116 – 125.

8. Волик, А.Р. Особенности испытаний на растяжение композитной арматуры /А.Р. Волик, С.А. Сазон, К.Ю. Чурило // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 6, Тэхніка. –2020. – Т. 10. – №1. – С. 110 – 118.
9. Талецкий, В. В. Увеличение модуля упругости стеклопластиковой арматуры / В. В. Талецкий // Вопросы внедрения норм проектирования и стандартов Европейского союза в области строительства. Материалы междунар. научн.-метод. семинара, Минск: БНТУ, 22 – 23.05.2013. – С. 130 – 136.
10. Мэттьюз, Ф. Композитные материалы: Механика и технология. Пер. с англ. /Ф. Меттьюз – М.: Техносфера, 2004. – 406 с.
11. Chaallal, O., Benmokrane, B. Fiber-reinforced plastic rebars for concrete applications. *Composites*, В 27(В), 1996. – P. 245 – 252.
12. He H, Li K, Gao F. Improvement of the bonding between carbon fibers and an epoxy matrix using a simple sizing process with a novolac resin. // *Construction and Building Materials*, 2016. – P. 87 – 92.
13. Bakis C.E., Nanni A., Terosky J.A. Self - monitoring, pseudo-ductile, hybrid FRP reinforcement rods for concrete applications. *Compos SciTechnol* 61, 2001. – P. 815 – 823.
14. Bunsell A.R, Harris B. Hybrid carbon and glass fiber composites. *Composites* 5, 1974. – P. 157 – 164.
15. Nanni A., Nenniger J.S., Ash K.D., Liu J. Experimental bond behavior of hybrid rods for concrete reinforcement. – *StructEngMech*, 5(4), 1997. – P. 339–353.
16. Barsukov, V., Volik, A., Sazon, S. Structural and Mechanical Aspect of Composite Reinforcement Strength //The 2020 International conference on building energy conservation, thermal safety and environmental pollution control (ICBTE 2020) October 29 – 30, 2020, Brest, Belarus E3S Web Conf. Volume 212, 2020 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021202002>.
17. Барсуков, В.Г. Влияние дефектов микроструктуры на свойства композитной строительной арматуры / В.Г. Барсуков, С.А. Сазон, Э.Г. Гнядек, А.Ю. Носко // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 6, Тэхніка. – 2021. – Т. 11. – №2. – С. 102 – 111.
18. Ставров, В.П. Механика композитных материалов - Мн.: БГТУ, 1996. – 165 с.
19. Барсуков, В.Г. Расчетная оценка термоупругих напряжений в окрестностях волокнистых и дисперсных наполнителей в композитах на основе фторопластов /В. Г. Барсуков, Ю. М. Даль, Р. А. Лубовская, В. В. Барсуков // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 6, Тэхніка.– 2015. –№2 – С. 6 – 13.
20. Влияние химической усадки связующего в процессе отверждения на образование остаточных напряжений в цилиндрических оболочках из композита / Ю. В. Василевич [и др.] // Теоретическая и прикладная механика: международный научно-технический сборник. – Вып. 31. – 2016. – С. 67 – 72.
21. Ставров, В. П. Механика композитных материалов – Мн.: БГТУ, 1996. – 165 с.
22. Кенько, В. М. Неметаллические материалы и методы их обработки / В. М. Кенько. – Минск: Дизайн ПРО, 1998. – 240 с.
23. Миненков, Б. В. Прочность деталей из пластмасс / Б. В. Миненков, И. С. Стасенко – М.: Машиностроение, 1977. – 264 с.

References

1. Stepanova, V. F. Armatura kompozitnaia polimernaia / V. F. Stepanova, A. Iu. Stepanov, E. P. Zhirkov – M.: Bumazhnik, 2013. – 200 s.
2. Stepanova, V. F. Gibridnaia kompozitnaia armatura s povyshennym modulem upru-gosti / V. F. Stepanova, D. A. Il'in, A. V. Buchkin // Estestvennye i tekhnicheskie nauki. – 2014. – № 9–10. – S. 435 – 437.
3. Pronozin, Ia. A. Primenenie nemetallicheskih materialov v kachestve osnovnogo armirovaniia betonnykh izgibaemykh elementov. / Ia. A. Pronozin, V. F. Bai, Iu. V. Zazulia, R. V. Mel'nikov // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2009. – №7. – S. 60 – 61.
4. Oshchepkov, M. YU. Soyuz nauki i proizvodstva v belorusskoj industrii kompozitov / M. YU. Oshchepkov // Kompozitnyj mir. – 2018. – S. 34 – 41.
5. Oshchepkov, M. Iu. Soiuz nauki i proizvodstva v belorusskoj industrii kompozitov / M. Iu. Oshchepkov // Kompozitnyi mir. – 2018. – S. 34 – 41.
6. Sadin, E. Ia. Ankerovka v betone stekloplastikovoi armatury, proizvodimoi v Respublike Belarus' / E. Ia. Sadin // Arkhitektura i stroitel'stvo, 2016. – №3. – S. 68 – 71.
7. Sadin, E. Ia. Raschetnaia otsenka ankerovki v betone stekloplastikovoi armatury, proizvodi-moi v Respublike Belarus' /E. Ia. Sadin // Nauka i tekhnika, 2016. – T. 15, №4. – S. 308 – 314.
8. Barsukov, V.G. Vliianie armatury iz kompozitnykh materialov na polozhenie neitral'nogo sloia pri izgibe nesimmetrichno armirovannykh betonnykh balok / V.G. Barsukov, A.R. Volik, A.A. Maruk // Vesnik GrDU imia Ianki Kupaly. Ser. 6, Tekhnika. – 2019. – T. 9. – № 1. – S. 116 – 125.
9. Volik, A.R. Osobennosti ispytaniia na rastiazhenie kompozitnoi armatury /A.R. Volik, S.A. Sazon, K.Iu. Churilo // Vesnik GrDU imia Ianki Kupaly. Ser. 6, Tekhnika. – 2020. – T. 10. – №1. – S. 110 – 118.
10. Taletskii, V. V. Uvelichenie modul'ia uprugosti stekloplastikovoi armatury / V. V. Taletskii // Voprosy vnedreniia norm proektirovaniia i standartov Evropeiskogo soiuzna v oblasti stroitel'stva. Materialy mezhdunar. nauchn.-metod. seminar, Minsk: BNTU, 22 – 23.05.2013. – S. 130 – 136.
11. Mett'iuiz, F. Kompozitnye materialy: Mekhanika i tekhnologiya. Per. s angl. / F. Mett'iuiz – M.: Tekhnosfera, 2004. – 406 s.
12. Chaallal, O., Benmokrane, B. Fiber-reinforced plastic rebars for concrete applications. Composites, B 27(B), 1996. – R. 245 – 252.
13. He H, Li K, Gao F. Improvement of the bonding between carbon fibers and an epoxy matrix using a simple sizing process with a novolac resin. // Construction and Building Materials, 2016. – R. 87 – 92.
14. Bakis C.E., Nanni A., Terosky J.A. Self - monitoring, pseudo-ductile, hybrid FRP reinforcement rods for concrete applications. Compos SciTechnol 61, 2001. – R. 815 – 823.
15. Bunsell A.R, Harris B. Hybrid carbon and glass fiber composites. Composites 5, 1974. – R. 157 – 164.
16. Nanni A., Nenniger J.S., Ash K.D., Liu J. Experimental bond behavior of hybrid rods for concrete reinforcement. – StructEngMech, 5(4), 1997. – R. 339–353.
17. Barsukov, V., Volik, A., Sazon, S. Structural and Mechanical Aspect of Composite Reinforcement Strength //The 2020 International conference on building energy

conservation, thermal safety and environmental pollution control (ICBTE 2020) October 29 – 30, 2020, Brest, Belarus E3S Web Conf. Volume 212, 2020 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021202002>.

18. Barsukov, V.G. Vliianie defektov mikrostruktury na svoistva kompozitnoi stroitel'noi armatury / V.G. Barsukov, S.A. Sazon, E.G. Gniadek, A.Iu. Nosko // Vesnik GrDU imia Ianki Kupaly. Ser. 6, Tekhnika. – 2021. – T. 11. – №2. – S. 102 – 111.

19. Stavrov, V.P. Mekhanika kompozitnykh materialov - Mn.: BGTU, 1996. – 165 s.

20. Barsukov, V.G. Raschetnaia otsenka termouprugikh napriazhenii v okrestnostiakh volok-nistykh i dispersnykh napolnitelei v kompozitakh na osnove ftoroplastov /V. G. Barsukov, Iu. M. Dal', R. A. Lubovskaia, V. V. Barsukov // Vesnik GrDU imia Ianki Kupaly. Ser. 6, Tekhnika.– 2015. –№2 – S. 6 – 13.

21. Vliianie khimicheskoi usadki sviazuiushchego v protsesse otverzheniia na obrazovanie ostatochnykh napriazhenii v tsilindricheskikh obolochkakh iz kompozita / Iu. V. Vasi-levich [i dr.] // Teoreticheskaiia i prikladnaia mekhanika: mezhdunarodnyi nauchno-tekhnicheskii sbornik. – Vyp. 31. – 2016. – S. 67 – 72.

22. Stavrov, V. P. Mekhanika kompozitnykh materialov – Mn.: BGTU, 1996. – 165 s.

23. Ken'ko, V. M. Nemetallicheskie materialy i metody ikh obrabotki / V. M. Ken'ko. – Minsk: Dizain PRO, 1998. – 240 s.

24. Minenkov, B. V. Prochnost' detalei iz plastmass / B. V. Minenkov, I. S. Stasenko – M.: Mashinostrenie, 1977. – 264 s.

UDC 624.012

FULL CONNECTED NEURAL-NETWORK FOR SIMULATION OF EXTANTION IN SELF-STRESSED MONOLITIC SLABS ON GROUND

Zheltkovich A. E.¹, Molosh V. V.², Parchotz K.G.³, Saveiko N.G.⁴, Yuan Jinbin⁵, Zhenhao Jiang⁶, Zheng Haoyuan⁷

¹Ass. Prof, PhD, Ass. Prof, Brest State Technical University, Belarus, e-mail: gelpek@mail.ru

²Ass. Prof, PhD, Ass. Prof, Brest State Technical University, Belarus, e-mail: m.vic@rambler.ru

³Programmer engineer, Belarus, e-mail: konstantinparhoc@gmail.com

⁴Programmer engineer, Belarus, e-mail: nick-2009@live.ru

⁴ Postgraduate, Belarusian National Technical University, Belarus, e-mail: jinbinyuan@gmail.com

⁶ Postgraduate, School of Data Science, The Chinese University of Hong Kong in Shenzhen, China, e-mail: 222041010@link.cuhk.edu.cn

⁷ Postgraduates, Dalian University of Technology-Belarusian State University Joint Institute, China-Belarus, e-mail: 879777236@qq.com

Abstract

In this article the strategy of interdisciplinary convergence of mechanics and artificial intelligence is illustrated. The article presents the results of calculating displacements in self-stressed monolithic slabs on ground obtained using a trained fully connected neural network. The empirical results of displacements in slabs on ground, displacements calculated according to the physicomechanical model, and obtained using