

УДК 691.175.3

Прогнозирование значений предела прочности при растяжении и модуля упругости композитной арматуры большого диаметра по косвенным признакам

Е. Р. Богданова, А. В. Бенин

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Богданова Е. Р., Бенин А. В. Прогнозирование значений предела прочности при растяжении и модуля упругости композитной арматуры большого диаметра по косвенным признакам // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 3. — С. 673–684. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-673-684

Аннотация

Цель: Рассмотреть проблемы, связанные с экспериментальным определением упруго-прочностных свойств композитной полимерной стеклопластиковой арматуры больших диаметров. Проанализировать состояние вопроса, провести обзор имеющихся методов определения упругих и прочностных характеристик композитной арматуры. Показать необходимость разработки методики прогнозирования упругих и прочностных свойств композитной полимерной арматуры большого диаметра с использованием методов косвенного измерения. Провести серию испытаний АКП на осевое растяжение и рассчитать значения упруго-прочностных характеристик, используя правило смеси для композитных материалов. Произвести сопоставительный анализ данных, полученных экспериментальными и аналитическими методами. **Методы:** Сравнительный анализ расчетных значений упруго-прочностных характеристик композитной арматуры с экспериментальными данными. **Результаты:** Указана необходимость совершенствования существующей нормативной методики определения упруго-прочностных характеристик стержней композитной арматуры. Установлены расчетные формулы, позволяющие произвести аналитический прогноз предела прочности и модуля упругости композитной стеклопластиковой арматуры. Произведена верификация полученных расчетных данных. Выявлена необходимость в проведении дополнительных испытаний с целью наработки статистической базы данных. **Практическая значимость:** Предложенная методика косвенного измерения характеристик композитной арматуры может быть рекомендована к дальнейшей экспериментальной апробации с целью снижения риска получения некорректных значений упруго-прочностных характеристик композитной полимерной арматуры большого диаметра при постановке прямого эксперимента.

Ключевые слова: Композитная арматура, прочностные свойства, анизотропия АКП, правило смеси, экспериментальные исследования, испытания на осевое растяжение.

Введение

Постановлением Правительства РФ от 23 декабря 2021 г. № 2425 в единый перечень продукции, подлежащей обязательной сертификации, была внесена композитная полимерная арматура (АКП), которая до сегодняшнего времени по ряду

причин не нашла широкого применения в практике строительства на территории РФ. В России процесс внедрения неметаллической арматуры идет более медленными темпами, чем за рубежом. Массовое производство композитной полимерной арматуры (АКП) в России было органи-

зовано только с 2008 года. Среди отечественных производителей АКП можно отметить ООО «Композит Групп Челябинск» (г. Челябинск), ООО «Бийский завод стеклопластиков» (г. Бийск, Алтайский край), ООО «Пласт-Композит» (г. Санкт-Петербург), ООО «КомАР» (г. Сарапул, Удмуртская республика), ООО «ПолиКомпозит» (г. Псков) и другие.

Разработка и введение большого числа нормативно-технической документации, регламентирующей применение АКП на территории РФ [1–8], привели к усовершенствованию технологий производства арматуры данного типа, увеличению спроса на композитную арматуру, росту объема производства АКП, а также расширению номенклатуры выпускаемых стержней. Активное наращивание объемов производства АКП стимулирует научно-исследовательскую деятельность по изучению физико-механических свойств неметаллической арматуры, особенностей ее совместной работы с бетоном и оптимальной области ее применения в строительстве. Значительный вклад в развитие данного направления внесли как отечественные, так и зарубежные исследователи: А. А. Гвоздев, Н. П. Фролов, В. Ф. Степанова, А. В. Бучкин, В. Г. Хозин, А. Н. Блазнов, А. Н. Луговой, Брахим Бенмокрэйн, Б. Брик, В. Франк, Р. Н. Кришна. Следует отметить, что в нашей стране одними из первых интерес к композитной арматуре проявили сотрудники испытательной лаборатории ЛИИЖТа, проведя в 1967 году серию сравнительных экспериментов [9]. Композитная арматура, благодаря ряду своих специфических физико-химических свойств (высокая коррозионная стойкость, антимагнитные и диэлектрические свойства) может найти широкое применение там, где использование стальной арматуры недопустимо или нецелесообразно. Но в то же время массовое применение композитной арматуры сдерживается ее основными недостатками, главными из которых являются низкий

модуль упругости и, как следствие, повышенная деформативность армоконструкции при изгибе, низкая теплостойкость, несвариваемость, существенные трудности при анкеровке, «старение» эпоксидных и полиэфирных матриц с течением времени под действием ультрафиолетовых лучей.

Многочисленные экспериментальные данные из литературных источников [10–13] подтверждают перспективность применения АКП и необходимость проведения дальнейших исследований в этой области с целью расширения возможностей применения данного строительного материала при армировании конструкций.

Необходимым условием создания надежного сооружения является получение достоверной и полной информации о механических характеристиках применяемых строительных материалов. В связи с чем исследователям новых строительных материалов необходимы методы точного определения истинных значений механических характеристик. В то же время производителям для подтверждения и контроля качества выпускаемой продукции также нужны быстроспроизводимые и высокоточные методы, позволяющие определять механические характеристики материала. Зачастую темпы разработки новых материалов опережают темпы внедрения методов их испытаний. Так, существующие методы определения упругих и прочностных характеристик композитных материалов разработаны для исследования гомогенных материалов с изотропными свойствами и не всегда позволяют достаточно точно оценить требуемые характеристики анизотропных материалов. В связи с тем, что композитная арматура относится к волокнистым композитам, отличительной особенностью которых является анизотропия свойств, то способность композитного стержня арматуры воспринимать поперечные нагрузки крайне мала. Недостаточная сопротивляемость АКП действию поперечных сил приводит к дополнительным трудно-

стям при экспериментальном определении ее механических свойств, особенно композитных стержней большого диаметра [14, 15]. Необходимость дополнительного изготовления специальных концевых муфт на испытываемом стержне АКП, либо при малых диаметрах стержня до 8 мм применение специализированных захватов с регулируемой силой обжатия образца, приводит к увеличению трудозатрат и сроков испытания, а также к существенному удорожанию самого испытания в целом. На сегодняшний день большое число отечественных и зарубежных ученых занимаются вопросами анкеровки АКП и разработкой специальной оснастки для ее испытаний [16–22].

Высокая статическая неоднородность экспериментальных значений прочности композитных стержней арматуры, получаемых при испытаниях на растяжение, обусловлена несовершенством нормативного метода испытания. Зачастую в ходе проведения испытаний происходит влияние зажимов испытательной машины и оснастки на результат испытаний: в этом случае происходит либо разрушение образцов в зоне действия захватов, либо проскальзывание образца. Все это свидетельствует о необходимости разработки методики, позволяющей либо проводить информативные и краткосрочные испытания, либо прогнозировать упруго-прочностные свойства образцов материалов с выраженными анизотропными свойствами. В качестве альтернативного метода осевому растяжению с целью определения упруго-прочностных характеристик композитных материалов ряд исследователей [23–25] рекомендует использовать испытания на продольный изгиб. Другим коллективом авторов [26] рассматривается прогнозирование свойств композитных материалов, находящихся под действием растягивающих усилий, с помощью сопоставления кривых напряжение — деформация волокна с аналогичными кривыми матрицы. При этом

кривая напряжение — деформация композитного материала должна будет располагаться между отдельными кривыми деформации армирующего волокна и матрицы.

В данной статье рассматривается возможность использования метода косвенного измерения прочностных и упругих свойств композитных стержней арматуры большого диаметра, таких как предел прочности и модуль упругости.

Цель

Определение упруго-прочностных свойств композитных стержней арматуры диаметром более 16 мм методом осевого растяжения согласно ГОСТ 32492—2015 предполагает изготовление в средней части образца участка местного ослабления в виде шейки, в отличие от стандартного образца. При этом возрастают как трудозатраты по изготовлению испытательного образца, так и стоимость проведения испытания в целом. С другой стороны, использование стандартного образца для больших диаметров композитной арматуры требует заливки муфт большой длины и толщины с целью исключения разрушения образца или путем среза (рис. 1) навивки или разрушением самой муфты, что не дает возможности определить истинные прочностные характеристики. Также следует отметить, что в соответствии с ГОСТ 31938—2022 «Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Общие технические условия» максимальный диаметр АКП, на который распространяется его действие, составляет 22 мм.

ГОСТ 31938—2022 «Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Общие технические условия» кроме упруго-прочностных характеристик АКП нормирует также процентное содержание непрерывного армирующего волокна в матрице [4], которое должно быть не менее 80 %. При этом экспериментальное определение массовых долей



Рис. 1. Срез навивки на испытанном образце

ТАБЛИЦА 1. Результаты испытаний

Показатель	Значение по ГОСТ, не менее	Диаметр арматуры					
		5 мм	8 мм	10 мм	18 мм	26 мм	32 мм
Номинальный диаметр d , мм	—	5,18	8,21	10,21	17,51	232	32,64
Массовая доля волокна ω_a , %	80	78,94	79,80	80,41	81,96	80,40	81,60
Предел прочности σ , МПа	800	1200	1060	1054	1004	Данные в ходе испытания не получены	
Модуль упругости E , ГПа	50	52,80	50,01	50,65	52,49	50,80*	51,20*

* — значения начального модуля упругости получены с использованием данных о нагрузке, составляющей 20 % от разрушающей.

наполнителя и матрицы в композите не требует длительной пробоподготовки и легко воспроизводимо. А полученные значения массовых долей волокна и матрицы композита могут быть использованы для прогнозирования его упруго-прочностных свойств.

В данной работе обоснована возможность прогнозирования упруго-прочностных свойств АКП большого диаметра с использованием данных, полученных методом косвенных измерений, к которым относятся изначальное определение массовых долей компонентов композитной арматуры и последующий расчет искомых характеристик.

Прямые измерения.

Постановка эксперимента

Согласно ГОСТ 32486—2021 «Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Методы определения струк-

турных характеристик» массовое содержание волокна определяется методом сжигания образца в муфельной печи при температуре 625 °С, дальнейшем взвешивании массы образца до и после сжигания и нахождении разницы между полученными массами. Номинальный диаметр образцов определен методом гидростатического взвешивания, для получения экспериментальных значений предела прочности и модуля упругости образцов были проведены испытания на осевое растяжение [1, 2].

Для испытания использовались стержни стеклопластиковой арматуры номинальным диаметром 5, 8, 10, 18, 26 и 32 мм. Часть данных была получена при испытаниях в ИЛ «Механическая лаборатория им. проф. Н. А. Белелюбского» ПГУПС, а другая часть — в ходе анализа литературных источников [15]. Сводные данные представлены в табличной форме (табл. 1).

Косвенные измерения

При расчете модуля упругости структурно неоднородного материала опираясь на правило смеси для композитных материалов, согласно которому некоторая характеристика композита описывается суммой характеристик компонентов с учетом их объемных долей [27], можно получить наибольшие (в приближениях Фойгта (1)) и наименьшие (в приближениях Рейсса (2)) значения модулей упругости и произвести дальнейшее построение и оценку вилки Хилла [28]:

$$E = \frac{V_A}{V_A + V_M} E_A + \frac{V_M}{V_A + V_M} E_M \quad (1)$$

$$\frac{1}{E} = \frac{V_A}{V_A + V_M} \frac{1}{E_A} + \frac{V_M}{V_A + V_M} \frac{1}{E_M}, \quad (2)$$

где V_M , E_M — объем и модуль упругости матрицы;
 V_A , E_A — объем и модуль упругости армирующего наполнителя.

Формулы (1) и (2) могут быть выражены через объемные доли компонентов композита по формуле (3):

$$E = v_a E_a + v_m E_m. \quad (3)$$

ТАБЛИЦА 2. Характеристики компонентов АКП

Показатель	Наполнитель (стекловолокно)		Матрица (ПЭТФ)
	Тип E	Тип S	
Плотность, г/см ³	2,54	2,40–2,58	1,38–1,40
Прочность элементарного волокна, МПа	3500	4600–4900	—
Модуль упругости, ГПа	73	82–93	2,5–3
Прочность смолы на растяжение, МПа	—	—	40–140
Удлинение до разрыва, %	4,8	5,4	4

ТАБЛИЦА 3. Результаты расчета объемных долей

Показатель	Диаметр арматуры					
	5 мм	8 мм	10 мм	18 мм	26 мм	32 мм
Номинальный диаметр d , мм	5,18	8,21	10,21	17,51	26,32	32,64
Объемная доля волокна v_a , %	67,66	67,80	69,62	70,90	69,61	71,23

$$\frac{1}{\hat{A}} = v_a \frac{1}{E_a} + v_m \frac{1}{E_m}. \quad (4)$$

Объемная доля армирующего стекловолокна в композите определяется по формуле (5):

$$v_a = \frac{V_a}{V} = \frac{\omega_a \rho_m}{\omega_a \rho_m + \omega_m \rho_a}, \quad (5)$$

где V — общий объем композита;

ω_a , ω_m — массовые доли волокна и матрицы в композите,

ρ_a , ρ_m — плотность волокна и матрицы в композите.

В табл. 2 представлены характеристики матрицы и волокна, заявленные производителями АКП.

По результатам расчета верхней и нижней границ модуля Юнга построены графики зависимости $E = f(v_a)$ (рис. 2). Отдельно на графике (рис. 3) нанесены значения модуля упругости, полученные в результате испытания на осевое растяжение (табл. 1), с учетом рассчитанных значений объемных долей армирующего волокна (табл. 3), с целью проведения верификации расчетных данных.

Из полученного графика (рис. 2) можно сделать вывод о том, что рассмотренная методика,

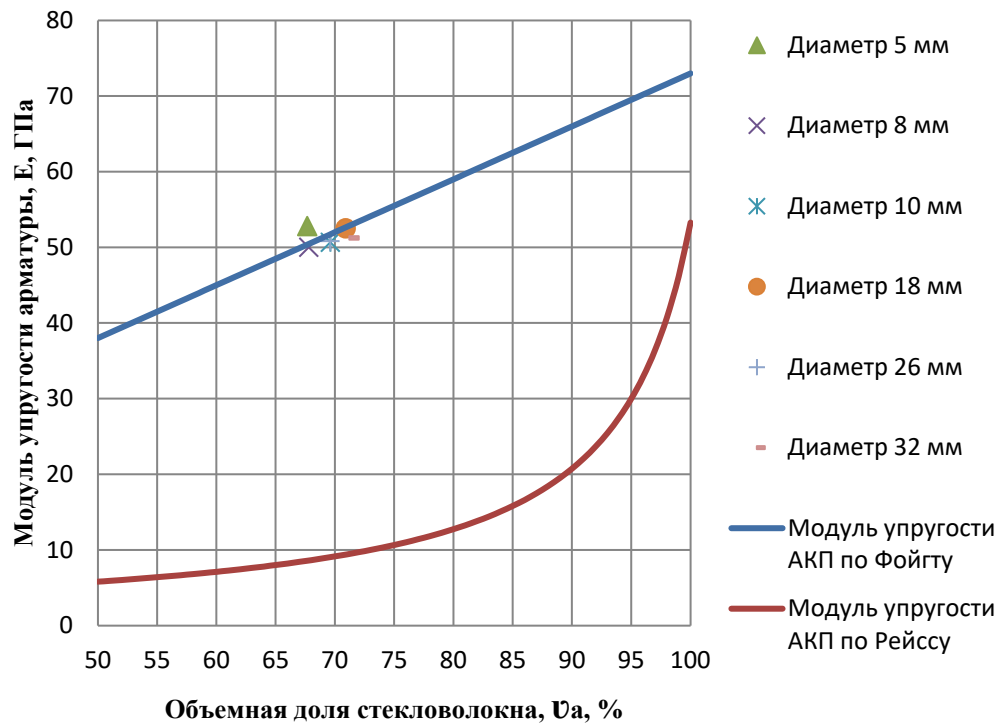


Рис. 2. График зависимости модуля упругости АКП от объемной доли армирующего материала

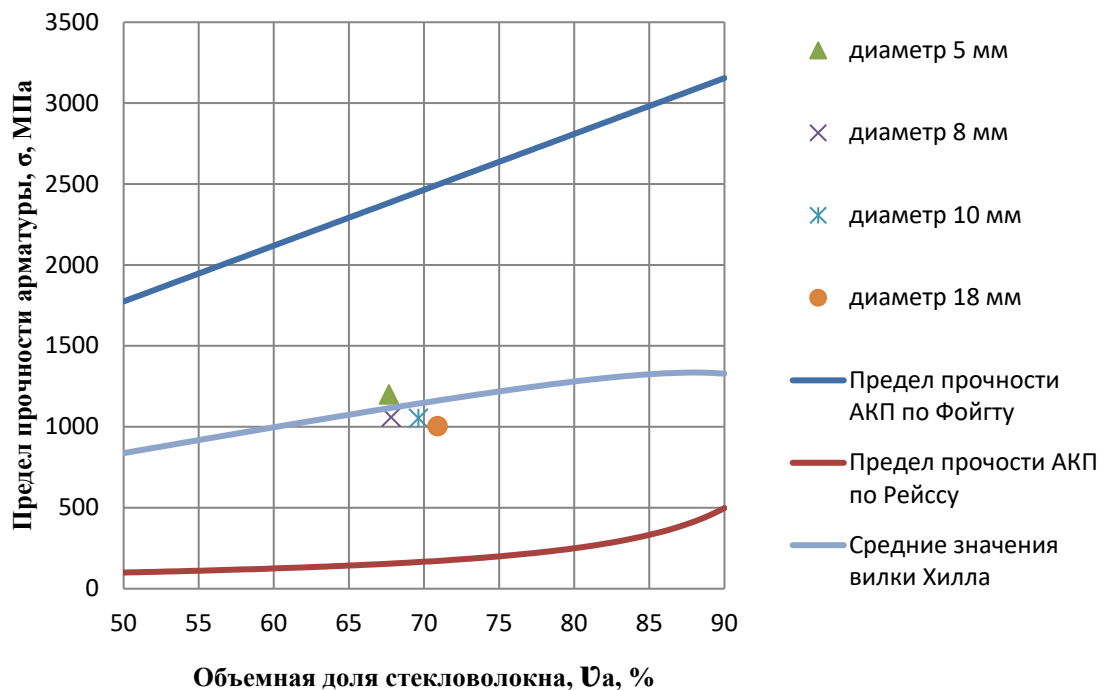


Рис. 3. График зависимости предела прочности АКП от объемной доли армирующего материала

основанная на использовании оценки значений модуля упругости путем построения вилки Хилла, по верхней границе (формула Фойгта (1))

позволяет получить корректные значения, эквивалентные данным, полученным при постановке прямого эксперимента.

Аналогичные формулы можно составить для расчета верхней и нижней границ предела прочности:

$$\sigma = \nu_a \sigma_a + \nu_m \sigma_m . \quad (6)$$

$$\frac{1}{\sigma} = \nu_a \frac{1}{\sigma_a} + \nu_m \frac{1}{\sigma_m} . \quad (7)$$

По результатам расчета верхней и нижней границ предела прочности на растяжение для АКП построены графики зависимости $\sigma = f(\nu_a)$ (рис. 3).

На графике (рис. 3) видны значительные отклонения расчетных данных от данных экспериментов. Значения прочности АКП, полученные экспериментальными методами, оказываются меньше рассчитанных по правилу смеси (6) значений. Микроструктурные особенности процесса разрушения АКП, а также особенности технологии ее производства не позволяют получить значения предела прочности АКП аналитическим методом. На графике (рис. 3) прослеживается распределение экспериментальных значений предела прочности по кривой средних значений вилки Хилла.

Выводы

1. Расчет модуля упругости в приближениях Фойгта позволяет получить корректные значения, эквивалентные данным, полученным при постановке прямого эксперимента.

2. Расчетные значений предела прочности АКП укладываются в вилку Хилла, при этом прослеживается распределение экспериментальных значений предела прочности по кривой средних значений вилки Хилла.

3. Предложенная методика косвенного измерения характеристик композитной арматуры может быть рекомендована к дальнейшей экспериментальной апробации — с целью снижения риска получения некорректных значений упруго-прочностных характеристик композитной полимерной арматуры большого диаметра при постановке прямого эксперимента.

Библиографический список

1. ГОСТ 31938—2022. Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Общие технические условия. — Утв. Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии № 444-ст от 1 июня 2022 г. — М.: Российский институт стандартизации, 2022. — 20 с.

2. ГОСТ 32492—2015. Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Методы определения физико-механических характеристик. — Утв. Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии № 2198-ст от 24 декабря 2015 г. — М.: Стандартиформ, 2016. — 17 с.

3. ГОСТ 32487—2015. Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Методы определения характеристик стойкости к агрессивным средам. — Утв. Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии № 2197-ст от 24 декабря 2015 г. — М.: Стандартиформ, 2016. — 8 с.

4. ГОСТ 32486—2021. Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Методы определения структурных характеристик. — Утв. Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии № 2196-ст от 24 декабря 2015 г. — М.: Стандартиформ, 2016. — 20 с.

5. СП 405.1325800.2018. Конструкции бетонные с неметаллической фиброй и полимерной арматурой. Правила проектирования. — Утв. Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 24 декабря 2018 г. № 850/пр. — М.: Стандартиформ, 2019. — 24 с.

6. СП 164.1325800.2014. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. Правила проектирования. — Утв. Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 8 августа 2014 г. № 452/пр. — М.: Стандартиформ, 2015. — 47 с.

7. ТР 013-1-14. Применение композитной арматуры. Технические рекомендации по применению неметаллической арматуры в бетонных конструкциях. — Утв. НИИЖБ — М., 2004. — 5 с.

8. СТО 83269053-001—2010. Применение в транспортном строительстве неметаллической композитной арматуры периодического профиля. — Утв. ООО НПФ «УралСпецАрматура». — Пермь, 2010. — 58 с.
9. Филин А. П. Исследование работы элементов конструкций, армированных неметаллической арматурой / А. П. Филин, Я. Е. Иохельсон, П. Е. Александров и др. — Л.: Институт инженеров железнодорожного транспорта, 1967. — 59 с.
10. Малбиев С. А. Полмеры в строительстве: учеб. пособие для вузов / С. А. Малбиев, В. К. Горшков, П. Б. Разговоров. — М.: Высшая школа, 2008. — 455 с.
11. Фролов Н. П. Стеклопластиковая арматура и стеклопластбетонные конструкции / Н. П. Фролов. — М.: Стройиздат, 1980. — 104 с.
12. Завгороднев А. В. Перспективы применения композитной арматуры в морском гидротехническом строительстве / А. В. Завгороднев, А. М. Уманский, А. Т. Беккер и др. // Горный информационный бюллетень (научно-технический журнал). — 2014. — № 54-9. — С. 137–148.
13. Селезнев В. А. Эксплуатационные характеристики полимерной композитной арматуры / В. А. Селезнев, В. А. Какуша, В. А. Ушков и др. // Промышленное и гражданское строительство. — 2021. — № 1. — С. 42–50.
14. Бенин А. В. Особенности испытаний композитной полимерной арматуры / А. В. Бенин, С. Г. Семенов // Промышленное и гражданское строительство. — 2014. — № 9. — С. 42–46.
15. Волик А. Р. Особенности испытаний на растяжение композитной арматуры / А. Р. Волик, С. А. Сазон, К. Ю. Чурило // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Сер. 6. Тэхніка. — 2020. — Т. 10. — № 1. — С. 110–118.
16. Садин Э. Я. Анкеровка в бетоне стеклопластиковой арматуры, производимой в Республике Беларусь / Э. Я. Садин // Архитектура и строительство. — 2016. — № 3. — С. 68–71.
17. Фролов Н. В. К вопросу об испытании стержневой полимеркомпозитной арматуры на осевое растяжение / Н. В. Фролов, М. А. Полоз, Е. Г. Колесникова // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. — 2016. — № 11. — С. 74–77.
18. Анкерное устройство для композитной арматуры: пат. 109172 Российская Федерация: МПК Е 04 С 5/12 / В. Н. Николаев, В. В. Николаев; заявл. 12.05.2011; опубл. 10.10.2011, Бюл. № 28.
19. Анкер стержня стеклопластиковой арматуры: пат. 2032044 Российская Федерация: МПК Е 04 С 5/12 / В. Е. Казаринов; заявл. 13.01.1992; опубл. 27.03.1995.
20. Способ образования анкерного устройства композитной арматуры и анкерное устройство: пат. 2776854 Российская Федерация: МПК Е 02 D 5/74 / Х. А. Джантимиров, П. Х. Джантимиров, Е. А. Дудукалова и др.; заявл. 16.11.2021; опубл. 27.07.2022, Бюл. № 21.
21. Устройство для анкерования композитной арматуры: пат. 2755614 Российская Федерация: МПК Е 04 С 5/12 / Д-К. Г. Накашидзе, Б. В. Накашидзе, П. Б. Березин; заявл. 24.02.2021; опубл. 17.09.2021, Бюл. № 26.
22. Способ контроля прочности стержня композитной арматуры и устройство для его осуществления: пат. 2709597 Российская Федерация: МПК G 01 N 3/12. G 01 N 3/24 / С. А. Пушкарев, Ф. А. Уразбахтин, Р. Ш. Низамов и др.; заявл. 14.11.2018; опубл. 18.12.2019, Бюл. № 35.
23. Хорохордин А. Ю. Совершенствование методики анализа механических испытаний стеклопластиковой арматуры / А. Ю. Хорохордин, В. А. Абанин, М. Ю. Локтев и др. // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности: материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием. ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», Бийский технологический институт (филиал). — 2015. — С. 150–154.
24. Селяев В. П. Исследование свойств волокнистых композитов методом продольного изгиба / В. П. Селяев, П. В. Селяев, М. Ф. Алимов и др. // Региональная архитектура и строительство. — 2014. — № 2. — С. 5–15.
25. Луговой А. Н. Исследование механических характеристик однонаправленно армированного стеклопластика методом продольного изгиба: специальность 05.02.01 — Материаловедение в машиностроении: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / А. Н. Луговой; ООО «Бийский завод стеклопластиков». — Барнаул, 2005. — С. 23–24.

26. Пащенко А. А. Армирование неорганических вяжущих веществ минеральными волокнами / А. А. Пащенко, В. Л. Сербии, А. Л. Паславская и др. — М.: Стройиздат, 1988. — 200 с.

27. Мэттьюз Ф. Композитные материалы: Механика и технология / Ф. Мэттьюз, Р. Ролингс; пер. с англ. С. Л. Баженова. — М.: Техносфера, 2004. — 406 с.

28. Победря Б. Е. Механика композиционных материалов / Б. Е. Победря. — М.: Моск. ун-т, 1984. — 336 с.

Дата поступления: 25.07.2023

Решение о публикации: 13.08.2023

Контактная информация:

БОГДАНОВА Екатерина Романовна — аспирант;
univer006@mail.ru

БЕНИН Андрей Владимирович — канд. техн. наук, доц.;
benin.andrey@mail.ru

Forecasting Ultimate Tensile Strength and Elastic Modulus Values of Large-Diameter Composite Rebar Using Indirect Indicators

E. R. Bogdanova, A. V. Benin

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Bogdanova E. R., Benin A. V. Forecasting Ultimate Tensile Strength and Elastic Modulus Values of Large-Diameter Composite Rebar Using Indirect Indicators // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 3, pp. 673–684. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-673-684

Summary

Purpose: To consider the problems of experimental determination of elastic and strength properties of large-diameter composite polymer glass fiber reinforced plastic rebar (FRP-rebar). To analyze the state of the issue, to make an overview of existing methods for determining elastic and strength properties of FRP-rebar. To show the necessity of developing methods of predicting the large-diameter FRP-rebar elastic and strength properties by means of indirect measurement methods. To carry out a series of tensile tests of FRP-rebar and to calculate the elastic-strength characteristics values using the rule of mixtures for composite materials. To make a comparative study of data obtained by experimental and analytical methods. **Methods:** Comparative analysis of the FRP-rebar elastic-strength characteristics calculated values with experimental data. **Results:** The need to improve the existing regulatory method for determining the elastic-strength characteristics of composite reinforcement bars is indicated. Calculation formulas of analytical prediction of the ultimate tensile strength and elastic modulus of FRP-rebar have been established. The calculated values obtained have been verified. The need of additional tests to build a statistical database has been identified. **Practical significance:** The proposed method for indirect measurement of FRP-rebar properties can be recommended for further experimental testing to reduce the risk of obtaining error values of elastic and strength characteristics of large-diameter FRP-rebar when conducting direct experiments.

Keywords: Fiber reinforced plastic rebar (FRP-rebar), strength properties, FRP-rebar anisotropic properties, the rule of mixtures, experimental studies, axial tensile tests.

References

1. GOST 31938—2022. *Armaturnaya kompozitnaya polimernaya dlya armirovaniya betonnykh konstrukcij. Obshchie tekhnicheskie usloviya. Utv. Federal'nym agentstvom po*

tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii № 444-st ot 1 iyunya 2022 g. [GOST 31938—2022. Composite polymer reinforcement for reinforcement of concrete structures. General Specifications. Approved Federal Agency for

Technical Regulation and Metrology № 444-st dated June 1, 2022]. Moscow: Russian Institute of Standardization Publ., 2022, 20 p. (In Russian)

2. *GOST 32492—2015. Armatura kompozitnaya polimernaya dlya armirovaniya betonnyh konstrukcij. Metody opredeleniya fiziko-mekhanicheskikh harakteristik. Utv. Federal'nym agentstvom po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii № 2198-st ot 24 dekabrya 2015 g.* [GOST 32492—2015. Composite polymer reinforcement for reinforcement of concrete structures. Methods of determination of physical and mechanical characteristics. Approved Federal Agency for Technical Regulation and Metrology No. 2198-st of December 24, 2015]. Moscow: Russian Institute of Standardization Publ., 2016, 17 p. (In Russian)

3. *GOST 32487—2015. Armatura kompozitnaya polimernaya dlya armirovaniya betonnyh konstrukcij. Metody opredeleniya harakteristik stojkosti k agressivnym sredam. Utv. Federal'nym agentstvom po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii № 2197-st ot 24 dekabrya 2015 g.* [GOST 32487—2015. Composite polymer reinforcement for reinforcement of concrete structures. Methods for Determining Resistance to Aggressive Environments. Approved Federal Agency for Technical Regulation and Metrology № 2197-st of December 24, 2015]. Moscow: Russian Institute of Standardization Publ., 2016, 8 p. (In Russian)

4. *GOST 32486—2021. Armatura kompozitnaya polimernaya dlya armirovaniya betonnyh konstrukcij. Metody opredeleniya strukturnyh harakteristik. Utv. Federal'nym agentstvom po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii № 2196-st ot 24 dekabrya 2015 g.* [GOST 32486—2021. Composite polymer reinforcement for reinforcement of concrete structures. Structural Characterization Methods. Approved Federal Agency for Technical Regulation and Metrology № 2196-st of December 24, 2015]. Moscow: Russian Institute of Standardization Publ., 2016, 20 p. (In Russian)

5. *SP 405.1325800.2018. Konstrukcii betonnye s nemetallicheskoj fibroj i polimernoj armaturoj. Pravila proektirovaniya. Utv. Ministerstvom stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo khozyaystva Rossiyskoj Federatsii ot*

24 dekabrya 2018 g. № 850/pr [SP 405.1325800.2018. Concrete structures with non-metallic fiber and polymer reinforcement. Design rules. Approved. Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated December 24, 2018 № 850/pr]. Moscow: Russian Institute of Standardization Publ., 2019, 24 p. (In Russian)

6. *SP 164.1325800.2014. Usilenie zhelezobetonnyh konstrukcij kompozitnymi materialami. Pravila proektirovaniya. Utv. Ministerstvom stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo khozyaystva Rossiyskoj Federatsii ot 8 avgusta 2014 g. № 452/pr* [SP 164.1325800.2014. Reinforcement of reinforced concrete structures with composite materials. Design rules. Approved. Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated August 8, 2014 № 452/pr]. Moscow: Russian Institute of Standardization Publ., 2015, 47 p. (In Russian)

7. *TR 013-1-14. Primenenie kompozitnoj armatury. Tekhnicheskie rekomendacii po primeneniyu nemetallicheskoj armatury v betonnyh konstrukciyah. Utv. NIIZHB* [Technical regulation 013-1-14. Use of composite reinforcement. Technical recommendations for the use of non-metallic reinforcement in concrete structures. Approved NIIZHB]. Moscow, 2004, 5 p. (In Russian)

8. *STO 83269053-001—2010. Primenenie v transportnom stroitel'stve nemetallicheskoj kompozitnoj armatury periodicheskogo profilya. Utv. OOO NPF "UralSpec-Armatura"* [Standart of organization Use of non-metallic composite reinforcement of periodic profile in transport construction. Appr. by OOO NPF UralSpetsRebar]. Perm, 2010, 58 p. (In Russian)

9. Filin A. P., Iohel'son Ya. E., Aleksandrov P. E. et al. *Issledovanie raboty elementov konstrukcij, armirovannyh nemetallicheskoj armaturoj* [Study of the operation of structural elements reinforced with non-metallic reinforcement]. Leningrad: Institut inzhenerov zheleznodorozhnogo transporta Publ., 1967, 59 p. (In Russian)

10. Malbiev S. A., Gorshkov V. K., Razgovorov P. B. *Polmery v stroitel'stve: ucheb. posobie dlya vuzov* [Polymers in construction: textbook for universities]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 2008, 455 p. (In Russian)

11. Frolov N. P. *Stekloplastikovaya armatura i stekloplastbetonnye konstrukcii* [Fiberglass rebars and fiberglass structures]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1980, 104 p. (In Russian)
12. Zavgorodnev A. V., Umanskij A. M., Bekker A. T. et al. Perspektivy primeneniya kompozitnoj armatury v morskoy gidrotekhnicheskoy stroitel'stve [Prospects of FRP bars application marine hydraulic construction]. *Gornyy informatsionnyy byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)* [Mining information bulletin (scientific and technical journal)]. 2014, Iss. 54(9), pp. 137–148. (In Russian)
13. Seleznev V. A., Kakusha V. A., Ushkov V. A. et al. Ekspluatatsionnye karakteristiki polimernoy kompozitnoj armatury [Performance characteristics of polymer composite reinforcement]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and civil engineering]. 2021, Iss. 1, pp. 42–50. (In Russian)
14. Benin A. V., Semenov S. G. Osobennosti ispytaniy kompozitnoy polimernoy armatury [Features of testing composite polymer reinforcement]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo* [Industrial and civil engineering]. 2014, Iss. 9, pp. 42–46. (In Russian)
15. Volik A. R., Sazon S. A., Churilo K. Yu. Osobennosti ispytaniy na rastyazhenie kompozitnoj armatury [Features of tensile testing composite polymer reinforcement]. *Vestnik Grodnenskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Yanki Kupaly* [Bulletin of Grodno State University named after Yanka Kupala]. Ser. 6. Tekhnika [Technique]. 2020, vol. 10, Iss. 1, pp. 110–118. (In Russian)
16. Sadin E. Ya. Ankerovka v betone stekloplastikoy armatury, proizvodimoy v Respublike Belarus' [Anchoring in concrete of fiberglass reinforcement made in the Republic of Belarus]. *Arhitektura i stroitel'stvo* [Architecture and engineering]. 2016, Iss. 3, pp. 68–71. (In Russian)
17. Frolov N. V., Poloz M. A., Kolesnikova E. G. K voprosu ob ispytanii sterzhnevoj polimerkompozitnoj armatury na osevoe rastyazhenie [Research of the polymer composite reinforcement test under axial loading]. *Vestnik BGTU im. V. G. Shuhova* [Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov]. 2016, Iss. 11, pp. 74–77. (In Russian)
18. Nikolaev V. N., Nikolaev V. V. *Ankernoe ustroystvo dlya kompozitnoy armatury* [Anchor device for composite reinforcement]. Patent RF, no. 109172, 2011. (In Russian)
19. Kazarinov V. E. *Anker sterzhnya stekloplastikoy armatury* [Anchor of the fiberglass reinforcement rod]. Patent RF, no. 2032044, 1995. (In Russian)
20. Dzhantimirov Kh. A., Dzhantimirov P. Kh., Dudukalova E. A. et al. *Sposob obrazovaniya ankernogo ustroystva kompozitnoy armatury i ankernoe ustroystvo* [Method for the formation of an anchor device for composite reinforcement and an anchor device]. Patent RF, no. 2776854, 2022. (In Russian)
21. Nakashidze D-K. G., Nakashidze B. V., Berezin P. B. *Ustroystvo dlya ankerovki kompozitnoy armatury* [Device for anchoring composite reinforcement]. Patent RF, no. 2755614, 2021. (In Russian)
22. Pushkarev S. A., Urazbakhtin F. A., Nizamov R. Sh. et al. *Sposob kontrolya prochnosti sterzhnya kompozitnoy armatury i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [A method for controlling the strength of a composite reinforcement bar and a device for its implementation]. Patent RF, no. 2709597, 2019. (In Russian)
23. Horohordin A. Yu., Abanin V. A., Loktev M. Yu. et al. Sovershenstvovanie metodiki analiza mekhanicheskikh ispytaniy stekloplastikoy armatury [Improving the method of analysis of mechanical testing of fiberglass reinforcement]. *Tekhnologii i oborudovanie khimicheskoy, biotekhnologicheskoy i pishchevoy promyshlennosti: materialy VIII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh s mezhdunarodnym uchastiem. FGBOU VPO "Altayskiy gosudarstvennyy tekhnicheskij universitet im. I. I. Polzunova", Biyskiy tekhnologicheskij institut (filial)* [Technologies and equipment of the chemical, biotechnological and food industry: materials of the VIII All-Russian scientific-practical conference of students, graduate students and young scientists with international participation. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "Altai State Technical University named after I. I. Polzunova", Biysk Technological Institute (branch)]. 2015, pp. 150–154. (In Russian)

24. Selyaev V. P., Selyaev P. V., Alimov M. F. et al. *Issledovanie svoystv voloknistykh kompozitov metodom prodol'nogo izgiba* [Investigation of the properties of fibrous composites by the method of longitudinal bending]. *Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo* [Regional architecture and construction]. 2014, Iss. 2, pp. 5–15. (In Russian)
25. Lugovoj A. N. *Issledovanie mekhanicheskikh harakteristik odnonapravlenno armirovannogo stekloplastika metodom prodol'nogo izgiba: avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk* [Study of the mechanical characteristics of unidirectional reinforced fiberglass using the flexure method. Dissertation abstract for the degree of candidate of technical sciences]. Barnaul, Publ., 2005, 24 p. (In Russian)
26. Pashchenko A. A., Serbii V. L., Paslavskaya A. A. et al. *Armirovanie neorganicheskikh vyazhushchih veshchestv mineral'nymi voloknami* [Reinforcement of inorganic binders with mineral fibers]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1988, 200 p. (In Russian)
27. Matthews F., Rawlings R. *Kompozitnye materialy: Mekhanika i tekhnologiya* [Composite materials: Engineering and Science]. Moscow: Technosfera Publ., 2004, 406 p. (In Russian)
28. Pobedrya B. E. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov* [Mechanics of composite materials]. Moscow: Mosk. un-t Publ., 1984, 336 p. (In Russian)

Received: July 25, 2023

Accepted: August 13, 2023

Author's information:

Ekaterina R. BOGDANOVA — Postgraduate Student;
univer006@mail.ru

Andrey V. BENIN — PhD in Engineering, Associate
Professor; benin.andrey@mail.ru