

DOI: 10.12737/22315

Меркулов С.И., чл.-корр. РААСН, д-р техн. наук, проф.  
Курский государственный университет  
Есипов С.М., аспирант  
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНОЙ ФИБРЫ ПРИ ОДНООСНОМ РАСТЯЖЕНИИ

pgs@kursksu.ru

В данной статье представлен метод оценки прочности анизотропной однонаправленной углеволоконной ткани при растяжении в плоскости ориентации волокон. Экспериментально изучены принципы деформирования и разрушения образцов ткани, оценена прочность ткани при наличии и отсутствии пропитки эпоксидной смолой, построены диаграммы работы образцов углекомпозиата под нагрузкой. Приведена методология исследования, технология подготовки и особенности экспериментальных образцов. Задачей исследования является выявление применимости углеволокна для усиления потерявших прочность растянутых зон железобетонных элементов, а также установление его физико-механических параметров.

**Ключевые слова:** Железобетонные конструкции, растяжение, прочность, деформативность, композиционные материалы, углеволокно, фибра, ламинат, усиление конструкций

Композитные материалы широко применяются при усилении эксплуатируемых железобетонных конструкций. В работах [7, 9] выполнен анализ и определены направления применения неметаллической композитной арматуры для усиления железобетонных конструкций, сформулированы основные задачи исследований и развития теории расчета данного класса конструкций. Показано, что основной задачей является проведение экспериментально-теоретических исследований по нормированию характеристик композитных материалов, по оценке сцепления композитных материалов с бетоном усиливаемых конструкций. При усилении железобетонных конструкций методом внешнего армирования наиболее эффективно применение углеродных волокон, которые обладают высокой прочностью на растяжение и высоким модулем упругости. В основном усиление железобетонных конструкций с применением композитов выполняется "мокрым" способом. Способ заключается в послойном наклеивании на поверхность элемента холстов или лент из углеволокна при помощи адгезивных составов или эпоксидных смол с пропиткой каждого слоя. В документах по проектированию усиления железобетонных конструкций композитной арматурой приспособлены положения нормативных документов по проектированию усиления железобетонных конструкций методами увеличения сечения [1, 20, 21].

Так как растягивающие усилия перераспределяются на внешнее армирование, то от механических характеристик композита, в частности - армирующего элемента, т.е. волокон в полной мере зависит несущая способность усиленного элемента. Из этого следует, что для

корректного проектирования и выбора материалов усиления железобетонных элементов необходимо получить достоверную информацию о прочности и деформативности композита при работе на растяжение. Для этого необходимо использовать экспериментальные методы, т.к. аналитические методы описания напряженно-деформированного состояния любого композитного материала сложны и оперируют большим количеством независимых переменных.

Используя опыт описания теории силового сопротивления усиленных железобетонных конструкций [8], можно сказать, что существенное влияние на прочность при растяжении имеет структура композитного материала. Испытания на растяжение образцов композитов на основе стекло- и углефибры имеют особенности и отличаются механизмами разрушения при идентичных условиях нагружения образцов из конструкционных или арматурных сталей. Высокая степень анизотропии и неоднородности, а также отсутствие пластических деформаций углепластика создают трудности при обработке экспериментальных данных и получении объективных характеристик даже при случае одноосного растяжения [2, 4, 5]. Для корректности испытаний необходимым условием является наличие однородного поля деформаций. В композитах принцип Сен-Венана обуславливает расширение зон действия краевого эффекта, что, в свою очередь, диктует необходимость увеличения длины образцов [6, 7].

В рамках программы комплексных экспериментальных исследований усиленных железобетонных конструкций внешним армированием композитными материалами. Выполнены экспериментальные исследования физико-

механических характеристик углеволоконного ламината производства ООО «Конкритстрой», использованного для усиления опытных железобетонных элементов. Для определения механических характеристик углеволоконного ламината испытывали контрольные образцы (полосы) размерами 75×700 мм. Испытания выполнены в соответствии с ГОСТ 25.601-80. Для анкеровки в клиновых захватах испытательной машины WEW-600D образцы снабжаются наклад-

ками из фольгированного текстолита. Схема установки тензометрического оборудования показана на рис. 1. Продольные и поперечные деформации измеряли тензорезисторами КФ5П1 и экстензометрами ИДН-10-50. Испытаны однослойные однонаправленные образцы без пропитки связующим (образец 1а) и контрольный образец с пропиткой эпоксидным связующим (образцы 1б, 2а-2е). Внешний вид опытных образцов показан на рис. 2.

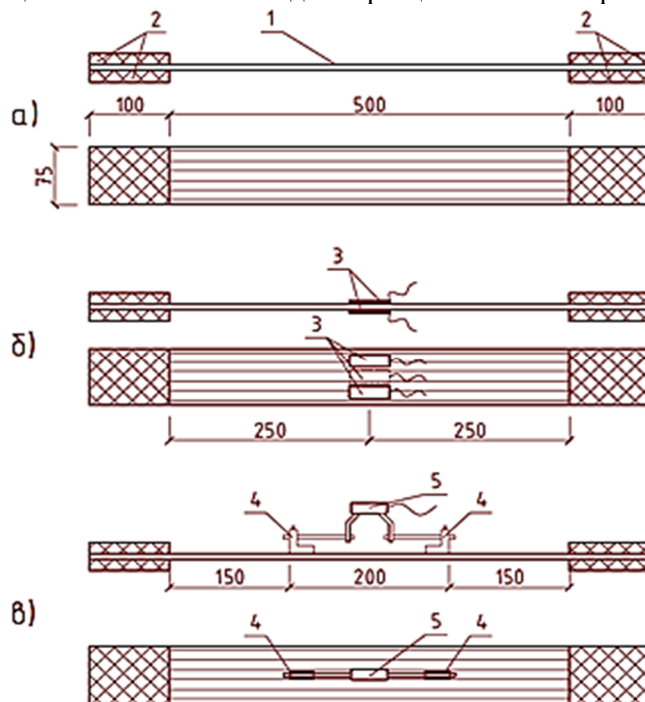


Рис. 1. Эскиз образца для испытаний (а), схема расположения тензодатчиков (б), схема расположения экстензометра (в): 1 – полоса однонаправленного волокна; 2 – текстолитовая накладка; 3 – тензорезистор; 4 – опорный столик экстензометра; 5 – измеритель продольной деформации ИДН-10-50

Испытания образцов проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 25.601-80 и включали:

- испытание до разрушения образца без пропитки связующим (образец 1а);
- испытание образца с пропиткой эпоксидным связующим (образец 1б) для калибровки разрывной машины, для проверки работоспособности опорных накладок и средств измере-

ния, а также для отработки методики нагружения образцов в испытательной машине;

- испытание образцы 2а-2е для определения прочностных и деформативных характеристик углеволоконных ламинат с пропиткой эпоксидным связующим. Образцы нагружались со скоростью 0.1 кН/с до 50 % разрушающей нагрузки для определения модуля упругости, после чего каждый образец был доведен до разрушения.

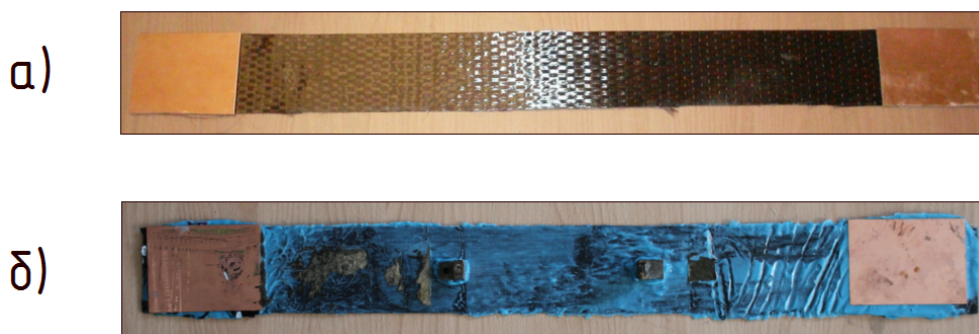


Рис. 2. Внешний вид подготовленных для испытаний образцов: непропитанный (а), пропитанный (ламинат) (б).

В ходе проведенных испытаний, были получены следующие результаты:

1. Образец 1а деформировался линейно и разрушился (см. рис. 4) при нагрузке в 14.74 кН. Характер разрушения - лавинообразный выход из строя отдельных волокон. Стоит выделить, что продольные деформации по длине образца неоднородны, наибольшие значения оказались в средней трети длины, припорные участки не показали приращения деформаций.

2. Образец 1б продемонстрировал высокую точность установки образцов и соосность приложения нагрузки. Показатели относительной продольной деформации составили:  $\varepsilon_1 = 0.353\%$ ,  $\varepsilon_2 = 0.346\%$ ,  $\varepsilon_3 = 0.347\%$ . Пользуясь формулами (1, 2), имеем:

$$\frac{\varepsilon_3 - \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2}}{\varepsilon_3} = \frac{0.347 - \frac{0.353 + 0.346}{2}}{0.347} = 0.006 \leq 0.02;$$

$$\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{0.353 - 0.346}{0.353} = 0.0198 \leq 0.02$$

С точки зрения работы под нагрузкой, образец показал схожие с образцами 2-ой серии результаты.

3. Образцы 2а-2е показали схожесть процессов деформирования и разрушения между собой (см. рис. 4). Деформирование происходило абсолютно упруго, эффекта гистерезиса не наблюдалось. При нагрузке  $P_{п.т.} = (0.75 \div 0.85)P_{разр}$  образовывается продольная трещина, соосная с продольной осью образца и проходящая между волокнами. Площадь поперечного сечения при этом остается неизменной. Длина и ширина раскрытия трещины возрастает с увеличением нагрузки, однако, прекращается при нагрузке  $P_{п.т.} = (0.9 \div 0.92)P_{разр}$ . Образец разрушается хрупко, от разрыва воло-

кон в нескольких поперечных сечениях. Проскальзывания в опорных частях не происходит. Численные показатели нагрузки и деформации в пределах одной серии достаточно однородны (табл. 1). Физико-механические параметры были определены согласно формулам (3, 4, 5).

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где  $\Delta l$  – абсолютное удлинение расчетной длины образца при растяжении, мм;  $l$  – начальная расчетная длина образца, мм.

$$\sigma_b = \frac{P_{разр}}{A}, \quad (4)$$

где  $P_{разр}$  – разрушающая нагрузка, кН;  $A$  – площадь поперечного сечения, см<sup>2</sup>.

$$E = \frac{\Delta F}{A \cdot \Delta \varepsilon_{11}}, \quad (5)$$

где  $\Delta F$  – приращение нагрузки, кН;  $\Delta \varepsilon_{11}$  – приращение относительной продольной деформации при приращении нагрузки на  $\Delta F$ , мм.

4. Средняя по серии №1 величина расчетного усилия растяжения при удлинении 0.6% составила 11.55 кН. Средняя по серии №2 величина расчетного усилия растяжения при удлинении 0.6% составила 11.91 кН. Номинальное паспортное значение, приведенное производителем материала ООО «Конкритстрой» – 11.25 кН.

5. Величины исправленных результатов измерений нагрузки и деформаций подчиняются закону нормального распределения. Систематических погрешностей выявлено не было. Статистическая оценка величины предела прочности при растяжении составила 2820 МПа, модуля упругости при растяжении – 276 000 МПа.

Таблица 1

### Физико-механические характеристики образцов углеволоконного ламината при испытании на растяжение

Номер образца	Разрушающая нагрузка $P_{разр}$ , кН	Абсолютное удлинение при разрушении $\Delta l$ , мм	Относительная продольная деформация при разрушении $\varepsilon$ , %	Предел прочности при растяжении $\sigma_b$ , МПа	Модуль упругости при растяжении $E$ , МПа
1а	14.74	9.45	1.89	1911.58	101 114
1б	21.98	4.985	0.999	2850.8	279 585
2а	22.67	5.07	1.014	2940.3	286 900
2б	20.28	5.055	1.011	2630.35	259 400
2в	21.5	4.875	0.975	2788.58	285 343
2г	21.78	5.12	1.025	2824.58	275 568
2д	21.96	5.14	1.028	2847.92	277 035
2е	21.72	5.24	1.048	2816.79	268 777

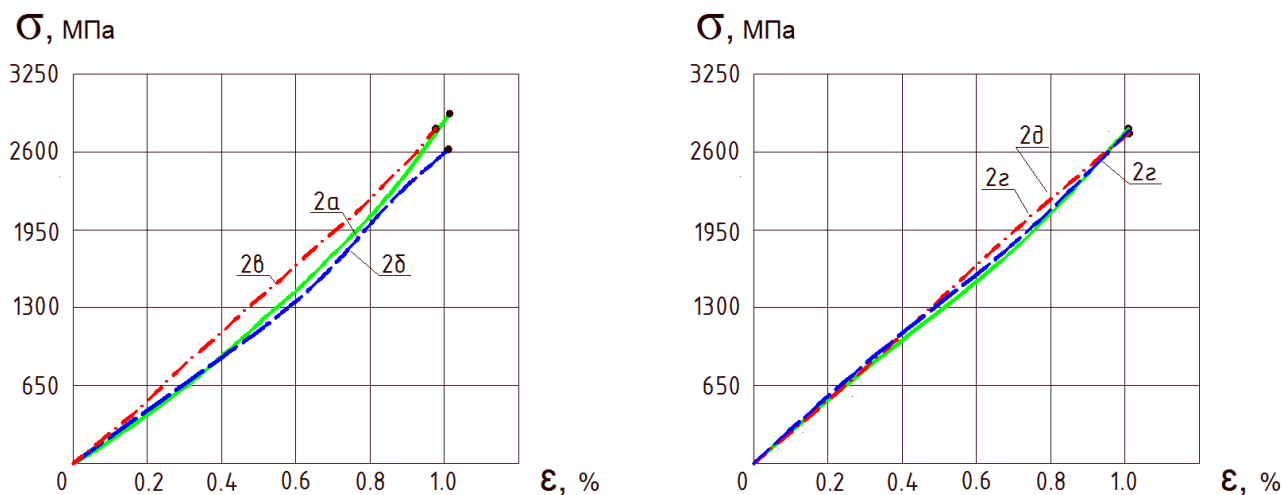


Рис. 3. Диаграммы работы образцов под нагрузкой

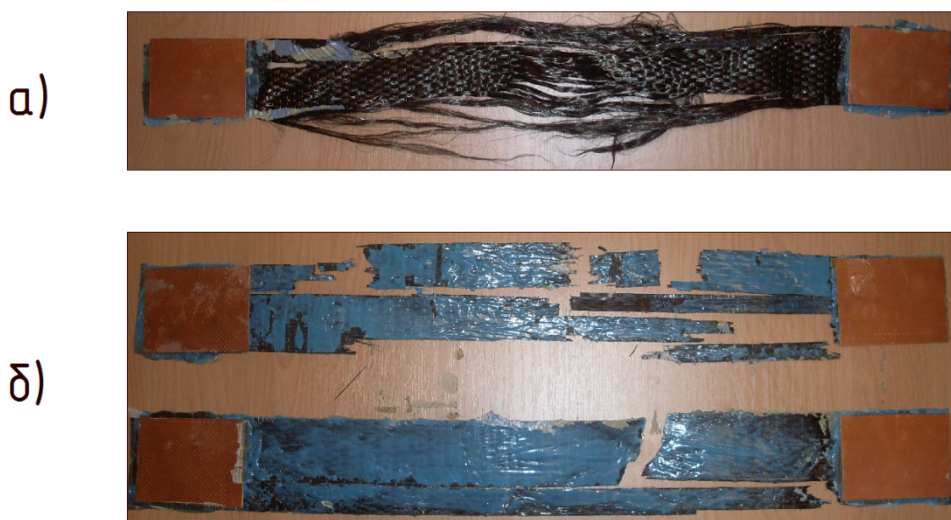


Рис. 4. Внешний вид образцов после разрушения: сухой (а), ламинат (образцы 2д, 2е) (б)

### Выводы.

Экспериментальное исследование работы углепластикового композита позволило оценить его несущую способность при одноосном нагружении в плоскости волокон. Деформирование по достижении определенного уровня напряжений (см. выше) вызывает постепенное разрушение перегруженных волокон, заканчивающееся хрупкой потерей несущей способности.

Относительное удлинение при разрыве сухого углеволокна выше, чем у ламината. Показатели составили 1.89 % и 0.992 % соответственно. Это связано с отсутствием перераспределения усилий в поле матрицы и отсутствием сдерживания поперечного деформирования. Омоноличивание волокон в эпоксидном связующем, т.е. создание композитного ламината меняет характер работы углеродных волокон: жесткость и несущая способность увеличивается.

Характер разрушения композитного материала – хрупкий. Разрушение происходит от

нормальных напряжений в рабочей зоне. Плоскость разрыва волокон перпендикулярна оси приложения нагрузки. Это подтверждает теорию работы материала, изложенную в [5, 8, 9].

Были определены экспериментальные значения физико-механических характеристик углеволоконного ламината при одноосном растяжении. Полученные данные в высокой степени соотносятся с номинальными значениями характеристик, приведенными производителем материала ООО «Конкритстрой». Отклонение расчетных значений связано с дисперсией механических характеристик углеволокна.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СП 164.1325800.2014 Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. М.: ЦНИИСК, 2014. 50 с.
2. ГОСТ 25.601-80 Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания плоских

образцов на растяжение при нормальной, повышенной и пониженной температурах. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1980. 15 с.

3. ГОСТ 12423-66 Пластмассы. Условия кондиционирования и испытания образцов (проб). М.: Комитет стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР, 1967. 8 с.

4. ГОСТ Р 8.736-2011 ГСИ. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2013. 23 с.

5. Стрижало В. А., Земцов М. П. Жесткость и прочность слоистых углепластиков при одноосном нагружении // Проблемы прочности. 2001. №6. С. 61–71.

6. Фролов Н.В., Обернихин Д.В., Никулин А.И., Лапшин Р.Ю. Исследование свойств ком-

позитной арматуры на основе стеклянных и базальтовых волокон // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2015. № 3. С. 18–21.

7. Римшин В.И., Меркулов С.И. Элементы теории развития бетонных конструкций с неметаллической композитной арматурой // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 5. С. 38–42.

8. Римшин В.И., Меркулов С.И. О нормировании характеристик стержневой неметаллической композитной арматуры // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 5. С. 22–26.

9. Меркулов С.И. Анализ и перспективы развития усиления бетонных конструкций композитной арматурой // В сборнике: Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения Материалы Международных академических чтений. Курский государственный университет. 2015. С. 167–171.

---

**Merkulov S.I., Esipov S.M.**

**THE STRENGTH AND DEFORMABILITY OF COMPOSITE MATERIAL BASED ON CARBON FIBERS UNDER UNIAXIAL TENSION**

*This article presents a method to estimate the strength of anisotropic unidirectional carbon fiber fabric tensile in-plane fiber orientation. Experimentally studied the principles of deformation and destruction of tissue samples, evaluated the strength of the fabric in the presence and absence of impregnation with epoxy, built charts, work samples / composite under load. Given the research methodology, the technology of preparation and characteristics of the pilot samples. The objective of the study is to identify the applicability of carbon fiber to reinforce the lost strength of the stretched zones of concrete elements, and the determination of its physico-mechanical parameters.*

**Key words:** reinforced Concrete structures, tensile, strength, deformability, composites, carbon fiber, fiber, laminate, reinforcement of structures.

---

**Меркулов Сергей Иванович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой промышленного и гражданского строительства

Курский государственный университет

Адрес: Россия, 305000, Курск, ул. Радищева, д. 33

E-mail: pgs@kursksu.ru

**Есипов Станислав Максимович**, аспирант кафедры строительства и городского хозяйства.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: sk31.sm@gmail.com