

DOI: 10.12737/23654

Меркулов С.И., д-р техн. наук, проф.,
Есипов С.М., асс., аспирант

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ И РЕЖИМА НАГРУЖЕНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ И ЖЕСТКОСТЬ АРМИРОВАННЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ

sk31.sm@gmail.com

В данной статье представлен метод оценки влияния параметров нагружения на прочность анизотропного однонаправленного углеволоконного композитного материала при растяжении в плоскости ориентации волокон. Экспериментально изучены механизмы деформирования и разрушения образцов, приведены зависимости механических свойств армированных углепластиков. Задачей исследования является определение применимости углепластиков для усиления методом внешнего армирования потерявших прочность растянутых зон железобетонных элементов, а также анализ степени влияния параметров нагружения конструкций на их прочность после усиления.

Ключевые слова: композиционные материалы, армированный пластик, углеродное волокно, внешнее армирование.

В современной строительной отрасли высокое распространение при подборе материалов для усиления изгибаемых и сжатых железобетонных строительных конструкций получили композитные материалы – армированные пластики. Их основными задачами являются: а) разгрузка рабочей арматуры растянутой зоны железобетонного элемента, совместно с повышением трещиностойкости; б) создание эффекта обоймы для перехода плоского напряженно-деформированного состояния в объемное. Среди многообразия прекурсоров композитных материалов своей изученностью и доступностью отличаются композиты на основе углеродных волокон [4]. Они обладают высокой прочностью на растяжение и высоким модулем упругости. Исходя из перечисленных задач композитов для усиления жбк, можно сделать вывод, что применимость и эффективность армированных пластиков зависит от их механических свойств при работе на растяжение. Для определения данных свойств и механизмов деформирования необходимо использовать экспериментальные методы, т.к. аналитические методы описания напряженно-деформированного состояния композитного материала сложны и оперируют большим количеством независимых параметров [3].

Испытания на растяжение и сжатие образцов армированных угле-, стекло- и борволокном имеют особенности и отличаются механизмами деформирования и разрушения при идентичных условиях испытаний образцов из конструкционных сталей. Высокая степень анизотропии фибры и связующего, отсутствие пластических деформаций фибры, влияние масштабных коэффициентов и концентраторов напряжений создают трудности при обработке экспериментальных данных и получении объек-

тивных характеристик даже при случаях одноосных НДС [3, 4]. В работе, описанной в [6] было экспериментально показано, что уменьшение площади поперечного сечения изгибаемого элемента из композитного материала на 10% приводит к падению несущей способности минимум на 30 %. Для случаев растяжения эта зависимость также справедлива. В экспериментах [2] было установлено, что предел прочности для армирующих элементов композитных материалов не является постоянной величиной (рис. 1), а является функцией распределения дефектов в теле фибры. Похожая ситуация наблюдается и для конструкционных сталей, близких по свойствам к изотропным материалам. Но в случае сталей, удельное изменение механических параметров не столь велико, как для стекло- и углеволокон.

σ , МПа

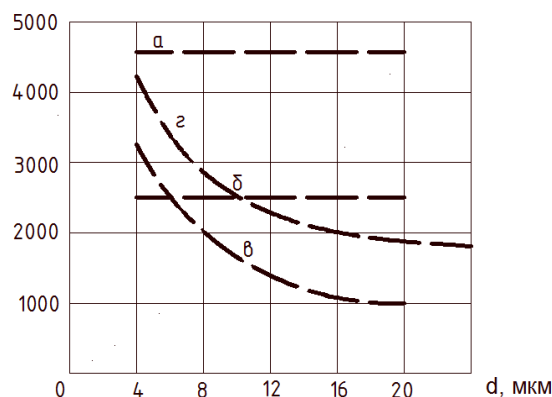


Рис. 1. Зависимость предела прочности армирующего волокна от его диаметра:

а – теоретическая для Е-стекла, б – теоретическая для S-стекла, в – экспериментальная для Е-стекла, г – экспериментальная для углеволоконна.

Научное сообщество объясняет различие в теоретических и практических результатах (рис.1) наличием микродефектов фибры - повреждений, вызванных внешними факторами. Чем больше диаметр волокна, тем больше дефектов наблюдаются и тем больше они влияют на прочность. Экспериментальные исследования подробно описаны в [8].

Похожим образом ситуация обстоит и с зависимостью прочности от скорости нагружения. Однако, конкретные зависимости между скоростью статического нагружения и пределом прочности могут определяться лишь экспериментами, теоретического анализа недостаточно. Установление влияния скорости и режима нагружения (длительного или кратковременного) на механические свойства армированных пластиков и составляют проблематику статьи, т.к. после монтажа внешнего армирования, усиленный ж/б элемент и композит начинают работать совместно. Из этого следует, что нам необходимо понимать, как влияет характер нагрузки, приложенной на усиленный элемент (величина разгрузки до усиления, величина временных кратковременных и длительных нагрузок, доля постоянных нагрузок, предварительное напряжение) на несущую способность после усиления.

Дополнительно стоит отметить, что композиты при деформировании ведут себя как вязкоупругие материалы [7], т.е. среди характеристик материала также представляют интерес деформации ползучести и предел ползучести. На рис. 2. показана общая диаграмма ползучести композитного материала. Пунктирная кривая построена по точкам, которые являются пересечением нормали с оси σ и точки перехода из 1ой фазы ползучести во 2ую, под углом, с каким наклонен участок графика, соответствующий 2ой фазе для каждого из $\sigma_1 \dots \sigma_4$. Величины $\sigma_1 \dots \sigma_4$ значат некоторые уровни напряжений, при которых построены графики. При этом заметно изменение характера ползучести при увеличении напряжений – появление 3ей фазы ползучести и ускорение темпов роста во 2ой фазе. Однако, при понимании вопроса ползучести существует 2 проблемных фактора:

1. Для определения искомых величин требуется применение уравнения Холпина и зависимости Файндли между полной деформацией и деформацией ползучести [7], которые содержат в себе множество постоянных материала. Для получения постоянных требуется проведение масштабных испытаний.

2. Проблема выбора точки, соответствующей пределу ползучести. С точки зрения практического использования считают [6, 7], что

пределом ползучести является напряжение, которое возникает при деформации ползучести 0.1 % за 10^4 часов. Реальное время испытаний, описанных в статье составило $10^{2.5}$ часов. Такой предел длительности был установлен, исходя из условий работы лаборатории.

Исходя из данных факторов, в рамках настоящего исследования не представляется возможным корректно определить искомые величины, подпадающие под общепринятые определения. Для регистрации явления ползучести углекомполита была проведена дополнительная серия длительных статических испытаний.

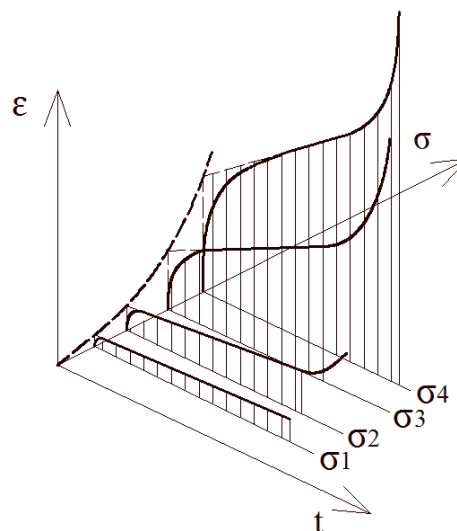


Рис. 2. Общий вид схемы ползучести композитов

Для получения практических данных были проведены 6 серий статических испытаний углекомполита на растяжение. Испытания на сжатие не проводились, т.к. в рамках задач по усилению углекомполитом железобетонных конструкций, элементы внешнего армирования не испытывают усилия сжатия [3]. Статические испытания характеризовались малой величиной ускорений движущихся частей испытательной машины, т.ч. возникающими силами инерции можно было пренебречь. В сериях №1-№5 было испытано 3 образца, в серии №6 - 3 образца. В качестве основного критерия разделения серий была выбрана скорость нагружения: для серии №1 - 0.05 кН/с, для серии №2 - 0.1 кН/с, для серии №3 - 0.15 кН/с, для серии №4 - 0.2 кН/с, для серии №5 - 0.25 кН/с. Испытания серии №6 проводились в течение $10^{2.5}$ часов при постоянной величине нагрузки с интервалом регистрации деформаций 10 часов.

Для определения механических характеристик использовался полосовой однослойный углеволоконный композит шириной 75 мм длиной 600 мм. Размеры образца были приняты, исходя из условия создания поля однородных деформаций, т.к. принцип Сен-Венана обуславливает

увеличение зон действия краевого эффекта. Ориентация углеволокон параллельна продольной оси образца. Диаметр волокна – 0.131 мм. Толщина пропитанного связующим композита – 1 мм. Для анкеровки в клиновых захватах испытательной машины WEW-600D образцы снабжаются накладками из стеклотекстолита шириной 75 мм и длиной 100 мм [3], из чего следует, что длина рабочей части образца составила 400 мм. В качестве тензометрического оборудования применены наклеиваемые фольговые датчики с базой 20 мм, цифровой измеритель деформаций Терем-4.1, экстензометр ИДН-10-50.

σ , МПа

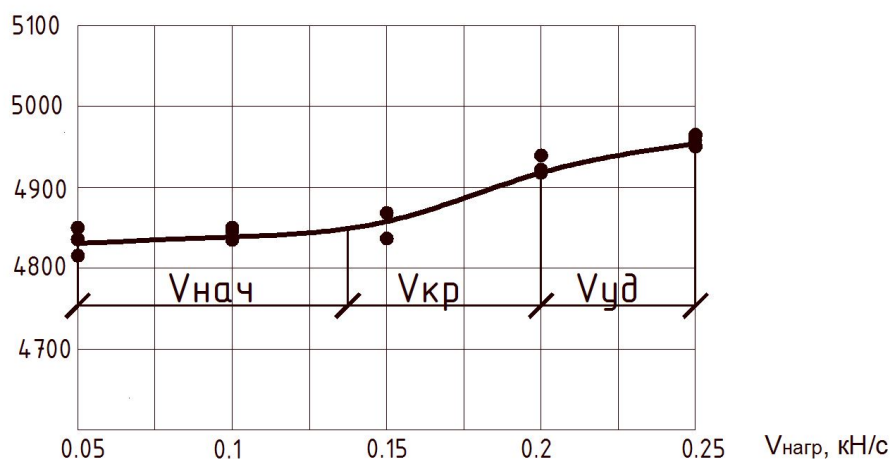


Рис. 3. Зависимость прочности композита от скорости изменения нагрузки

2. Скорость нагружения оказывает влияние на величину модуля упругости 1-го рода (рис. 4). Точка искривления диаграммы находится в аналогичном интервале значений скорости нагружения, что и на рис. 3. В области ударных нагрузок величина модуля упругости начинает расти с характером, близким к гиперболическому. Это происходит в силу одновременности двух факторов: а) имеется рост прочности материала (на 2.5–3 %), б) снижается его удельное удлинение (на 21 %). Сопоставляя эти данные с

E , ГПа

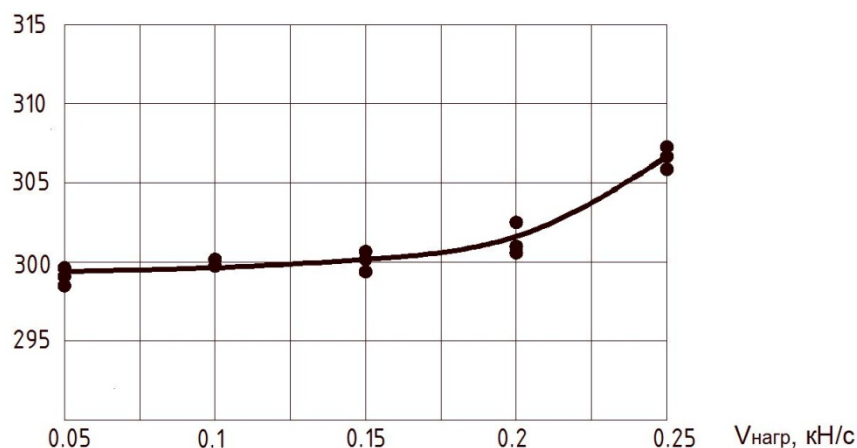


Рис. 4. Зависимость модуля упругости 1-го рода от скорости изменения нагрузки

Результаты экспериментальных исследований показали следующее:

1. Скорость нагружения оказывает влияние на величину предела прочности материала (рис. 3). В определенном интервале начальных значений скорости нагружения ($V_{нач}$) приращения параметров не наблюдается. При некотором значении $V_{кр}$ диаграмма начинает искривляться, появляется излом. Постепенно, переходя в область ударных нагрузок ($V_{уд}$), диаграмма стремится к выпрямлению.

другими исследованиями параметров нагружения [6], можно сделать вывод, что скорость деформации имеет сильное влияние на модуль упругости 1-го рода и практически не влияет на модуль упругости 2-го рода. Это наводит на следующие предположения: а) работа граничных слоев, разделяющих волокно и матрицу при различных скоростях нагружения оказывается различным, б) ударная вязкость композита превышает ударную вязкость его компонентов [1, 6].

3. Армированные пластики на основе углерода ведут себя как вязкоупругие материалы. Имеет место рост деформаций при статической нагрузке (рис. 5). В рамках эксперимента были исключены из результатов деформации первоначального обжатия образцов и случайные проскальзывания. С увеличением начального

ε , %

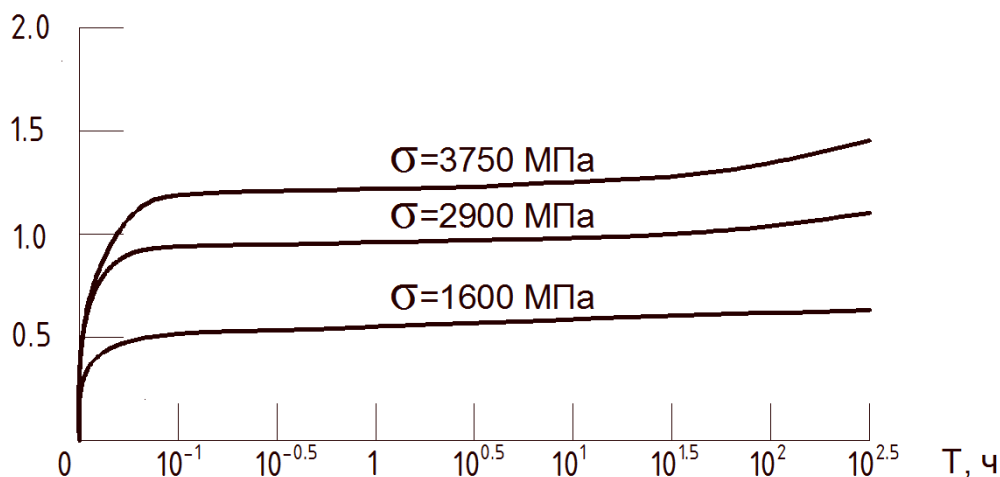


Рис. 5. Ползучесть углекомполитов при температуре 20 °C

Выводы. При проектировании усиления железобетонных конструкций внешним армированием из армированных углепластиков, а также при применении полимеркомпозитной арматуры особое внимание следует уделять расчетным значениям прочностных и деформативных характеристик композитных материалов. В рамках длительных нагружений конструкции недопустимо применение величин прочности композита, полученных на основании кратковременных испытаний, т.к. они завышают реальную прочность. Также необходимо учитывать возможный рост деформаций и прогибов конструкций, вызванных ползучестью неметаллической арматуры.

На основании изложенного можно определить задачи, в результате решения которых возможно усовершенствовать отдельные положения нормативных методик проектирования усиления железобетонных конструкций внешним армированием композитными материалами:

1. Разработать методику определения поправочных коэффициентов, учитывающих долю длительности работы усиленной или проектируемой конструкции под нагрузкой.

2. Вводить в расчет усиления возможность вязкоупругого деформирования армированных пластиков и нарастание деформаций ползучести.

3. Учитывать в расчете потери величины предварительного напряжения конструкций с композитной арматурой вследствие ползучести композитных материалов.

напряжения в образце, рост деформаций ползучести ускоряется. В целом, рост деформаций линейен до определенного предела времени (примерно 100 ч), после которого заметно ускорение нарастания ползучести. Явление ползучести происходит, вероятно, при релаксации напряжений в армирующем волокне.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Меркулов С.И. Методы оценки возможного прогрессирующего разрушения зданий и сооружений // В сборнике: Современные проблемы расчета железобетонных конструкций, зданий и сооружений на аварийные воздействия. Под редакцией А.Г. Тамразяна, Д.Г. Копаницы. 2016. С. 251–254.

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

3. Дронов А.В., Дрокин С.В., Фролов Н.В. Экспериментальное исследование сцепления стеклопластиковой арматуры с бетоном // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 11. С. 80–83.

4. Есипов С.М. Композитные материалы для усиления строительных конструкций // В сборнике: Образование, наука, производство. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. 2015. С. 2475–2479.

5. Фролов Н.В., Полоз М.А., Колесникова Е.Г. К вопросу об испытании стержневой полимеркомпозитной арматуры на осевое растяжение // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 11. С. 74–78.

6. Фудзии Т., Дзако М. Механика разрушения композиционных материалов. М.: Мир, 1982. 232 с.

7. Тарнопольский Ю.М., Кинцис Т.Я. Методы статических испытаний армированных пла-

стиков. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Химия, 1981. 272 с.

8. Баргенов Г.М. Сверхпрочные и высокопрочные неорганические стёкла. Стройиздат, М., 1974. 240 с.

Esipov S.M., Merkulov S.I.

EFFECT OF RATE AND MODE OF LOADING ON STRENGTH AND STIFFNESS REINFORCED WITH CARBON FIBER REINFORCED PLASTICS

This paper presents a method for evaluating the effect of loading parameters on the strength of anisotropic unidirectional carbon-fiber composite material under tension in the plane of orientation of the fibers. Experimentally studied mechanisms of deformation and fracture of the samples shows the dependence of the mechanical properties of reinforced carbon fiber reinforced plastics. The objective of the study is to determine the applicability of CFRP for strengthening by external reinforcement has lost the strength of the stretched zones of concrete elements, as well as analysis of the degree of influence of parameters of loading of the structures on their strength after amplification.

Key words: *composite materials, fiber-reinforced plastic, carbon fibre external reinforcement.*

Меркулов Сергей Иванович, доктор технических наук, профессор.

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

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

E-mail: sk31.sm@gmail.com

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