

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 539.3

doi: 10.26907/2541-7746.2022.2-3.194-205

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕГРАДАЦИИ СТЕКЛОПЛАСТИКА ПОД ДЕЙСТВИЕМ НАПРЯЖЕНИЙ И ЩЕЛОЧНОЙ СРЕДЫ

Р.А. Каюмов¹, И.З. Мухамедова¹, Б.Ф. Тазюков²

¹*Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, 420043, Россия*

²*Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, 420008, Россия*

Аннотация

Разработаны определяющие соотношения для стеклопластика и методика анализа его поведения с учетом накопления микроповреждений при совместном воздействии силовых факторов и агрессивной щелочной среды. Построена конечно-элементная модель для расчета напряженно-деформированного состояния стеклопластиковой панели с целью оценки ее долговечности при наличии воздействия силовых факторов и щелочной среды. Исследована сходимость решений в зависимости от количества конечных элементов и шага по времени. Получены закономерности поведения стеклопластиковой панели с учетом и без учета деформаций, вызванных накоплением поврежденности. Показано, что учет этих деформаций уменьшает долговечность стеклопластиковой панели.

Ключевые слова: стеклопластик, методика, конечно-элементная модель, долговечность, щелочная среда, параметр поврежденности, численный эксперимент

Введение

Научный интерес к исследованиям влияния агрессивной щелочной среды на прочностные свойства полимерных волокон из стеклопластика возник в связи с внедрением неметаллической арматуры в бетонных конструкциях. Стеклопластиковая арматура, состоящая из заполнителя (стекловолокно) и связующего вещества (эпоксидная смола), в процессе эксплуатации испытывает химическое воздействие со стороны агрессивных щелочных веществ, содержащихся в бетоне. Бетонные конструкции, находящиеся в условиях высокой влажности или подверженные воздействию солевых растворов [1], в случае армирования полимерными композитными материалами имеют гораздо более продолжительный срок службы [2–4]. Исследования свойств композитной неметаллической арматуры при работе с бетоном представлены в работах [5–9]. Бетон с неметаллической арматурой отличается повышенными эксплуатационными свойствами, а именно: повышенной трещиностойкостью, прочностью при растяжении и изгибе, а также повышенной ударной прочностью [10–12]. В литературе отмечено, что стеклопластиковая арматура увеличивает срок службы строительных конструкций в 2–3 раза по сравнению с применением металлической арматуры при воздействии на них таких агрессивных сред, как хлористые соли и кислоты [13, 14].

Исследования долговечности и прогнозирование длительной прочности полимерных композиционных материалов на основе стеклопластика и конструкций из них приведены в работах [15–22]. В статье [15] построена математическая модель

и разработана методика оценки долговечности элементов конструкций из стеклопластика с учетом одновременного воздействия силовых факторов, влажной среды и переменной температуры на основе модифицированной теории Журкова и закона линейного суммирования поврежденности. В работах [16, 17] исследована долговечность стеклопластиковой арматуры и получены эмпирические выражения для расчета длительной прочности и прогнозирования влияния длительности действия нагрузки на прочность. Можно отметить также экспериментальные исследования, посвященные анализу изменения механических характеристик стеклопластика и его длительной прочности при силовых воздействиях [18–21].

Экспериментальные исследования по определению степени изменения механических характеристик стеклопластика под воздействием щелочных агрессивных сред, в частности имитирующих щелочную среду, характерную для влажного бетона, приведены в работах [22–26]. Можно отметить работы, где выполнены исследования по старению стеклопластиковых стержней в условиях щелочной среды с учетом воздействия знакопеременных температур и нагрузки [26–29]. В работе [26] разработана методика и предложены выражения для прогнозирования прочности в зависимости от времени старения и температуры. В [28] предложена методика по определению долговечности стеклопластиковой арматуры на основе кинетической теории твердых тел и накопления поврежденности с учетом климатических факторов, щелочной среды бетона и его напряженного состояния.

Можно отметить, что построению математических моделей для оценки долговечности стеклопластика по сравнению с экспериментальными исследованиями на сегодняшний день посвящено меньшее число работ.

В ряде работ проведен анализ коррозионного разрушения напряженных стеклопластиковых стержней в кислых средах, а также предложен метод оценки стойкости образцов к коррозионному разрушению под нагрузкой и в кислой среде [30, 31].

Исследованы также эффекты влагонасыщения и установлено, что полимерные композиты на основе стеклопластика с наибольшей деструкцией поверхности поглощают наибольшее количество влаги и с ростом влагонасыщения механические свойства материала существенно ухудшаются [32, 33].

В настоящей работе предлагается модель поведения материалов типа стеклопластика, а также модель поведения стеклопластиковой панели (фактически уже конструкции), на основе которой возможно проведение экспериментальных исследований.

1. Определяющие соотношения для построения модели поведения стеклопластиковой панели, испытывающей силовые воздействия в агрессивной среде

Рассмотрим модель стеклопластиковой панели толщиной H_0 и длиной l , находящейся в щелочной среде при кинематическом нагружении (см. рис. 1), то есть считаем, что в начальный момент времени задан прогиб v_0 посередине пролета, как показано на рис. 1. Щелочь как химическая агрессивная среда приводит к изменению механических свойств композита, а именно к накоплению микроповреждений в материале. Это явление в дальнейшем будем называть деградацией композитного материала.

Для панели будем считать справедливой гипотезу Бернулли. Тогда ввиду специфики изгиба панели даже в случае наличия деформаций, вызванных накоплением поврежденности, в качестве существенного будет напряжение σ_x . Поэтому в качестве первого параметра состояния, описывающего деградацию материала, как и в [34], можно ввести скалярный параметр поврежденности ω , который будет описывать накопление в материале дефектов типа микротрещин и микропор.

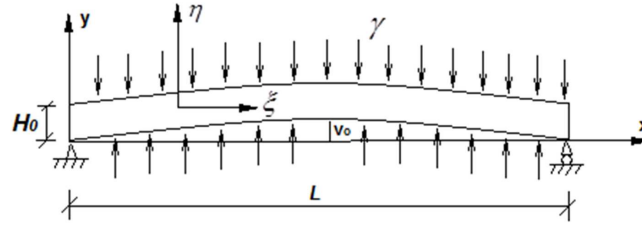


Рис. 1. Модель стеклопластиковой панели, находящейся в щелочной среде

Для упрощения описания процессов деформирования и накопления поврежденности можно рассмотреть только верхнюю левую четверть панели. При этом σ_x будет всегда положительным. Следуя работам Ю.Н. Работнова [34], кинетическое уравнение относительно ω примем в простейшем виде, но учитывающем влияние агрессивной среды (щелочи):

$$\dot{\omega} = \frac{B_\omega \sigma_x}{1 - \omega} (1 + W). \quad (1)$$

Здесь постоянная B_ω находится по экспериментальным данным. Концентрация щелочи в воде будет определяться параметром γ . В (1) входит второй параметр состояния W , определяющий концентрацию щелочи в материале. Начальное условие для ω имеет вид

$$\omega(0) = 0.$$

Введем параметр W_0 , определяющий концентрацию щелочи в малом слое, прилегающем к поверхности стеклопластика. Для этого параметра W_0 также запишем кинетическое уравнение в виде

$$\dot{W}_0 = \gamma \gamma_0 \frac{\alpha^2 + \sigma_{x0}^2}{1 + W_0}, \quad (2)$$

где α , γ_0 – константы, определяемые из экспериментов, σ_{x0} – напряжение на поверхности стеклопластика.

Закон распределения щелочи по глубине стеклопластика в расчетах для простоты считается линейным

$$W = \begin{cases} W_0 \left(1 - \frac{y}{h}\right), & y \leq h; \\ W = 0, & y \geq h. \end{cases}$$

Диффузия щелочи в толщу материала на слой высотой h идет со стороны поверхности, подверженной воздействию щелочи. Процесс увеличения глубины проникновения щелочи в материал будем описывать для простоты следующим соотношением:

$$\dot{h} = \frac{\gamma \gamma_h (c_\sigma + \sigma_x) W_0}{(c_h + h) (1 + W_0)},$$

где c_σ , c_h , γ_h – константы, определяемые из экспериментов. Следует отметить, что h не ограничена по величине. При больших временах h неограниченно растёт, а $W \rightarrow W_0$.

Начальное условие для W_0 имеет вид

$$W_0(x, \sigma, t)|_{t=0} = 0, \quad W(\sigma, \omega, x, y, t)|_{t=0} = 0.$$

Для W приняты следующие граничные условия:

$$W(\sigma, \omega, x, \eta, t)|_{\eta=H_0/2} = W_0(x, \sigma, t),$$

$$W(\sigma, \omega, x, \eta, t)|_{\eta=-H_0/2} = W_0(x, \sigma, t).$$

Согласно работе Ю.Н. Работнова [34], за критерий разрушения принималось упрощенное условие в виде

$$\omega = 1, \quad t = t^*,$$

где критическое время (долговечность) t^* – время, при котором наступает разрушение.

Вектор полной деформации для стеклопластика будет иметь вид

$$\varepsilon = e + \varepsilon^\omega,$$

где ε – полная деформация; e – упругая часть деформации; ε^ω – деформация, возникающая от наличия поврежденности. Вектор деформации, возникающий от наличия поврежденности, зададим в виде кинетической зависимости

$$\dot{\varepsilon}^\omega = [D]^{-1} \cdot \{\sigma\} \cdot z \cdot \omega^k. \quad (3)$$

Здесь $[D]^{-1}$ – матрица, обратная к матрице упругих постоянных для плоского деформированного состояния; z, k – некоторые постоянные величины, определяемые из экспериментов. Тогда закон Гука запишем в виде

$$\{\sigma\} = [D](\{\varepsilon\} - \{\varepsilon^\omega\}).$$

Согласно принципу Лагранжа можно записать следующее соотношение:

$$\int_V \delta \varepsilon^T \{\sigma\} dV = \delta \{U\}^T \{P\}.$$

Тогда получим

$$\int_V \delta \varepsilon^T [D](\{\varepsilon\} - \{\varepsilon^\omega\}) dV = \delta \{U\}^T \{P\},$$

$$\int_V \delta \{U\}^T [B]^T [D]([B]\{U\} - \{\varepsilon^\omega\}) dV = \delta \{U\}^T \{P\},$$

$$\delta \{U\}^T \left(\int_V [B]^T [D] [B] dV \right) \{U\} = \delta \{U\}^T \{P\} + \delta \{U\}^T \int_V [B]^T [D] \{\varepsilon^\omega\} dV.$$

Разрешающее уравнение равновесия в сокращенной форме можно записать в виде

$$[K]\{U\} = \{P\} + \{P^\omega\}.$$

Таким образом, в узлах сетки, кроме вектора внешних узловых сил $\{P\}$, будет действовать компонента, отвечающая за накопление микроповреждений $\{P^\omega\}$:

$$\{P^\omega\} = \int_V [B]^T [D] \{\varepsilon^\omega\} dV$$

Напряженно-деформированное состояние стеклопластиковой панели определяется на основе метода конечных элементов, в качестве которых приняты шестиузловые треугольные элементы с квадратичной аппроксимацией перемещений. Для численного интегрирования по времени применялся метод Эйлера.

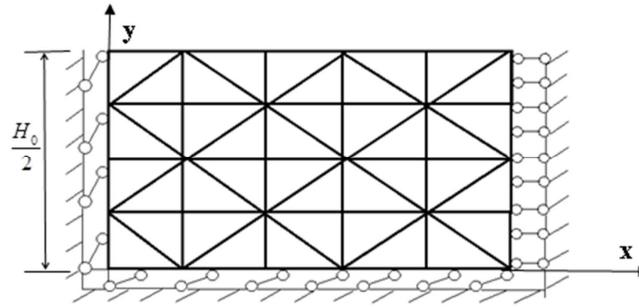
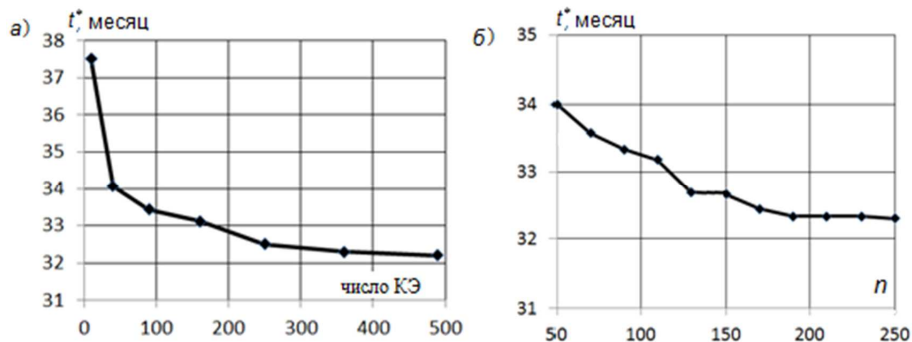


Рис. 2. Конечно-элементная модель четверти стеклопластиковой панели

Рис. 3. Зависимость долговечности t^* от количества конечных элементов (а) и от числа отрезков по времени n (б)

2. Численные эксперименты

Для проведения численных расчетов, как было отмечено выше, рассмотрена верхняя левая четверть стеклопластиковой панели в виду ее симметрии (рис. 1). Построена конечно-элементная модель для верхней четверти панели, как показано на рис. 2, с соответствующими закреплениями ее граней.

Проникновение щелочи вглубь стеклопластика идет вдоль координаты y со стороны поверхности $y = H_0/2$. Были заданы следующие размеры панели: $H_0 = 0.4$ см, $l = 24$ см, а также прогиб v_0 , коэффициент Пуассона $\nu = 0.23$, модуль упругости $E = 2.3$ МН/см². Для определяющих соотношений в (1)–(3) заданы следующие коэффициенты: $B_\omega = 0.07$ см²/(МН·месяц), $z = 0.07$, $\gamma = 1$, $\gamma_0 = 4$ см⁴/(МН²·месяц), $\gamma_h = 0.05$ см⁴/(МН·месяц), $k = 0.8$.

Далее при $v_0 = 2$ см была исследована сходимость предлагаемой конечно-элементной модели при варьировании количества КЭ, как показано на рис. 3, а. На рис. 3, б представлена зависимость долговечности t^* при варьировании шага по времени Δt . Проведенные численные эксперименты по сходимости показали, что для рассматриваемой задачи область панели нужно разбивать не менее чем на 250 КЭ, а шаг по времени брать не больше чем 0.28 месяца, то есть этот шаг должен удовлетворять условию $\Delta t < 0.009 t^*$ (шаг по времени $\Delta t = t^*/n$, здесь t^* – критическое время, n – число отрезков, на которое разбито время t^*).

Далее были проведены численные эксперименты и получены графики зависимости параметра поврежденности ω от времени t , как показано на рис. 4, для трех случаев испытаний. В первом эксперименте было учтено только кинематическое нагружение. Во втором эксперименте учтены кинематическое нагружение и воздействие щелочной среды. В третьем эксперименте учтены кинематическое нагружение, воздействие щелочной среды и закон (3).

Полученные закономерности показывают, что учет влияния агрессивной щелоч-

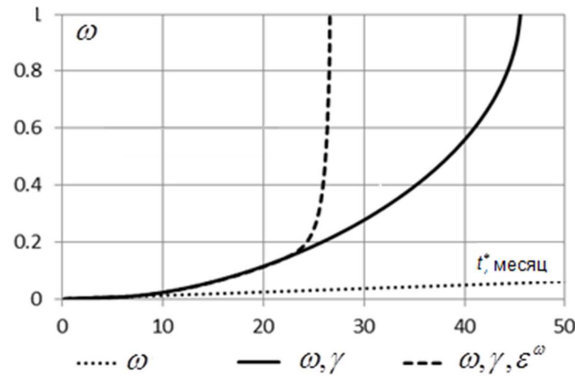


Рис. 4. Зависимость параметра поврежденности ω от времени t для трех случаев численных экспериментов

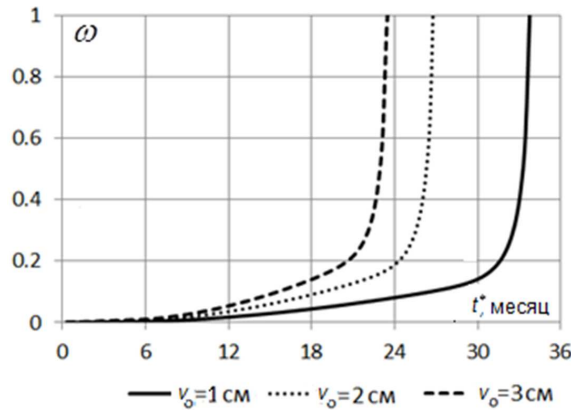


Рис. 5. Зависимость параметра поврежденности ω от времени t при разных значениях заданного прогиба посередине пролета стеклопластиковой панели

ной среды и деформации ε^ω , вызванной накоплением поврежденности, приводит к сильному уменьшению прогнозируемого срока безопасной работы стеклопластиковой панели.

При выбранных исходных данных для первого эксперимента долговечность составила около 39 лет, для второго эксперимента с учетом накопления поврежденности и влияния щелочной среды долговечность составила примерно 3 года и 9 месяцев. Для третьего эксперимента с учетом щелочной среды и деформации ε^ω долговечность составила около 2 лет и 2 месяцев.

Далее было исследовано влияние величины прогиба v_0 на долговечность рассматриваемой панели. На рис. 5 приведены зависимости параметра поврежденности от времени при разных значениях прогиба v_0 стеклопластиковой панели. При этом учтены как влияние щелочной среды, так и деформации ε^ω .

Численные эксперименты показали, что увеличение заданного прогиба стеклопластиковой панели приводит к уменьшению ее долговечности. Так, при $v_0 = 1$ см долговечность панели составила около 3 лет, а при $v_0 = 3$ см – примерно 2 года. Можно видеть, что, несмотря на пропорциональное увеличение напряжений в зависимости от заданного прогиба, долговечность уменьшается не пропорционально, а с меньшей скоростью.

Заключение

Предложены определяющие соотношения для стеклопластика и разработана методика анализа его поведения для оценки долговечности стеклопластиковой панели. Построена конечно-элементная модель и численная методика расчета напряженно-деформированного состояния стеклопластиковой панели, подвергнутой воздействию силовых факторов и щелочной среды.

Проведенное исследование сходимости решений в зависимости от количества КЭ и шага по времени показало, что для рассматриваемой задачи область панели нужно разбивать не менее чем на 250 КЭ, а шаг по времени выбирать так, чтобы он был не больше, чем 0.009 части от критического времени. Получены закономерности поведения стеклопластиковой панели с учетом и без учета деформаций, вызванных накоплением поврежденности. Показано, что учет деформаций, вызванных накоплением поврежденности, приводит к существенному уменьшению прогнозируемого срока долговечности стеклопластиковой панели. На основе численных экспериментов исследовано влияние величины прогиба посередине пролета панели v_0 на долговечность рассматриваемой панели и выявлено, что, несмотря на пропорциональное увеличение напряжений в зависимости от заданного прогиба, долговечность уменьшается не пропорционально, а с меньшей скоростью.

Благодарности. Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета (ПРИОРИТЕТ-2030).

Литература

1. *Середина О.С.* Опыт решения проблем коррозии водопропускных труб в США // Вестн. Волгогр. гос. архит.-строи. ун-та. Сер. Строительство и архитектура. – 2012. – Вып. 27. – С. 106–110.
2. *Elsayed T., Haggag H., El Hashimy A., Hass A.* Behavior of slabs reinforced using square GFRP rebars // Изв. Казан. гос. архит.-строи. ун-та. – 2010. – № 1. – С. 78–88.
3. *Уманский А.М., Беккер А.Т.* Перспективы применения композитной арматуры // Вестн. инж. шк. Дальневост. фед. ун-та. – 2012. – № 2. – С. 7–13.
4. *Птухина И.С., Туржебаев А.Б., Тлеуханов Д.С., Бижанов Н.Ж., Далабаева А.Е., Далабаев А.С.* Эффективность использования инновационных композитных материалов в строительстве // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2014. – № 9. – С. 84–96.
5. *Yazdanbakhsh A., Bank L.C., Chen C.* Use of recycled FRP reinforcing bar in concrete as coarse aggregate and its impact on the mechanical properties of concrete // Constr. Build. Mater. – 2016. – V. 121. – P. 278–284. – doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.165.
6. *Park J.S., Lim A.R., Kim J., Lee J.Y.* Bond performance of fiber reinforced polymer rebars in different casting positions // Polym. Compos. – 2016. – V. 37, No 7. – P. 2098–2108. – doi: 10.1002/pc.23388.
7. *Староверов В.Д., Бароев Р.В., Цурупа А.А., Кристалевич А.К.* Композитная арматура: проблемы применения // Вестн. гражд. инженеров. – 2015. – № 3. – С. 171–178.
8. *Устинов В.П., Устинов Б.В.* Исследование физико-механических характеристик композитных полимерных материалов (КПМ) // Изв. вузов. Строительство. – 2009. – № 11–12. – С. 118–125.
9. *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.

10. Михайлов К.В. Перспективы применения неметаллической арматуры в преднапряженных бетонных конструкциях. // Бетон и железобетон. – 2003. – № 5. – С. 29–30.
11. Власов В.М., Бертов В.М., Долгачев А.Д., Донов А.В., Луговой А.Н. Использование бетонных балок, армированных стальной и стеклопластиковой арматурой // Изв. ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. – 2005. – Т. 244. – С. 34–37.
12. Avdeeva A., Shlykova I., Antonova M., Barabanshikov Y., Belyaeva S. Reinforcement of concrete structures by fiberglass rods // Matec Web Conf. – 2016. – V. 53. – Art. 01006, P. 1–5. – doi: 10.1051/matecconf/20165301006.
13. Кузьмина А.Ю., Пыжъянова Д.В., Салов А.С. Современная арматура для эффективного строительства // Проблемы строительного комплекса России: Материалы XIX Междунар. науч.-техн. конф. – Уфа: Уф. гос. нефт. техн. ун-т, 2015. – С. 106–110.
14. Ostroukh A.V., Nedoseko I.V., Surkova N.E., Fattakhov M.M., Nuruev Y.E., Salov A.S. Automated information-analytical system for dispatching control of transportation concrete products // Int. J. Appl. Eng. Res. – 2015. – V. 10, No 19. – P. 40063–40067.
15. Каюмов Р.А., Шарафутдинова А.А. Об оценке долговечности строительных конструкций из стеклопластика // Изв. Казан. гос. архит.-строит. ун-та. – 2017. – № 2. – С. 114–123.
16. Блазнов А.Н., Волков Ю.П., Луговой А.Н., Савин В.Ф. Прогнозирование длительной прочности стеклопластиковой арматуры // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2003. – Т. 9, № 4. – С. 579–592.
17. Блазнов А.Н., Петров М.Г., Русских Г.И., Савин В.Ф. Прогнозирование прочности конструкций из однонаправленно армированных стеклопластиковых стержней // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2007. – Т. 13, № 1. – С. 97–112.
18. Блазнов А.Н., Волков Ю.П., Луговой А.Н., Савин В.Ф. Испытания на длительную прочность стержней из композиционных материалов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2006. – Т. 72, № 2. – С. 44–52.
19. Савин В.Ф., Луговой А.Н., Волков Ю.П., Блазнов А.Н. Продольный изгиб как метод определения механических характеристик материалов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2006. – Т. 72, № 1. – С. 55–58.
20. Савин В.Ф., Луговой А.Н., Блазнов А.Н., Волков Ю.П., Хе А.И. Исследование механических свойств стеклопластиковых стержней методом продольного изгиба // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2004. – № 4. – С. 499–516.
21. Старцев О.В., Блазнов А.Н., Петров М.Г., Атясова Е.В. Исследование долговечности полимерных композиционных материалов при статических нагрузках // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2019. – № 6. – С. 9–20.
22. Lebedev M.P., Startsev O.V., Kychkin A.K. The effects of aggressive environments on the mechanical properties of basalt plastics // Heliyon. – 2020. – V. 6, No 3. – Art. e03481, P. 1–9. – doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e03481.
23. Кузнецова Л.Г. Повышение стойкости стеклопластиковой арматуры // Бетон и железобетон. – 1973. – № 3. – С. 30–31.
24. Розенталь Н.К. Коррозионная стойкость полимерных композитов в щелочной среде бетона // Бетон и железобетон. – 2002. – № 3. – С. 20–23.
25. Мощанский Н.А. О стойкости стеклопластиковой арматуры в бетоне // Бетон и железобетон. – 1965. – № 9. – С. 33–34.

26. *Блазнов А.Н., Савин В.Ф., Краснов А.А.* Прогнозирование прочности композитных стержней в условиях воздействия щелочной среды // Юж.-сиб. науч. вестн. – 2014. – Т. 4, № 8. – С. 12–14.
27. *Кузина Т.В., Медведева Л.Ю., Чижевский В.В.* Долговечность стеклопластиковой арматуры в многослойных ограждающих конструкциях // Коррозия: материалы, защита. – 2005. – № 1. – С. 41–43.
28. *Устинов В.П., Петров М.Г., Савин В.Ф., Устинов Б.В.* Прогнозирование долговечности СПА в составе трёхслойных стеновых панелей // Вестн. Сиб. гос. ун-та путей сообщения. – 2002. – Вып. 4. – С. 115–123.
29. *Sawran M.A.* Effects of alkaline conditioning and temperature on the properties of glass fiber polymer composite rebar // Polym. Compos. – 2016. – V. 37, No 11. – P. 3181–3190. – doi: 10.1002/pc.23516.
30. *Верещагин А.Л., Жаринов Ю.Б., Маркова А.В., Савин В.Ф.* Коррозионное разрушение напряженных стеклопластиковых стержней // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2007. – Т. 17, № 3. – С. 432–451.
31. *Маркова А.В., Савин В.Ф., Жаринов Ю.Б., Блазнов А.Н.* Испытания на коррозионную стойкость напряженных стержней из полимерных композиционных материалов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2010. – Т. 76, № 11. – С. 56–59.
32. *Startseva L.T., Panin S.V., Startsev O.V., Krotov A.S.* Moisture diffusion in glass-fiber-reinforced plastics after their climatic aging // Dokl. Phys. Chem. – 2014. – V. 456, Pt. 1. – P. 77–81. – doi: 10.1134/S0012501614050054.
33. *Каблов Е.Н., Старцев В.О.* Климатическое старение полимерных композиционных материалов авиационного назначения. I. Оценка влияния значимых факторов воздействия // Деформация и разрушение материалов. – 2019. – № 12. – С. 7–16.
34. *Работнов Ю.Н.* Ползучесть элементов конструкций. – М.: Наука, 1965. – 752 с.

Поступила в редакцию
12.04.2022

Каюмов Рашит Абдулхакович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры механики

Казанский государственный архитектурно-строительный университет
ул. Зеленая, д. 1, г. Казань, 420043, Россия
E-mail: Kayumov@rambler.ru

Мухамедова Инзилия Заудатовна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры механики

Казанский государственный архитектурно-строительный университет
ул. Зеленая, д. 1, г. Казань, 420043, Россия
E-mail: Muhamedova-inzilija@mail.ru

Тазюков Булат Фэридович, кандидат физико-математических наук, заместитель директора по научной деятельности Института математики и механики им. Н.И. Лобачевского

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: Bulat.Tazioukov@kpfu.ru

ISSN 2541-7746 (Print)

ISSN 2500-2198 (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA.
SERIYA FIZIKO-MATEMATICHESKIE NAUKI
(Proceedings of Kazan University. Physics and Mathematics Series)

2022, vol. 164, no. 2–3, pp. 194–205

ORIGINAL ARTICLE

doi: 10.26907/2541-7746.2022.2-3.194-205

Modeling of Fiberglass Degradation Process under Stresses and Alkaline Environment

R.A. Kayumov^{a}, I.Z. Mukhamedova^{a**}, B.F. Tazyukov^{b***}*^a*Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, 420043 Russia*^b*Kazan Federal University, Kazan, 420008 Russia*E-mail: ^{*}*Kayumov@rambler.ru*, ^{**}*Mukhamedova-inzilija@mail.ru*,^{***}*Bulat.Tazioukov@kpfu.ru*

Received April 12, 2022

Abstract

The constitutive relations for fiberglass were obtained. New methods were developed to analyze its behavior as microdamage accumulates and under the exposure to an aggressive alkaline environment. A finite element model was built to assess the stress-strain state of a fiberglass panel for predicting its durability in response to stresses and an alkaline environment. The convergence of the solutions was studied depending on the number of finite elements and the time step. The behavior of a fiberglass panel was analyzed with and without considering its deformations. The results show that the damage accumulated in a fiberglass panel must be taken into account to improve its durability.

Keywords: fiberglass, technique, finite element model, durability, alkaline environment, damage parameter, numerical experiment

Acknowledgments. This study was supported by the Kazan Federal University Strategic Academic Leadership Program (PRIORITY-2030).

Figure Captions

Fig. 1. Model of a fiberglass panel in an alkaline environment.

Fig. 2. Finite element model of a fiberglass panel one fourth.

Fig. 3. Dependence of durability t^* on the number of finite elements (a) and the number of time intervals n (b).Fig. 4. Dependence of damage ω on time t for three cases of numerical experiments.Fig. 5. Dependence of damage ω on time t at different values of a set deflection limit in the middle of the span of a fiberglass panel.

References

1. Seredina O.S. Management of culvert corrosion in the USA. *Vestn. Volgogr. Arkhit.-Stroit. Univ. Ser. Stroit. Arkhit.*, 2012, no. 27, pp. 106–110. (In Russian)
2. Elsayed T., Haggag H., El Hashimy A., Hass A. Behavior of slabs reinforced using square GFRP rebars. *Izv. Kazan. Gos. Arkhit.-Stroit. Univ.*, 2010, no. 1, pp. 78–88.

3. Umanskii A.M., Bekker A.T. Prospects of composite reinforcement. *Vestn. Inzh. Shk. Dal'nevost. Fed. Univ.*, 2012, no. 2, pp. 7–13. (In Russian)
4. Ptukhina I.S., Turkebaev A.B., Tleukhanov D.S., Bizhanov N.Zh., Dalabaeva A.E., Dalabaev A.S. Efficiency of innovative composite materials in construction. *Stroit. Unikal'nykh Zdanii Sooruzh.*, 2014, no. 9, pp. 84–96. (In Russian)
5. Yazdanbakhsh A., Bank L.C., Chen C. Use of recycled FRP reinforcing bar in concrete as coarse aggregate and its impact on the mechanical properties of concrete. *Constr. Build. Mater.*, 2016, vol. 121, pp. 278–284. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.165.
6. Park J.S., Lim A.R., Kim J., Lee J.Y. Bond performance of fiber reinforced polymer rebars in different casting positions. *Polym. Compos.*, 2016, vol. 37, no. 7, pp. 2098–2108. doi: 10.1002/pc.23388.
7. Staroverov V.D., Baroev R.V., Tsurupa A.A., Krishtalevich A.K. Fiber-reinforced polymer rebar: Problems of application. *Vestn. Grazhdanskikh Inzh.*, 2015, no. 3, pp. 171–178. (In Russian)
8. Ustinov V.P., Ustinov B.V. A study on the physical and mechanical characteristics of composite polymers (CP). *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Stroit.*, 2009, nos. 11–12, pp. 118–125. (In Russian)
9. Dronov A.V., Drokin S.V., Frolov N.V. Experimental investigation of fiberglass-reinforced plastic rebar embedded in concrete. *Prom. Grazhdanskoe Stroit.*, 2016, no. 11, pp. 80–83. (In Russian)
10. Mikhailov K.V. Prospects of using non-metal rebar in prestressed concrete structures. *Beton Zhelezobeton*, 2003, no. 5, pp. 29–30. (In Russian)
11. Vlasov V.M., Bertov V.M., Dolgachev A.D., Donovan A.V., Lugovoi A.N. Using concrete beams reinforced with steel and glass fiber rebar. *Izv. VNIIG im. B.E. Vedeneeva*, 2005, vol. 244, pp. 34–37. (In Russian)
12. Avdeeva A., Shlykova I., Antonova M., Barabanschikov Y., Belyaeva S. Reinforcement of concrete structures by fiberglass rods. *Matec Web Conf.*, 2016, vol. 53, art. 01006, pp. 1–5. doi: 10.1051/mateconf/20165301006.
13. Kuz'mina A.Yu., Pyzh'yanova D.V., Salov A.S. Adding modern rebar structures for efficient construction. *Problemy stroitel'nogo kompleksa Rossii: Materialy XIX Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. [Problems of Russian Construction Sector: Proc. XIX Int. Sci.-Tekh. Conf.]*. Ufa, Ufim. Gos. Neft. Tekh. Univ., 2015, pp. 106–110. (In Russian)
14. Ostroukh A.V., Nedoseko I.V., Surkova N.E., Fattakhov M.M., Nuruev Y.E., Salov A.S. Automated information-analytical system for dispatching control of transportation concrete products. *Int. J. Appl. Eng. Res.*, 2015, vol. 10, no. 19, pp. 40063–40067.
15. Kayumov R.A., Sharafutdinova A.A. About an estimation of operational durability of building designs from fiberglass. *Izv. Kazan. Gos. Arkhit.-Stroit. Univ.*, 2017, no. 2, pp. 114–123. (In Russian)
16. Blaznov A.N., Volkov Yu.P., Lugovoi A.N., Savin V.F. Predicting the rupture strength of fiberglass rebar. *Mekh. Kompoz. Mater. Konstr.*, 2003, vol. 9, no. 4, pp. 579–592. (In Russian)
17. Blaznov A.N., Petrov M.G., Russkikh G.I., Savin V.F. Prediction of structural strength of unidirectionally reinforced fiberglass rods. *Mekh. Kompoz. Mater. Konstr.*, 2007, vol. 13, no. 1, pp. 97–112. (In Russian)
18. Blaznov A.N., Volkov Yu.P., Lugovoi A.N., Savin V.F. Tests of long-term strength of composite cores. *Zavod. Lab. Diagn. Mater.*, 2006, vol. 72, no. 2, pp. 44–52. (In Russian)
19. Savin V.F., Lugovoi A.N., Volkov Yu.P., Blaznov A.N. Buckling as a method for determining the mechanical properties of materials. *Zavod. Lab. Diagn. Mater.*, 2006, vol. 72, no. 1, pp. 55–58. (In Russian)

20. Savin V.F., Lugovoi A.N., Blaznov A.N., Lugovoi A.N., Blaznov A.N., Volkov Yu.P., Khe A.I. A study of the mechanical properties of fiberglass rods by buckling. *Mekh. Kompoz. Mater. Konstr.*, 2004, no. 4, pp. 499–516. (In Russian)
21. Startsev O.V., Blaznov A.N., Petrov M.G., Atyasova E.V. A life study of polymer composite materials under static loads. *Vse Mater. Entsikl. Sprav.*, 2019, no. 6, pp. 9–20. (In Russian)
22. Lebedev M.P., Startsev O.V., Kychkin A.K. The effects of aggressive environments on the mechanical properties of basalt plastics. *Heliyon*, 2020, vol. 6, no. 3, art. e03481, pp. 1–9. doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e03481.
23. Kuznetsova L.G. Increasing the durability of fiberglass rebar. *Beton Zhelezobeton*, 1973, no. 3, pp. 30–31. (In Russian)
24. Rozental' N.K. Corrosion resistance of polymer composites in the alkaline environment of concrete. *Beton Zhelezobeton*, 2002, no. 3, pp. 20–23. (In Russian)
25. Moshchanskii N.A. About the durability of fiberglass rebar in concrete. *Beton Zhelezobeton*, 1965, no. 9, pp. 33–34. (In Russian)
26. Blaznov A.N., Savin V.F., Krasnov A.A. Predicting the strength of composite rods in alkaline environment. *Yuzhn.-Sib. Nauchn. Vestn.*, 2014, vol. 4, no. 8, pp. 12–14. (In Russian)
27. Kuzina T.V., Medvedeva L.Yu., Chizhevskii V.V. Durability of fiberglass rebar in multi-layered building envelopes. *Korroziya: Mater., Zashch.*, 2005, no. 1, pp. 41–43. (In Russian)
28. Ustinov V.P., Petrov M.G., Savin V.F., Ustinov B.V. Predicting the durability of fiberglass rebar in triple-layer wall panels. *Vestn. Sib. Gos. Univ. Putei Soobshch.*, 2002, no. 4, pp. 115–123. (In Russian)
29. Sawpan M.A. Effects of alkaline conditioning and temperature on the properties of glass fiber polymer composite rebar. *Polym. Compos.*, 2016, vol. 37, no. 11, pp. 3181–3190. doi: 10.1002/pc.23516.
30. Vereshchagin A.L., Zharinov Yu.B., Markova A.V., Savin V.F. Corrosive destruction of stressed glass-plastic rods. *Mekh. Kompoz. Mater. Konstr.*, 2007, vol. 17, no. 3, pp. 432–451. (In Russian)
31. Markova A.V., Savin V.F., Zharinov Yu.B., Blaznov A.N. Testing stressed rods from polymer composites for corrosion resistance. *Zavod. Lab. Diagn. Mater.*, 2010, vol. 76, no. 11, pp. 56–59. (In Russian)
32. Startseva L.T., Panin S.V., Startsev O.V., Krotov A.S. Moisture diffusion in glass-fiber-reinforced plastics after their climatic aging. *Dokl. Phys. Chem.*, 2014, vol. 456, pt. 1, pp. 77–81. doi: 10.1134/S0012501614050054.
33. Kablov E.N., Startsev O.V. Climatic aging of aviation polymer composite materials: I. Influence of significant factors. *Russ. Metall. (Metally)*, 2020, vol. 2020, no. 4, pp. 364–372. doi: 10.1134/S0036029520040102.
34. Rabotnov Yu.N. *Polzuchest' elementov konstruksii* [Creep of Structural Elements]. Moscow, Nauka, 1965. 725 p. (In Russian)

Для цитирования: Каюмов Р.А., Мухамедова И.З., Тазюков Б.Ф. Моделирование процесса деградации стеклопластика под действием напряжений и щелочной среды // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – 2022. – Т. 164, кн. 2–3. – С. 194–205. – doi: 10.26907/2541-7746.2022.2-3.194-205.

For citation: Kayumov R.A., Mukhamedova I.Z., Tazyukov B.F. Modeling of fiberglass degradation process under stresses and alkaline environment. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki*, 2022, vol. 164, no. 2–3, pp. 194–205. doi: 10.26907/2541-7746.2022.2-3.194-205. (In Russian)