УДК 691.175

Сулейманов Альфред Мидхатович

доктор технических наук, профессор

E-mail: sulejmanov@kgasu.ru **Туйсина Екатерина Булатовна**

аспирант

E-mail: katerina.tuysina@yandex.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

Бикмухаметов Рушан Рузалевич

мастер цеха

E-mail: <u>rbiktov@mail.ru</u> **ООО Казанский ДСК**

Адрес организации: 420087, Россия, г. Казань, ул. Аделя Кутуя, д. 118

Моделирование работы полимерных композиционных материалов в напряженно-деформированном состоянии под воздействием агрессивных сред. Часть 1. Разработка методики и испытательного стенда

Аннотация

Постановка задачи. Совместное воздействие на полимерные композиционные материалы эксплуатационных факторов в напряженно-деформированном состоянии значительно ускоряет их скорость старения и разрушения.

Целью исследования является разработка метода моделирования работы полимерных композиционных материалов в напряженно-деформированном состоянии под воздействием агрессивных сред.

Результаты. Разработана методика и модернизирована установка для моделирования старения и разрушения полимерной композитной арматуры для армирования цементных бетонов.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в развитии методологии прогнозирования долговечности полимерных композиционных материалов в заданных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: полимерная композитная арматура, моделирование старения и разрушения, методика и установка.

Введение

При проектировании новых полимерных композиционных материалов (ПКМ) и разработке технологии производства важнейшим этапом является их паспортизация по техническим характеристикам и проверка на работоспособность в назначенных условиях эксплуатации. Первичная проверка работоспособности материалов изделий проводится, как правило, в лабораторных условиях по специально разработанным режимам испытания, это так называемые ускоренные методы испытания (УКИ), моделирующие условия эксплуатации.

Для обеспечения эффективности УКИ ключевым условием является подобие процессов: изменение состава, структуры, свойств испытываемого материала, — в натурных и лабораторных условиях при максимальном сокращении времени испытания. Как было показано в работе [1], ошибки в прогнозах долговечности материалов и изделий по методам УКМ могут происходить из-за отличия механизмов старения и разрушения материалов в результате завышенного коэффициента ускорения — κ_y , который определяется как отношение времени испытания в натурных условиях — τ_{u} , к времени лабораторных испытаний — $\tau_{yc\kappa}$.

Значительные ошибки в прогнозах долговечности материалов и изделий по результатам УКИ происходят также из-за некорректного моделирования условий эксплуатации: отсутствие учета синергетического эффекта воздействующих факторов, ответственных за старение и, как следствие, разрушение материала.

Существенным недостатком современных стандартов по УКИ является раздельное циклическое воздействие искусственных факторов. Это вынужденная мера при моделировании эксплуатационных факторов, поскольку на рынке отсутствуют такие климатические камеры, в которых можно воспроизводить несколько факторов одновременно и моделировать их синергетическое воздействие аналогично натурным условиям. Известно, что напряженно-деформированное состояние (НДС) на порядок увеличивает скорость климатического старения ПКМ [2-6]. Не смотря на это в серийно выпускаемых климатических камерах различных производителей: ATLAS, Q-Lab, WEISS Umwelttechnik GmbH и др., — отсутствуют модули силонагружения образцов. Для адекватного моделирования условий эксплуатации различных материалов, как правило, приходится модернизировать и доукомплектовывать стандартные климатические камеры различными механизмами силонагружения образцов [7].

В данной работе описывается возможность усовершенствования современных методов УКИ для ПКМ. На примере полимерной композитной арматуры (ПКА) разработана методика и модернизированы испытательные стенды для моделирования старения ПКА в цементных бетонах.

Разработка методов УКИ, как было показано в работе [1], состоит из нескольких этапов:

- выявление энергетических значений факторов ответственных за старение и разрушение материала и разработка карты эксплуатации;
- трансформация энергетических значений эксплуатационных факторов в усиленные, но адекватные по механизмам воздействия, лабораторные режимы испытания;
- разработка требований к аппаратурному обеспечению для моделирования лабораторных режимов УКИ.

Условия работы ПКА в цементных бетонах

При совместной работе с цементным бетоном основными факторами, ответственными за старение и разрушения ПКА, являются:

- щелочная среда поровой жидкости цементного бетона с показателем pH ~13;
- температура;
- механические напряжения.

При разработке методов УКИ необходимо изучать как раздельное, так и совместное воздействие вышеперечисленных факторов при их различных интенсивностях. Причем увеличивая, до определенного уровня, интенсивность температуры и механических напряжений, при постоянной концентрации щелочной среды, можно ускорять процессы старения и разрушения и, таким образом, существенно сокращать время лабораторных испытаний ПКА. Это хорошо зарекомендовавшие себя методы температурно-временной (ТВА) и напряженно-временной аналогий (НВА) [8, 9], которые также успешно используются при прогнозировании долговечности строительных материалов [10].

Требования к стенду для моделирования условия эксплуатации ПКА

При проектировании и разработке стенда для моделирования условий эксплуатации ПКА необходимо учитывать следующие требования:

- небольшие размеры стенда, позволяющие изменять условия испытания путем перемещения стенда между камерами с различными искусственными факторами;
- быть компактными в отличие от классических методов испытания образцов на длительную прочность с использованием систем гирь и рычагов, которые не позволяют перемещать их в процессе экспонирования. Также за счет больших габаритов установок одновременное испытание нескольких серий образцов является затруднительным;
- регулировать НДС в образцах во всём диапазоне эксплуатационных нагрузок вплоть до разрушения;
 - учитывать специфику механики разрушения ПКА.

Большинство стандартизованных методов испытания ПКМ разработаны для гомогенных по структуре пластмасс [11, 12], они заимствованы от металлов и сплавов,

являющихся изотропными материалами, и не учитывают анизотропию свойств армированных ПКМ. Вследствие большой разницы прочности вдоль волокон и межволоконной сдвиговой прочности к ПКМ предъявляются особые требования по креплению образцов в захватах и их центрированию. В случае чрезмерного зажима образцов в металлических захватах испытательного оборудования может произойти расщепление образов, а при слабом зажиме — высказывание из захватов без разрушения материала [13]. При появлении эксцентриситета в результате неточной установки образцов в захватах наблюдается расслоение, разрушение под углом, срез, разрушение в нерабочей зоне или захватах испытательных машин.

Учитывая специфику механики разрушения ПКА и требования к модулю силонагружения в климатических камерах, в качестве метода задания длительной статической нагрузки, был принят метод продольного изгиба по ГОСТ 32492-2015 «Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Методы определения физико-механических характеристик». Этот метод обладает рядом достоинств, как для кратковременных, так и для длительных испытаний, подробное описание приводится в работах Блазнова А.Н. и др. [11, 12]:

- для разрушения ПКА требуется нагрузка приблизительно в 60 раз меньшая, чем нагрузка, требующаяся для его разрушения в условиях простого растяжения или сжатия;
- ПКА ведет себя как упругий материал, близкий к идеальному, благодаря чему продольно изогнутый до заданного уровня прогиба образец сам выполняет функцию тарированной пружины, «консервирующей» на длительное время заданный уровень нагрузки (продольной сжимающей силы);
- при продольном сжатии упругих материалов величина продольной силы при увеличении прогиба с момента начала появления его вплоть до разрушения практически не зависит от значения прогиба. Поэтому процедура нагружения образца до заданного уровня напряжения может быть сведена к простому деформированию его до заданного уровня деформации;
- в отличие от чистого растяжения или сжатия для увеличения или уменьшения напряжения требуются достаточно большие перемещения концов образца. Это резко снижает погрешности установки заданного напряжения, которые могут быть допущены вследствие погрешностей, возникающих при установке и контроле заданного уровня деформации;
- учесть и компенсировать возможные изменения напряжения в ходе испытания, вызванные изменением жесткости образца-пружины, можно тарировкой образца как пружины в ходе испытания. При изменении жесткости образца на измеренное значение достаточно увеличить его прогиб до уровня, восстанавливающего заданную величину напряжения;
- снижение, требующейся при испытании, нагрузки и замена процедуры приложения к образцу нагрузки на процедуру его деформирования позволяют применять при испытаниях компактные многопозиционные испытательные стенды;
- образец разрушается в средней части, которая находится на значительном удалении от места приложения нагрузки, следовательно, контактные напряжения, возникающие в зоне передачи нагрузки от нагружающего механизма к образцу, не оказывают существенного влияния на процесс разрушения образца;
- материал подвергается растяжению (в растянутой зоне), сжатию (в сжатой зоне) и сдвигу слоев по всему сечению, благодаря чему имеется возможность провести комплексную оценку прочности материала и выявить, какой вид нагружения является наиболее опасным для материала;
- ПКА ведет себя как упругий материал, близкий к идеальному, поэтому при обработке результатов испытаний (расчете напряжений и деформаций) имеется возможность применять простые формулы, известные из монографий по сопротивлению материалов, дополнив их простыми уточняющими расчетными или эмпирическими

Сущность метода продольного изгиба заключается в следующем (рис. 1, а). ПКА продольно изгибается между двумя опорами, чтобы обеспечить в крайних волокнах среднего сечения образца заданное значение растягивающих напряжений – σ . При этом

концы образца ПКА должны опираться шарнирно. Максимальные напряжения, возникающие в названной зоне образца, вычисляют по формуле:

$$\sigma = \pm \frac{P * f}{w},\tag{1}$$

где P – продольно сжимающая сила, приложенная к концам образца;

f – прогиб продольно изгибаемого образца;

w – момент сопротивления поперечного сечения образца.

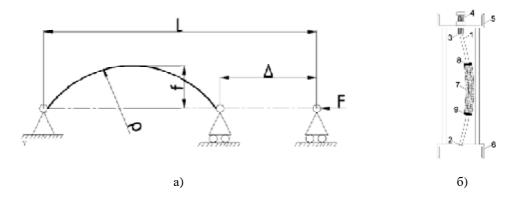


Рис. 1. а) Схема испытания образцов ПКА методом продольного изгиба; б) Схема модуля силонагружения ПКА: 1 – образец ПКА с полусферическими торцами; 2 – лунка полусферической формы в основании стенда;

3 – полусферическая лунка в основании силонагружающего элемента; 4 – силонагружающий элемент, болт, 5 – верхний корпус стенда с приваренными гайками для установки силонагружающего элемента; 6 – основание стенда; 7 – силиконовая трубка; 8 и 9 – сальники (иллюстрация авторов)

$$f = L \frac{\sqrt{1(8 + 0.2528^2 + 0.0778^3 + 0.0798^4)}}{\pi(1 + 0.5048 + 0.2328^2 + 0.3158^3)}.$$
 (2)

где $\delta = (L - L_{on})/L$ – относительное сближение концов стержня;

L – длина образца;

 L_{on} – расстояние между опорами продольно изогнутого образца.

Момент сопротивления поперечного сечения образца w, вычисляют по формуле:

$$w = \frac{\pi * d^3}{32},\tag{3}$$

где d – диаметр образца.

Вышеприведенные формулы справедливы для образцов круглого поперечного сечения из материалов, работающих в линейно упругой области НДС. Для отслеживания релаксационных процессов и появления первых признаков разрушения в напряженном образце, стенд необходимо доукомплектовывать датчиками для замера параметров нагрузки и прогиба -P и f в формуле (1) соответственно. Рекомендуемая длина образца при этом равна 36d. Таким образом, для создания НДС методом продольного изгиба необходимы образцы примерно в 2-3 раза меньше, чем при испытании на растяжение.

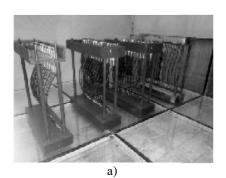
Общий вид установки для длительных статических испытаний методом продольного изгиба изображен на рис. 1 б. Образец ПКА с торцами полусферической формы устанавливается в полусферические лунки в основании стенда, изготовленного из швеллера. При этом радиус лунки должен обеспечивать отсутствие контакта образца с основанием стенда в максимально изогнутом состоянии, поскольку это приводит к изменению НДС. Силонагружающий модуль — винт с полусферической лункой в основании. Предварительно осуществляется тарировка винта и составляется шкала «количество оборотов — перемещение» — это значительно упрощает процесс нагружения образцов, поскольку для задания требуемого уровня напряжений по методу продольного изгиба необходимо обеспечить определенный уровень деформации образца, который определяется сближением его концов, т.е. перемещением силонагружающего элемента.

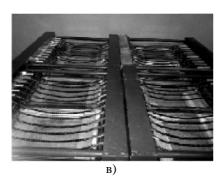
Моделирования щелочной среды бетона обеспечивалось раствором щелочи с составом, согласно ГОСТ 31938-2012 «Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Общие технические условия». Для того чтобы емкость со щелочью не оказывала влияние на деформированное состояние образцов, а также позволяла разместить на одном стенде максимальное количество образцов, в качестве емкости были выбраны гибкие силиконовые трубки с диаметром 5d. Воздействие щелочи обеспечивалось в средней рабочей зоне образца, длина трубки составляла 0,5L.

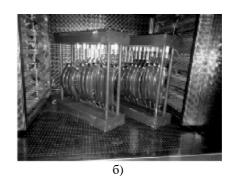
Сальники для фиксации трубки на образце изготавливались из резины, стойкой к воздействию щелочи. Размеры сальников соответствовали внутреннему диаметру силиконовой трубки, дополнительная фиксация сальника обеспечивалась затяжными стальными хомутами. Перед проведением длительных испытаний ПКА производилась оценка щелочестойкости сальников и силиконовых трубок в условиях повышенных температур: выдержка при 80°C в течение 30 суток. При этих условиях изменения химического состава и влияния на уровень рН раствора выявлено не было, следовательно, применение такой оснастки не будет вносить погрешностей в результаты испытаний ПКА. Плюсом использования упругих материалов для щелочного раствора является то, что это позволяет без воздействия на образец проверять уровень рН раствора на протяжении всего срока испытания. Для этой процедуры можно использовать шприц, при этом до начала отбора проб необходимо обеспечить подток воздуха для свободного забора жидкости, например, установив иглу шприца или узкую стеклянную трубку в сальник.

Стенд для ускоренных испытаний ПКА

По вышеприведенному алгоритму была изготовлена серия стендов, каждый из которых позволяет разместить на себе до 10 образцов. Конфигурация стенда предполагает производить нагружение каждого образца индивидуально, что позволяет на одном стенде испытывать разные образцы, задавать разные уровни деформаций, использовать различные составы агрессивных сред и т.д. Компактность (рис. 2а) и мобильность модульного стенда позволяет помещать установку в климатические камеры с различными искусственными факторами (рис. 2б), перемещать модульный стенд без изменения НДС образцов при проведении циклических испытаний (рис. 2в-г) и для микроскопических исследований и т.д.







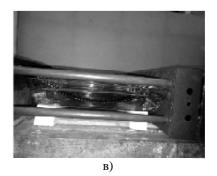


Рис. 2. Фото модульных стендов при различных видах испытаний: а – компактное расположение стендов; б – мобильность стендов – помещение в рабочем состоянии в термобарокамеру; в, г – циклические испытания при нормальной температуре в растворах щелочи (иллюстрации авторов)

Заключение

- 1. Показаны существенные недостатки современных стандартов УКИ различных материалов и изделий, заключающиеся в раздельном циклическом воздействии искусственных факторов, что связано с отсутствием на рынке климатических камер, где одновременно воспроизводятся климатические факторы и механические напряжения.
- 2. Исходя из условий работы ПКА в цементных бетонах, выработаны требования к методам и аппаратурному обеспечению УКИ.
- 3. Для моделирования НДС образцов ПКА принят метод продольного изгиба, позволяющий существенно упростить модуль силонагружения, а также повысить точность воспроизведения данного эксплуатационного фактора при лабораторных режимах испытания.
- 4. Разработана методика и модульный испытательный стенд для моделирования старения и разрушения ПКА в цементных бетонах, позволяющий изменять условия испытания путем наращивания функциональных блоков и перемещая в климатические камеры с различными искусственными факторами. Стенд позволяет испытывать ПКА при воздействии механических напряжений, жидких агрессивных сред и температур в широком диапазоне. Испытания можно проводить как при раздельном, так и при совместном воздействии факторов.

Список библиографических ссылок

- 1. Сулейманов А. М. Актуальные задачи в прогнозировании долговечности полимерных строительных материалов // Строительные материалы. 2015. № 5. С. 10–13.
- 2. Helbling C., Karbhari V. M. Durability Assessment of Combined Environmental Eposure and Bending: Proc. of 7th Int. Symp. on Fiber Reinforced Polym. Reinf. For Reinf. Concrete Structures / New Orlean, Loisiana, USA. 2005. Nov., 7010. P. 1397–1418.
- 3. Roylance D., Roylance M. Weathering of Faber-Reinforced Epoxy Composites // Polym. Eng. and Sci. 1978. V. 18. № 4. P. 249–254.
- 4. Kim R. H., Broutman L. J. Effect of Moisture and Stress on the Degradation of Graphite Fiber Reinforced Epoxies: Deform. Yield and Fract. Polym., 4th Int. Conf. / Cambridge. London, 1979. P. 231–235.
- 5. Reynolds T. G. Accelarated Tests of Environmental Degradation in Composite Materials : M.S. Thesis / University of Bristol. Bristol, UK. 1998. 177 p.
- 6. Ефимов В. А., Кириллов В. Н., Добрянская О. А., Николаев Е. В., Шведкова А. К., Коренькова Т.Г., Деев И.С. К вопросу о методике проведения натурных климатических испытаний полимерных композиционных материалов : сб. докладов восьмой научной конференции по гидроавиации «Гидроавиасалон-2010» / ВИАМ. Москва, 2010. С. 102–106.
- 7. Сулейманов А. М. Установка для моделирования воздействия эксплуатационных факторов на материалы мягких оболочек // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2005. Т. 71. № 12. С. 44–46.
- 8. Уржумцев Ю. С., Максимов Р. Д. Прогностика деформативности полимерных материалов. Рига: Зинатне, 1975. 415 с.
- 9. Уржумцев Ю. С. Прогнозирование длительного сопротивления полимерных материалов. М.: Наука, 1982. 222 с.
- 10. Смирнов Д.С., Рахимов Р. З., Габидуллин М. Г., Каюмов Р. А., Стоянов О. В. Испытания и прогнозная оценка долговечности уплотнительной резины герметизирующих стыков блоков обделки метро // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 15. С. 138–144.
- 11. Блазнов А. Н., Савин В. Ф., Волков Ю. П., Рудольф А. Я., Старцев О. В., Тихонов В. Б. Методы механических испытаний композиционных стержней: монография. Бийск: Алт. гос. техн. ун-т, 2011. 314 с.

- 12. 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. № 2. С. 44–52.
- 13. Тарнопольский Ю. М., Кинцис Т. Я. Методы статических испытаний армированных пластиков. М.: Химия, 1981. 271 с.

Suleimanov Alfred Midhatovich

doctor of technical sciences, professor

E-mail: sulejmanov@kgasu.ru **Tuisina Ekaterina Bulatovna**

post-graduate student

E-mail: katerina.tuysina@yandex.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

BikmahametovRushanRusalevich

workshop foreman E-mail: <u>rbiktov@mail.ru</u> **OOO «Kazan DSK»**

The organization address: 420087, Russia, Kazan, Adelya Kutuya st., 118

Modeling of polymer composite materials in the stress-strain state under the influence of aggressive media. Part 1. Development of methods and test bench

Abstract

Problem statement. The combined effect of operational factors on polymer composite materials (PCM) in the stress-strain state significantly accelerates their rate of aging and destruction.

The aim of the study is to develop a method for modeling the work of polymer composite materials in the stress-strain state under the influence of aggressive media.

Results. The technique is developed and the installation for simulation of aging and destruction of polymer composite reinforcement for cement concrete reinforcement is modernized.

Conclusions. The significance of the results for the construction industry is the development of the methodology for predicting the durability of polymer composite materials in the specified operating conditions.

Keywords: polymer composite reinforcement, simulation of aging and destruction, methods and installation.

References

- 1. Suleymanov A. M. Actual problems in durability prediction polymeric building materials // Stroitelnie materiali. 2015. № 5. P. 10–13.
- 2. Helbling C., Karbhari V. M. Durability Assessment of Combined Environmental Exposure and Bending: Proc. of 7th Int. Symp. on Fiber Reinforced Polym. Reinf. For Reinf. Concrete Structures / New Orlean, Loisiana, USA. 2005. Nov., 7010. P. 1397–1418.
- 3. Roylance D., Roylance M. Weathering of Faber-Reinforced Epoxy Composites // Polym. Eng. and Sci. 1978. V.18, № 4. P. 249–254.
- 4. Kim R. H., Broutman L. J. Effect of Moisture and Stress on the Degradation of Graphite Fiber Reinforced Epoxies: Deform. Yield and Fract. Polym., 4th Int. Conf. / Cambridge. London, 1979. P. 231–235.
- 5. Reynolds T. G. Accelarated Tests of Environmental Degradation in Composite Materials : M.S. Thesis / University of Bristol. Bristol, UK. 1998. 177 p.

- 6. Efimov V. A., Kirillov V. N., Dobryanskaya O. A., Nikolaev E. V., Shvedkova A. K., Korenkova T. G., Deev I. S. On the issue of the method of conducting full-scale climatic tests of polymer composite materials: a collection of reports of the eighth scientific conference on hydroaviation «Gidroaviasalon-2010» / VIAM. Moscow, 2010. P. 102–106.
- 7. Suleymanov A. M. Installation for simulating the impact of operational factors on material soft shells // Zavodskaya laboratoriya. Diagnostica materialov. 2005. V. 71. № 12. P. 44–46.
- 8. Urzhumtsev Y. S., Maksimov R. D. Prognostics of deformations of polymeric materials. Riga: Zinatne, 1975. 415 p.
- 9. Urzhumtsev Yu. S. Prediction of long-term resistance of polymeric materials. M.: Nauka, 1982. 222 p.
- 10. Smirnov D. S., Rakhimov R. Z., Gabidullin M. G., Kayumov R. A., Stoyanov O. V. Testing and predictive assessment of the durability of the sealing rubber sealing the joints between the blocks lining the subwav // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2014. V. 17. № 15. P. 138–144.
- 11. Blaznov A.N., Savin V.F., Volkov Yu.P., Rudolf A.Ya., Startsev O.V., Tikhonov V.B. Methods of mechanical testing of composite rods. Biysk: Altay State Tech. University, 2011. 314 p.
- 12. Blaznov A. N., Volkov Yu. P., Lugovoy A. N., Savin V. F. Tests for long-term strength of rods made of composite materials // Zavodskaya laboratoriya. Diagnostica materialov. 2006. № 2. P. 44–52.
- 13. Tarnopolsky Yu. M., Cincis T. Y. Static test methods for reinforced plastics. M.: Chemistry, 1981. 271 p.