

УДК 539.375

## ВЛИЯНИЕ АГРЕССИВНОЙ ЩЕЛОЧНОЙ СРЕДЫ НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ТЕХНИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

*А. Г. Демешкин, А. А. Шваб*

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, 15.

E-mail: schwab@ngs.ru

*Рассматриваются вопросы, связанные с прочностными свойствами непрерывных волокон из базальта, карбона и стеклопластика под воздействием агрессивных щелочных сред в растворе гидроксида калия. Исследования проводились на жгутах (ровингах), имеющих 4000 нитей непрерывного волокна. Показано влияние агрессивной среды на прочность и структуру поверхностного слоя волокон. Проведён сравнительный анализ влияния щелочной среды на прочность материалов.*

**Ключевые слова:** базальт, стекло, карбон, щёлочь, волокно, нить, жгут, прочность, композит, арматура.

В работе исследуется влияние агрессивной щелочной среды на прочностные свойства непрерывных технических волокон, а именно волокон из базальта, стекла и углепластика (карбона). Интерес к этой проблеме возник с внедрением фибробетона и неметаллической арматуры [1]. Фибробетон — дисперсно-армированный композиционный материал, упрочненный короткими волокнами (фибрами), равномерно распределенными по объему. Неметаллическая арматура представляет собой стержень из пучка волокон, покрытый синтетическими смолами (эпоксидной, эпоксифенольной, полиэфирной и др.). Как известно, при эксплуатации в агрессивных средах бетонных изделий происходит коррозия стальной арматуры, что влечет ограничение сроков эксплуатации изделий. Этим объясняется повышенный интерес к замене стальной арматуры на неметаллическую. Более того, бетон, содержащий неметаллическую арматуру, отличается высокими эксплуатационными свойствами, особенно повышенной прочностью при изгибе и растяжении, ударной прочностью и трещиностойкостью.

Одним из препятствий для широкого внедрения фибробетона и неметаллической арматуры является малоизученность стойкости волокон в цементно-щелочной среде.

Из неметаллических волокон наиболее доступными по экономическим показателям являются стеклянные и базальтовые волокна. Одним из способов повышения стойкости стеклянной фибры является применение щелочестойкого волокна с высоким содержанием оксида циркония, однако высокая стоимость сдерживает его внедрение.

В настоящей работе изучается влияние щелочной среды на прочностные свойства непрерывных волокон из базальта, стекла и карбона. На основе этого проводится сравнительный анализ падения прочности материалов после

---

*Александр Григорьевич Демешкин (к.ф.-м.н.), старший научный сотрудник, отдел механики деформируемого твёрдого тела. Альберт Александрович Шваб (д.ф.-м.н., проф.), ведущий научный сотрудник, отдел механики деформируемого твёрдого тела.*

воздействия щелочного раствора. Материал для испытаний был представлен в виде ровинга (плеть), имеющего 4000 нитей.

В настоящее время проведение испытаний на прочность отдельного волокна связано с определенными трудностями. Так, диаметры волокон находятся в интервале от 7 мкм до 20 мкм, поэтому для снятия диаграмм «напряжение – деформации» требуются специальные уникальные разрывные установки [2]. Кроме того, в ровинге диаметры волокон имеют некоторый разброс, что затрудняет вычисление предельных нагрузок для ровинга по данным для отдельного волокна. Если испытывать на прочность непосредственно ровинг, то диаграмма «нагрузка ( $p$ ) – деформация ( $\varepsilon$ )» имеет пологую ниспадающую ветвь и площадку пластичности, что соответствует пластическим материалам и нехарактерно для испытываемых [3]. В данной работе, чтобы избежать вышеупомянутых недостатков, была использована методика изготовления образцов из ровинга, предложенная в [3]. Это позволило прочностные свойства образцов из ровинга приблизить к свойствам нити. При этом на кривых «нагрузка – деформация» отсутствовала площадка пластичности.

Испытания проводились для карбона, Е-стекла и базальта. Базальт имел следующий процентный химический состав:  $\text{SiO}_2 = 52,8$ ;  $\text{TiO}_2 = 0,5$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 17,2$ ;  $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 8,9$ ;  $\text{MgO} = 6,3$ ;  $\text{CaO} = 7,1$ ;  $\text{Na}_2\text{O} = 2,2$ ;  $\text{K}_2\text{O} = 1,6$ .

Программа испытаний состояла в следующем. Для оценки влияния щелочной среды был использован раствор гидроокиси калия (KOH) с концентрацией один моль. Этот раствор имеет показатель  $\text{pH} = 12,57$ . Эксперименты велись при температуре  $40^\circ\text{C}$ . Испытуемый материал помещался в сосуд с раствором, который находился в автоклаве. Затем, чтобы оценить влияние времени пребывания в растворе на прочностные свойства, материал извлекался из раствора через 7, 14 и 21 сутки. Из этого материала изготавливались образцы для испытаний. Так, были изготовлены образцы из трех материалов: базальта, стеклопластика и карбона. Образцы для испытаний представляли собой жгут (ровинг), который зажимался на концах специальными картонными склейками. Рабочая длина образца была 100 мм. Для каждого временного параметра, а именно, начального состояния материала и его состояния через 7, 14, 21 сутки изготовлялось по 5 образцов из трех материалов. Испытания на прочность проводились на разрывной машине Zwick/Roell 8506. Скорость нагружения во всех экспериментах была постоянна и составляла  $10^{-3}$  сек $^{-1}$ .

При испытаниях снималась диаграмма «нагрузка – деформация». Практически пересчет на диаграмму «напряжение – деформация» был невозможен по причине различного диаметра волокон в одном ровинге. Поэтому эксперименты показывали относительное изменение прочности для каждого материала, т. е. для базальта, стеклопластика и карбона. Далее на рисунках показаны диаграммы для каждого материала при различных временах выдержки в растворе.

Одновременно для визуальной оценки изменения поверхности волокон были сделаны фотографии на электронном сканирующем микроскопе LEO 412. Так как материал волокон не является токопроводящим, для получения фотографий предварительно было проведено термическое напыление меди на поверхность образцов. Заметим, что на фотографиях значение P2a соответствует измеренному диаметру волокна, а P2b – характеристика наклона образца относительно измерительного стола.

На рис. 1 представлены диаграммы «нагрузка – деформация» для базальта. Здесь кривые 1, 2 соответствовали начальному состоянию, кривые 3, 4, 5 — диаграммам 7, 14, 21 суток соответственно. Из графиков видно, что с течением времени прочность падает, и фактически на 21 сутки материал не воспринимает нагрузку. На рис. 2 представлена фотография начального состояния волокна, на рис. 3 — после выдержки 21 сутки в растворе.

На фотографиях видно, что разрушение волокна происходит по его внешней поверхности.

На рис. 4 приведены диаграммы «нагрузка – деформация» для стекловолокна. Кривые 1, 2 соответствуют начальному состоянию, а кривые 3, 4, 5 — состоянию через 7, 14, 21 суток волокон в растворе КОН соответственно. Если сравнивать кривые на рис. 1 для базальта и рис. 4 для стекловолокна, то качественного различия не наблюдается. На рис. 5 представлена фотография волокна после 21 суток. На рис. 6 показана фотография торцов волокна после 21 суток.

На фотографиях видно, что разрушение происходит по поверхности волокна. Так, если начальный диаметр сердечника составлял 14 мкм, то конечный был около 5–7 мкм.

Для карбона результаты представлены на рис. 7. Так, кривая 1 соответствует начальному состоянию, а кривые 2, 3, 5 — соответственно состоянию через 7, 14, 21 суток в растворе КОН. Как видно из диаграмм «нагрузка – деформация», падение прочности для карбона составило около 22 процентов. Последующая выдержка в растворе практически не влияла на прочность. Это видно из диаграмм для 14 и 21 суток.

Проведённые эксперименты показывают, что агрессивная среда приводит к потере прочностных свойств базальта и стекловолокна. Как видно из фотографий, фронт разрушения двигается от поверхности волокна к центру, то есть можно говорить об уменьшении эффективного сечения волокна.

Оценим толщину разрушенного слоя волокна. Прочность волокна пропорциональна его эффективному сечению. Если обозначить начальное эффективное сечение для базальта  $S_0$ , а конечное —  $S_1$ , то, как видно из графиков 1 и 5 (рис. 1),  $S_1/S_0 = 0,08$ . Отсюда отношения радиусов сечений после эксперимента и до эксперимента составило около 0,28. Если принять диаметр среднего волокна за 14 мкм, то конечный диаметр волокна будет равен 3,92 мкм, то есть начальный поверхностный слой уменьшится на 10 мкм.

Коротко остановимся на вопросе о прочности арматуры из технических волокон. Неметаллическая арматура представляет собой связку жгутов, покрытых эпоксидной смолой [1]. Представим, что исследуется на коррозионную стойкость арматура диаметром 10 мм. Уменьшение поверхностного слоя в агрессивной среде будем оценивать так же, как для монолитного прутка из

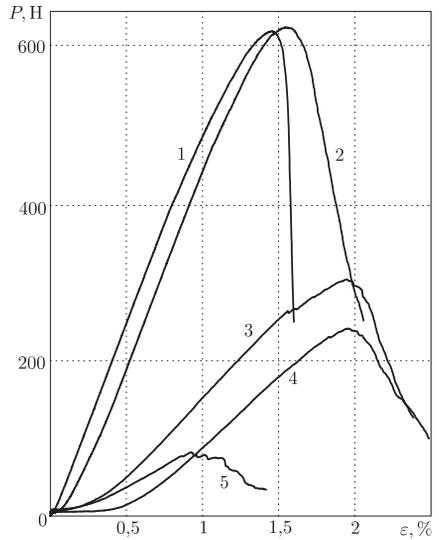


Рис. 1

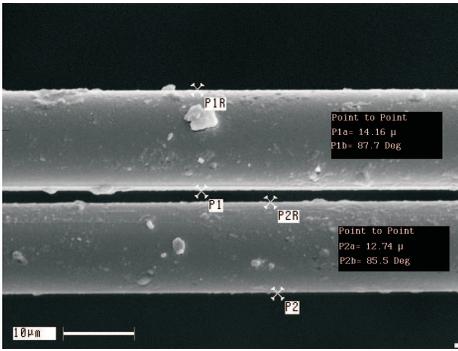


Рис. 2

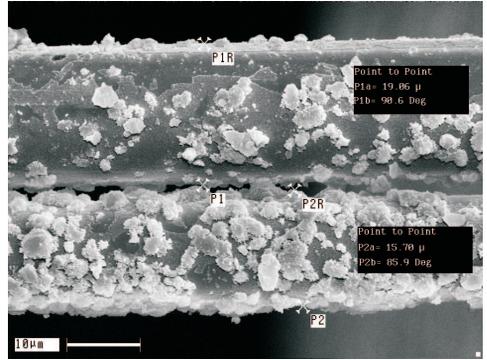


Рис. 3

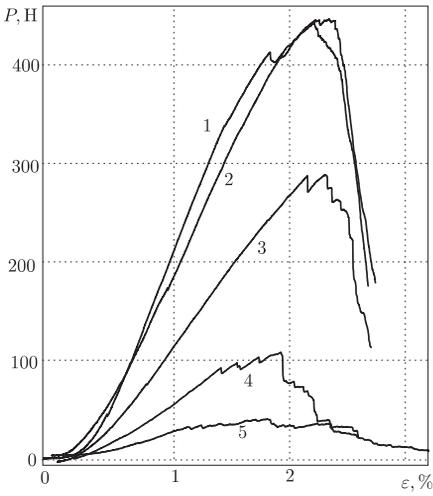


Рис. 4

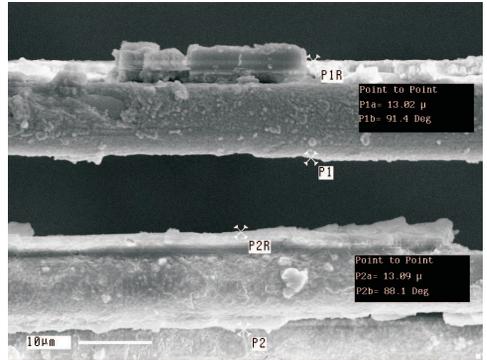


Рис. 5

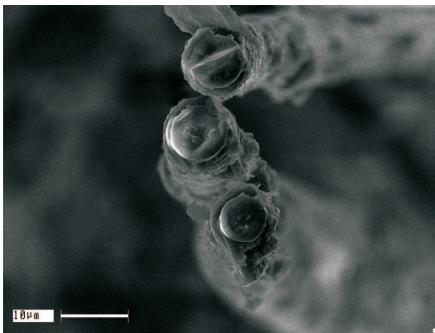


Рис. 6

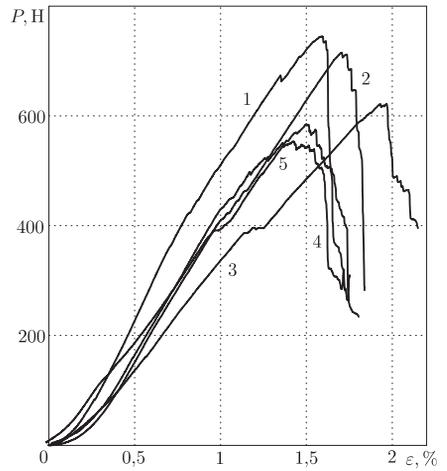


Рис. 7

базальта диаметром 10 мм. Если взять отношение уменьшения поверхностного слоя к диаметру арматуры  $10 \text{ мкм}/10^4 \text{ мкм}$ , то относительное изменение диаметра составит величину порядка  $10^{-3}$  и, соответственно, относительное уменьшение эффективного сечения прутка составит  $10^{-6}$ . Следовательно, относительное уменьшение прочности прутка также составит  $10^{-6}$ . Отсюда можно сделать вывод, что агрессивная среда практически не будет влиять на прочностные свойства прутка. Надо отметить, что это приближительная модельная оценка. Для более точной оценки необходимо провести дополнительные специальные эксперименты.

**ЗАМЕЧАНИЕ.** В экспериментах использовался концентрированный раствор гидроксида калия. Применительно к композитам для строительных конструкций можно отметить, что цементная щелочная среда имеет более низкий показатель pH и, таким образом, меньше влияет на прочностные свойства волокон. Раствор КОН позволил сократить время выдержки и получить более качественную картину влияния щелочи.

**Выводы.** По проведенным исследованиям можно сделать следующие выводы.

1. Разрушение происходит по внешней поверхности волокон.
2. Базальт и стеклопластик после выдержки в концентрированном растворе КОН качественно имели одинаковые показатели по потере прочностных свойств.
3. Для углепластика процесс разрушения прекратился после 14 суток и показатели прочности составили около 22 процентов от показателей в начальном состоянии.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (код проекта 11-01-00522).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. К. В. Михайлов, “Перспективы применения неметаллической арматуры в преднапряженных бетонных конструкциях” // *Бетон и железобетон*, 2003. №5. С. 29–30. [K. V. Mikhailov, “Prospects for use of non-metallic reinforcement in prestressed concrete structures” // *Beton i Zhelezobeton*, 2003. no. 5. Pp. 29–30].
2. Jongsung Sim, Cheolwoo Park, Do Young Moon, “Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures” // *Composites Part B: Engineering*, 2005. Vol. 36, no. 6–7. Pp. 504–512.
3. А. Г. Демешкин, А. А. Шваб, “Исследование механических свойств непрерывного базальтового волокна применительно к производству композитных материалов” // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2011. №3(24). С. 185–188. [A. G. Demeshkin, A. A. Schwab, “Research into the mechanical properties of continuous basalt fibre relating to composit materials manufacture” // *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ. Ser. Fiz.-Mat. Nauki*, 2011. no. 3(24). Pp. 185–188].

Поступила в редакцию 22/1/2013;  
в окончательном варианте — 27/III/2013.

MSC: 74C05; 74-05, 74K05

## **INFLUENCE OF HOSTILE ALKALINE ENVIRONMENT ON STRENGTH PROPERTIES OF TECHNICAL FIBERS**

*A. G. Demeshkin, A. A. Schwab*

M. A. Lavrentyev Institute of Hydrodynamics, Siberian Branch of RAS,  
15, Lavrentyeva pr., Novosibirsk, 630090, Russia.

E-mail: schwab@ngs.ru

*We consider questions connected with strength properties of continuous fibers from basalt, carbon and fibreglass under the influence of hostile alkaline KOH; environment in researches were carried out on plaits, having 4000 threads of continuous fiber. The influence of hostile environment on strength properties of fiber and on its structure of surface layer is shown.*

**Key words:** *basalt, glass, carbon, alkali, fiber, thread, plait, strength, composite, armature, building.*

Original article submitted 22/I/2013;  
revision submitted 27/III/2013.

---

*Aleksander G. Demeshkin* (Ph.D.(Phys. & Math.)), Senior Researcher, Dept. of Solid Mechanics. *Albert A. Schwab* (Dr.Sci. (Phys. & Math.)), Leading Research Scientist, Dept. of Solid Mechanics.