

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТВЕРДЕНИЯ
И ФОРМОИЗМЕНЕНИЙ МАТЕРИАЛОВ
С ТРЕЩИНОВАТО-ПОРИСТОЙ СТРУКТУРОЙ**

*канд. техн. наук Д.Н. ШАБАНОВ, С.А. ТЕРЕХОВ,
Е.В. ПИНЧУК, А.Г. ДОЛЖОНОК
(Полоцкий государственный университет, Беларусь)*

Изучение микроструктуры гидросиликатов, являющихся важнейшей частью искусственного камня, представляет большой интерес с целью исследования природы физико-механических свойств камня (прочности, усадки, ползучести). Трещина представлена в виде физического разреза с характерной толщиной и неопределенной границей окончания. Введенный в модель линейный размер трактуется в виде предельного радиуса кривизны эллиптической поры. Для описания распределения напряжений и раскрытия трещин в зоне предразрушения в окрестности вершин трещин отрыва предлагается использовать подход Нейбера–Новожилова, когда решения классической теории упругости имеют сингулярную составляющую. Для критических длин зон предразрушения и критического коэффициента трещиностойкости материала получены зависимости, связывающие структурные, прочностные и упругие характеристики материала. Предлагается модификация этой модели, когда для зоны предразрушения используется схема армирования стеклопластиковой арматурой, причем арматура занимает положение не только под 90° относительно трещины.

Введение. Постановка задач исследования зарождения и развития трещин в рамках механики деформируемого твердого тела возможна при определении соответствующей модели трещины и критерия образования новых материальных поверхностей. Основные фундаментальные результаты в данной области относятся к моделям, для которых форма трещины задается математическим разрезом. В работах [1, 2] предложена модель трещины в виде физического разреза, форма окончания которого не определена. Основным параметром данного представления является линейный размер, определяющий толщину физического разреза. Чаще всего реальная внутренняя прямо-

линейная трещина-разрез длиной $2l_0$ моделируется некоторой фиктивной трещиной-разрезом длиной $2l = 2l_0 + 2\Delta$, когда используются линейные уравнения теории упругости, в которых predeterminedена длина зон предразрушения, каждая из которых расположена на продолжении внутренней трещины [3]. Известно, что эксплуатационные характеристики определяются видом, ориентированием и количеством структурных дефектов.

Есть основания полагать, что средний диаметр гелевых частиц составляет 100Å , а средний радиус микропор между ними – $4\text{--}6\text{Å}$. Отмечается наличие более крупных («широких») пор со средним радиусом 10Å , представляющих собой, скорее всего, вытянутые полости между слоями гелевых частиц. Известно, что одновременное образования гидросиликатов при гидратации C_3S существенно влияет на характер пористости геля. Гидросиликат в искусственном камне выступает как структурообразователь высокоплотного и жесткого каркаса [4]. Целенаправленное воздействие на твердеющий материал позволяет изменить в нужном направлении структуру многокомпонентных систем.

В шестифакторном планированном эксперименте по плану Рентшафнера [5] было выявлено влияние сырьевых и технологических факторов на содержание CSH(a) . В данном эксперименте были выбраны следующие сырьевые и технологические факторы:

X_1 – расход вяжущего; X_2 – содержание шлака в извести; X_3 – водовяжущее отношение; X_4 – удельное давление прессования; X_5 – время изотермического прогрева; X_6 – давление пара в автоклаве, влияющие на интенсивность CSH(a) в образцах. Содержание CSH(a) следующее: 8; 11; 12; 8; 9; 8; 14; 6; 17; 14; 16; 18; 0; 11; 5; 14; 7; 8; 10; 11; 7; 15; 13; 9; 9.

Из полученных данных была составлена математическая модель:

$$\begin{aligned}
 Y = & 24 + 2.4x_1 + 3.4x_1^2 - 4.6x_1x_2 + 0.4x_1x_3 - 0.5x_1z_4 - 0.7x_1z_5 + 3.2x_1z_6 \\
 & - 7.8x_2 - 3.4x_1x_2^2 + 1.9x_2x_3 + 0.9x_2z_4 + 1.9x_2z_5 - 0.6x_2z_6 \\
 & + 5.8x_3^2 - 0.6x_3z_4 - 0.2x_3z_6 \\
 & - 5.2z_4^2 + 0.5z_4z_5 + 0.4z_4z_6 \\
 & - 2.1z_5 - 2z_5^2 \\
 & - 1.4z_6
 \end{aligned}$$

Адекватность полученного уравнения проверялась по критерию Фишера. По математической модели получены графики влияния различных факторов на содержание CSH(a) (рис. 1).

Критерии разрушения трещины подразумевает бесконечное напряжение (σ) в особой точке. Распространение поверхности разрыва в виде физического разреза дает возможность рассмотреть разрушение как термомеханический процесс в рамках единых определяющих соотношений. Однако в данном случае возникает вопрос о форме свободной поверхности в концевой зоне трещины при образовании новых материальных поверхностей и границах применимости соответствующих предельных моделей. Необходимо определить момент наступления критического состояния (образования новых поверхностей), соответствующий значению параметра нагружения. Существенное влияние на критическое значение параметра нагружения σ оказывают величины радиусов кривизны отверстия.

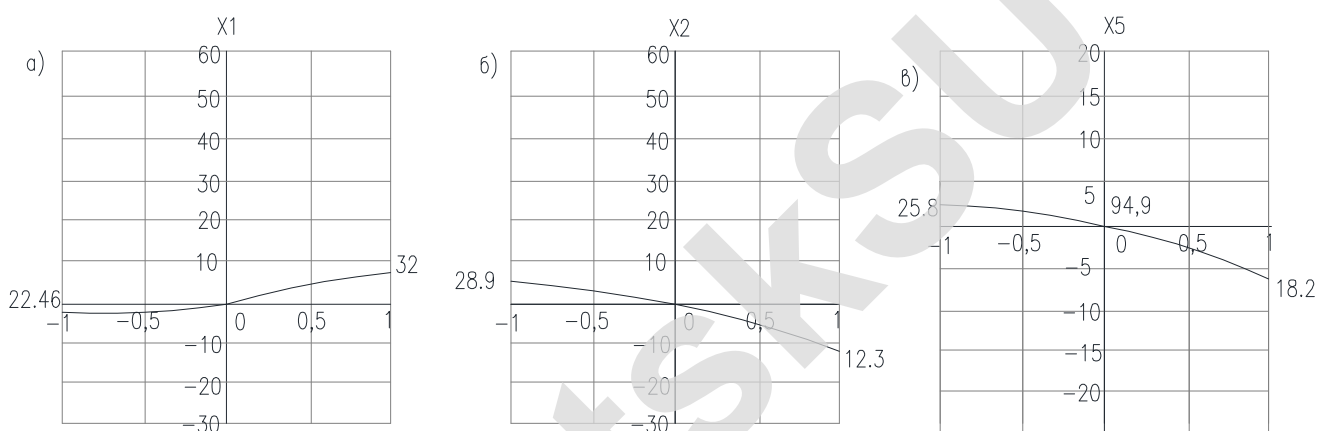


Рис. 1. Графики изменения содержания CSH(a) в зависимости: от a – расхода вяжущего; b – содержания шлака; v – времени изотермической обработки

Установлено [6], что под действием внешних напряжений в материале на границе с порой или дефектом длиной a и радиусом кривизны ρ происходит локализация напряжения σ_k (рис. 2), величина которого характеризуется коэффициентом концентрации напряжений:

$$K = \sigma_k / \sigma = 2\sqrt{a/\rho}.$$

По мере трансформации сферической поры в эллипсоид и трещину радиус кривизны уменьшается. Радиус кривизны у конца трещины может быть одного порядка с межмолекулярным расстоянием, что при достаточной длине трещины приближает разрушающее напряжение к нулевому. Повышение концентрации напряжения у устья трещин требует считать последние разуплотняющими элементами структуры. В дополнение к величине a и ρ трещина характеризуется фронтом L , шириной раскрытия b , морфологией и фактурой ее берегов (образующих плоскостей).

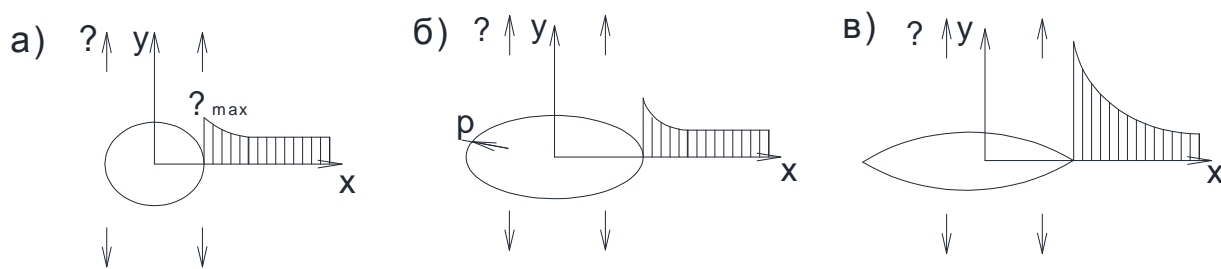


Рис. 2. Концентрация напряжений на границе:
a – со сферической порой; *б* – с эллипсоидной порой; *в* – с трещиной

С позиции механики разрушения [7] для гетерогенного материала опасной следует считать длину трещины a , соизмеримую с наибольшей по масштабу структурной неоднородностью, под которой понимается изменение качественного состава и свойств (градиент свойств ΔY) при переходе от одного компонента к другому. Сложное строение самих компонентов превращает композитные материалы (КМ) в полиструктурный материал типа «структура в структуре» или «композит в композите» [8]. Для инженерного описания системы и выявления влияния отдельных компонентов на свойства композита выделяют структурные уровни [9]. Их целесообразно выделять по структурным неоднородностям. На каждом выделенном уровне поведение системы может быть описано с позиции макро- и микромеханики [9, 10]. Макромеханический подход позволяет определить осредненные свойства материала Y , в которых нивелируется ΔY отдельных компонентов. Такой подход возможен при выделении достаточного объема материала на каждом структурном уровне M_i . Для выявления влияния структурных неоднородностей m_i (градиента свойств ΔY) на локализацию деформаций и напряжений на выделенном структурном уровне применяют микромеханику или структурную механику КМ [9, 10].

Слабые межфазные взаимодействия между элементарными структурными элементами ЭСЭ на начальных этапах структурообразования вяжущего способствует образованию в непрерывном материале дискретных объемов, названными [11] усадочными ячейками УЯ (рис. 3). Считая ЭСЭ вяжущего сферами с одинаковым диаметром $d = 1$, можно утверждать, что в условиях протекания поверхностных явлений каждый элемент может взаимодействовать с шестью соседними на плоскости и двенадцатью в объеме. Объем, ограниченный плоскостями, проведенными нормально к образующим поверхность совокупностям элементарных элементов, пред-

ставляет собой усадочную ячейку нижнего масштабного уровня УЯ-1. Образовавшиеся УЯ-1 представляют собой более сложные упорядоченные структурообразующие элементы – таксоны [12, с. 63]. Взаимодействие их ведет к образованию следующей по масштабу усадочной ячейки УЯ-2. В свою очередь УЯ-2 сама является структурообразующим элементом для УЯ-3 и т.д. (до УЯ- N). Рост масштабного уровня усадочных ячеек продолжается до образования критического объема, при котором усадочные деформации внутри дискретных элементов приводят к росту напряжений до критического значения σ_k , превышающего энергию связи между усадочными ячейками. Образуются поверхности раздела (зародыши трещин), на которых проявляются все последующие деформационные процессы. Внутренние поверхности раздела при больших усадочных деформациях способны трансформироваться в опасные для данной конструкции трещины. При выходе на поверхность трещины образуют сложный мозаичный рисунок в виде пяти- и шестиугольников [11] (рис. 4).

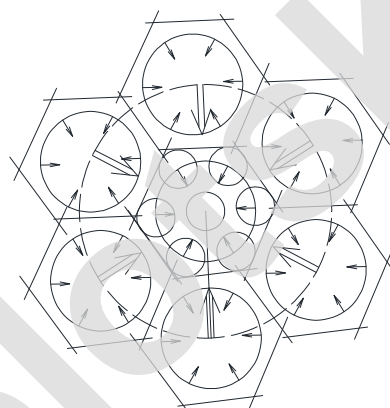


Рис. 3. Механизм образования в вяжущем усадочных ячеек



Рис. 4. Выход на поверхность трещин

Для описания распределения напряжений и раскрытия трещин в зоне предразрушения в окрестности вершин трещин отрыва предлагается использовать подход Нейбера–Новожилова, когда решения классической теории упругости имеют сингулярную составляющую. Предлагается модификация модели, когда для зоны предразрушения используется схема армирования стеклопластиковой арматуры, причем она занимает прямоугольник перед вершиной исходной трещины (рис. 5). Арматура располагалась в матрице под 45° и 90° .

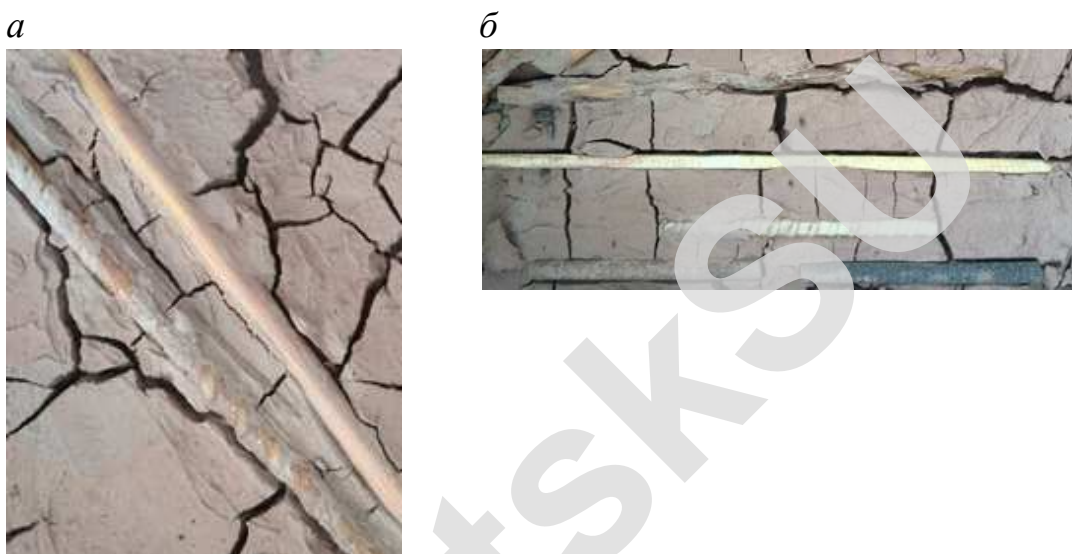


Рис. 5. Модификация модели стеклопластиковой арматурой:
a – под 45° ; *б* – под 90°

Воспользуемся классическими представлениями линейной механики разрушения, в т.ч. и для зон предразрушения, когда исходная и фиктивная трещины отрыва моделируются двусторонними разрезами. Пусть на бесконечности заданы растягивающие напряжения σ_∞ , действующие по нормали к плоскости трещины. Чаще всего реальная внутренняя прямолинейная трещина-разрез длиной $2l_0$ моделируется некоторой фиктивной трещиной-разрезом длиной $2l = 2l_0 + 2\Delta$, когда используются линейные уравнения теории упругости (Δ – длина зон предразрушения, каждая из которых расположена на продолжении внутренней трещины). Вероятно, наиболее простое описание зоны предразрушения можно получить, используя модель Леонова – Панасюка – Дагдейла [13].

При изучении развития трещин в материале, армированном стеклопластиковой арматурой, было выделено три случая, связанных с адгезией матрицы к арматуре. При совершенной адгезии в матричном материале

под действием радиальных напряжений появляются концентрические трещины (рис. 6, *а*). Они расчленивают матрицу на отдельные структурные элементы, в которых возникающие напряжения не перераспределяются между растворной частью и арматурой. Неполная адгезия растворной части к арматуре связана с избирательным характером адгезии к полимерным материалам, изменяющейся поверхностью арматуры и т.п. [14]. Микроформозменения твердеющей растворной части на участках поверхности с ослабленной адгезией ведет к локализации деформаций и развитию напряжений сдвига и отрыва (рис. 6, *б*). Их концентрация вызывает появление трещин в местах искривления формы и на границе с ослабленной адгезией. Нарушение адгезии (рис. 6, *в*) происходит на начальных этапах структурообразования материала. Под действием градиентов усадки по величине и направлению и явления пластичного гистерезиса твердеющей системы происходит отслоение растворной части от арматуры [15, 16].

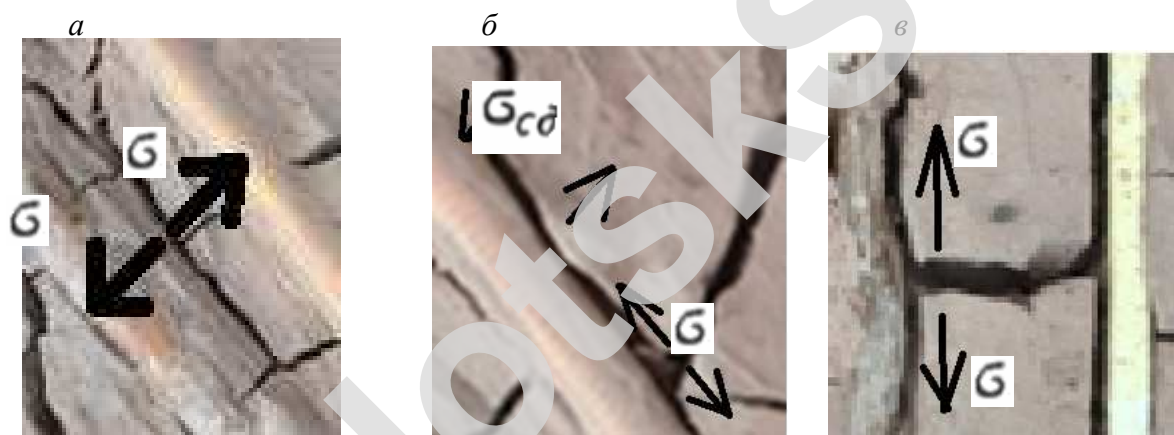


Рис. 6. Трещинообразование при разной адгезии к арматуре:
а – совершенной; *б* – неполной; *в* – нулевой

Заключение. Усадочные объемные деформации в твердеющих композитах приводят к градиенту усадки по величине и направлению на внутренних поверхностях раздела, что является причиной формоизменения матричного материала в зоне его контакта с включениями. Берега трещины образуют новые внутренние поверхности раздела в матричном материале, что изменяет общее деформативно-напряженное состояние твердеющих систем. Продолжающиеся деформации усадки ведут к прорастанию трещины в неупругой среде матрицы и затрудняют «самозалечивание» трещин в твердеющих композиционных материалах. Внутренние поверхности раздела образуют дискретные «усадочные объемы» внутри непрерывной матрицы. На основе анализа полученных в результате опыта и литературных данных можно сделать вывод, что влиять на трещиновато-пористую

структуру можно на этапе структурообразования путем управлением содержания гидросиликатом $CSH(a)$. Также материал можно модифицировать армированием стеклопластиковой арматуры. Управление трещинообразованием твердеющих систем позволяет получать композиции, прочность которых выше прочности матричного материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глаголев, В.В. Нахождение предела упругого деформирования в концевой области физического разреза при произвольном нагружении его берегов / В.В. Глаголев, А.А. Маркин // Приклад. механика и техн. физика. – 2012. – № 5. – С. 174–183.
2. Glagolev, V.V. Stress-Strain State in Elastic Body with Physical Cut / V.V. Glagolev, A.A. Markin // World Journal of Mechanics. – 2013. – No. 7. – P. 299–306.
3. Корнев, В.М. Распределение напряжений и раскрытие трещин в зоне предразрушения (подход Нейбера-Новожилова) [Электронный ресурс] / В.М. Корнев // Cyberleninka . – 2003. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/raspredelenie-napryazheniy-i-raskrytie-treschin-v-zone-predrazrusheniya-podhod-neybera-novozhilova>. – Дата доступа: 15.05.2016.
4. Daimon, M. Поровая структура камня затвердевшего C_3S / M.Daimon // Экспресс-информация – 1977. – № 45. – С. 3–7.
5. Шабанов, Д.Н. Состав и свойства силикатного кирпича с использованием продуктов литейного производства : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.23.05 / Д.Н. Шабанов ; Брест. гос. тех. ун-т. – Брест, 2007. – 23 с.
6. Разрушение : [пер. с англ.]. В 8 т. / под ред. Г. Либовца. – М. : Мир, 1976. – Т. 7, ч. 1. – 634 с.
7. Композиционные материалы : [пер. с англ.]. / под ред. Л. Браутмана, Р. Крока. – Т. 1, 2, 5, 6. – М. : Мир. – Т. 3, 4, 7, 8. – М. : Машиностроение, 1978.
8. Соломатов, В.И. Элементы общей теории композиционных строительных материалов / В.И. Соломатов // Стр-во и архитектура. – 1980. – № 8. – С. 61–70.
9. Болотин, В.В. Механика композитных материалов и конструкций из них / В.В. Болотин // Строит. механика: современное состояние и перспективы развития / В.В. Болотин. – М. : Стройиздат, 1972. – С. 65–98.
10. Тамуж, В.П. Микромеханика разрушения полимерных материалов / В.П. Тамуж, В.С. Куксенко. – Рига : Зинатне, 1978. – 294 с.
11. Вознесенский, В.А. Методы оптимизации композиционных материалов / В.А. Вознесенский. – Киев : Будивельник, 1983. – 143 с.
12. Научные основы материаловедения / отв. ред. Ч.В. Копецкий. – М. : Наука, 1981. – 259 с.
13. Леонов, М.Я. Развитие мельчайших трещин в твердом теле / М.Я. Леонов, В.В. Панасюк // Приклад. механика. – 1959. – № 4. – С. 391–401.
14. Басин, В.Е. Адгезионная прочность / В.Е. Басин. – М. : Химия, 1981. – 208 с.
15. Выровой, В.Н. Применение математической теории эксперимента в задачах реологии новых композиционных материалов / В.Н. Выровой, Ю.М. Гризан, Л.Е. Трофимова. – Киев : Знание, 1980. – 18 с.
16. Выровой, В.Н. Оптимизация безотходных и энергосберегающих технологий композиционных материалов / В.Н. Выровой, В.В. Абакумов, С.Я. Азарова. – Киев : Знание, 1982. – 24 с.

RESEARCH OF PROCESSES OF FORMING AND HARDENING MATERIALS WITH FRACTURED-POROUS STRUCTURE

D. SHABANOV, S. TEREKHOV, E. PINCHUK, A. DOLZHONOK

Study microstructure of hydrosilicates is an important part of the artificial stone is of great interest to study the nature physical and mechanical properties of rock (strength, shrinkage, creep). The crack is presented in the form of a physical characteristic of the section from the border thickness and uncertain end. Introduced in the model line size is interpreted as a limit radius of curvature of the elliptical pores. To describe the stress distribution and the cracks in the pre-fracture zone in the vicinity of the crack tip is proposed to use tear Neuber-Novozhilov approach when solving the classical theory of elasticity have a singular component. For critical lengths of the pre-fracture and fracture toughness of the critical factor of the material obtained according to the zones connecting structural strength and elastic properties of the material. A modification of this model, when a scheme of reinforcement fiberglass reinforcement for pre-fracture zone, the valves in the position not only at 90° relative to the crack.

УДК 332.28+347.214.2

ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫБОРА ВАРИАНТА УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ НЕДВИЖИМОСТИ

Е.С. БАЛАШОВА, И.П. ШВЕДОВ

(Полоцкий государственный университет, Беларусь)

Представлены результаты изучения возможности оптимизации выбора эффективного варианта управления объектами недвижимости. Приведено сравнение пакета PROPSPIN, программного продукта «Мастерская бизнес-планирования» систем COMFAR, ТЭО-ИНВЕСТ, ProjectExpert. Установлено, что система ProjectExpert гибко учитывает изменения в экономическом окружении и оперативно их отражает, позволяет достичь достаточно большой гибкости. На основании выходных данных вычисляются интегральные показатели эффективности проекта