

Таблица 2. Значения величины  $t$  в контрольных точках

№ п/п	X1, °C	X2, °C/мин	Z1	Z2	Z3	$\bar{y}$ , МПа	$\hat{y}$ , МПа	$n$	$\xi$	$t$
1	920	3	1	0	0	44,6	42,50	2	1,0	0,365
2	1000	3	1	0	0	35,9	43,38	4	1,0	1,840
3	1000	1	1	0	0	44,5	50,88	2	1,0	1,110
4	1000	2	1	0	0	47,1	47,13	2	1,0	0,005
5	920	3	0	1	0	38,5	34,63	2	1,0	0,673
6	990	3	0	1	0	30,2	35,16	1	1,0	0,610
7	1000	3	0	1	0	31,3	35,24	4	1,0	0,969
8	990	3	0	0	1	25,1	30,11	1	1,0	0,616
9	1000	3	0	0	1	30,0	30,13	4	1,0	0,032
10	900	3	0,5	0,5	0	31,7	38,38	1	0,5	0,522
11	990	3	0,5	0,5	0	31,7	39,22	1	0,5	1,068
12	900	3	0,5	0	0,5	37,6	36,10	1	0,5	0,213
13	990	3	0,5	0	0,5	30,9	36,69	1	0,5	0,822
14	900	3	0	0,5	0,5	38,7	32,20	1	0,5	0,923
15	990	3	0	0,5	0,5	29,3	32,64	1	0,5	0,474
16	850	3	0,33	0,33	0,33	34,7	35,22	10	0,33	0,248
17	850	1	0,33	0,33	0,33	37,8	35,52	10	0,33	1,086
18	950	2	0,33	0,33	0,33	39,3	38,46	5	0,33	0,284
19	990	3	0,33	0,33	0,33	33,9	36,18	2	0,33	0,486
20	1050	1	0,33	0,33	0,33	47,3	46,49	10	0,33	0,384

## СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Павлов В.Ф. Физико-химические основы обжига изделий строительной керамики. – М.: Стройиздат, 1977. – 240 с.
2. Роговой М.Н. Технология искусственных пористых заполнителей и керамики. – М.: Стройиздат, 1974. – 320 с.
3. Wisniewski A., Sokalski J. Zanim wejdzimy z ceramiką, na rynek Unii // Ceramika Budowlana. – 2005, nr. 3, s. 5 – 9.
4. Никитин В.И., Болтрык М., Бацкель-Бжозовска Б. Влияние режимов обжига, содержания добавки песка и его грансостава на физико-механические свойства стеновой керамики // Вестник БГТУ. Строительство и архитектура. – 2003, № 1(19). – С. 56 – 61.
5. Nikitin V., Backiel-Brzozowska B., Boltryk M. Wplyw parametrow procesu wypalania na wskaźniki podciągania kapilarnego wody w tworzywach ceramicznych. Polski Biuletyn Ceramiczny: Ceramika / Ceramics, Vol. 91, 2005, s. 1223 – 1230.
6. Nikitin V., Boltryk M., Backiel-Brzozowska B. Wplyw parametrow procesu wypalania i skladu granulometrycznego dodatku piasku na wytrzymałosc na sciskanie tworzyw ceramicznych. Polski Biuletyn Ceramiczny: Ceramika / Ceramics, Vol. 84, 2004, s. 337-382.
7. Ахназарова С.Л., Кафаров В.В. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии. – М.: Высшая школа, 1985 – 327 с.
8. Tukey J.W. The Future of Data Analysis, Ann. Math. Stat., 33 (1962), p. 1 – 67.
9. Richter H.G. Festigkeitsverhalten keramischer werkstoffe. Technische keramik, Essen:Wulkan-Verlag (1990), 288-293.

Статья поступила в редакцию 07.02.07

УДК 539.4.015

Осинов С.Н.

## О СТОХАСТИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ

## Введение

Происшедшие в последние годы в различных развитых странах катастрофы сложных строительных конструкций свидетельствуют о недостаточном учете изменения статистического уровня надежности в пространстве и времени функционирования таких конструкций.

Проблема статистической надежности строительных конструкций существует давно, но до начала XX века эта проблема решалась за счет огромных запасов прочности и относительной простоты строительных конструкций. Однако уже в конце XIX и начале XX веков резкое усложнение строительных конструкций, связанное с общим развитием техники (строительство железнодорожных мостов, Эйфелевой башни и т.п.) и использованием металлических конструкций вызвало интерес инженеров и ученых к вопросам надежности.

Используя достижения математики и механики, Гриффитс и Орован разработали теорию трещинообразования под действием возникающих напряжений в твердых телах. Основные

положения этой теории используются до сих пор при описании процессов разрушения в результате развития трещин. Согласно теории Гриффитса и Орована для развития трещины необходимо наличие зародыша, в качестве которого могут служить микротрещина или точка неоднородности свойств материала, возникшая в результате структурной или прочностной (композитные материалы) неоднородности.

Как указывает У.Д. Кингери [1, с. 392, формула (17.20)], теоретическое напряжение разрушения при действии нормального растягивающего напряжения в направлении главной оси трещины в определенных границах обратно пропорциональна корню квадратному из длины главной оси трещины. Поэтому рост трещин в итоге приводит к разрушению твердого тела.

В основе статистической теории надежности строительных конструкций в основном лежит статистическая теория надежности твердых тел и соединительных узлов, к которым относятся места сварок, стыков, опираний, сочленений и т.п.

Известно много попыток разработать статистическую

Осинов Сергей Николаевич, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник УП Институт НИПТИС. Беларусь, Институт НИПТИС УП, 220114, г. Минск, ул. Ф.Скорины, 15.

теорию прочности твердых тел. При этом использовалось предположение, что количество опасных трещин в образце связано с его объемом и площадью поверхности.

Анализ прямых наблюдений за трещинами [2] и степенью поврежденности грунта [3], способными привести к разрушению, показывают, что это количество меняется от одного материала к другому [1-3] и, по-видимому, существенно зависит от свойств материала (хрупкость, пластичность, термостойкость и т.п.), условий эксплуатации (переменные нагрузки, существенно нестационарный температурно-влажностный режим, агрессивность среды и т.п.), качества обработки и покрытия поверхностей. Однако до сих пор общей статистической теории нет. Одной из наиболее известных статистических теорий прочности является теория, развитая Вейбуллом еще в 1939г.

При оценке статистической надежности соединительных узлов, количество которых за последние годы стремительно возрастает уместно напомнить, что вероятность безотказной работы последовательно соединенных элементов равна произведению надежностей всех этих элементов.

Поэтому, если строительная конструкция состоит из 100 взаимозависимых элементов, каждый из которых имеет надежность 0,999, то общая вероятность безотказной работы такой конструкции составит  $0,999^{100} \approx 0,92$ , что с учетом высокой стоимости сооружения и возможным тяжелейшим последствиям является весьма низким результатом. Даже принимаемая в настоящее время многими учеными надежность 0,9999 (вероятность отказа  $10^{-4}$ ) для отдельных элементов при их огромном числе ( $10^3$  и более) и взаимной силовой и прочностной зависимости не может гарантировать общую высокую надежность всей строительной конструкции. Поэтому для сложных сильно напряженных конструкций необходимо модернизировать идеологию их конструирования и расчета с целью силового секционирования и существенного уменьшения количества взаимозависимых элементов, что должно позволить существенно уменьшить цепную реакцию разрушения в случае отказа одного или нескольких элементов конструкций.

**Стохастическое моделирование надежности строительных материалов и конструкций**

Существенный рост расчетных возможностей ЭВМ в последние годы с одной стороны позволил производить расчеты все более крупных, сложных и многозвенных строительных конструкций, а с другой стороны повысил вероятность и размер возможных итоговых погрешностей. Как известно, уже при выводе фундаментальных дифференциальных уравнений строительной механики отбрасываются многие величины низших порядков малости. При обычных расчетах такой прием не оказывает заметного влияния на погрешность конечного результата, но при расчете многозвенных (несколько тысяч) конструкций результат может быть иным. Кроме того, требования к устойчивости решения возрастает с увеличением последовательных шагов расчета на ЭВМ, т.к. каждый последовательный шаг расчета вносит хотя и очень малую, но определенную погрешность аналогично методу смены стационарных состояний. Кроме того, часто аналитические решения дифференциальных уравнений по разным причинам получаются в виде, которому при определенных значениях параметров свойственна осцилляция и даже сингулярность. С подобной проблемой столкнулся автор при теоретическом исследовании газодинамики угленосных отложений еще 40 лет назад, когда возможности ЭВМ были несравнимо меньше чем теперь. Только использование определенных аналитических приемов и ЭВМ БЭСМ-4 позволили решить возникшие проблемы.

Еще одной причиной существенных отклонений расчетных параметров строительной конструкции от фактических, что может привести к резкому снижению надежности, может являться значительное влияние пластичности материалов, которое не учитывается или учитывается недостаточно при расчете. Особенно важно учитывать пластичность при нагрузках близких к пределу упругости и при обеспечении долговечности, что необходимо при расчете устойчивости фундаментов на достаточно слабых грунтах.

Во всей цепи достижения высокой конечной надежности строительной конструкции исходными являются уровни надежности материалов.

Как указывает С.С. Вялов [3], многие осадочные породы, находящиеся под нагрузкой, с течением времени существенно теряют свои прочностные свойства, что связано с пластическими и вязкими свойствами.

У пластичных глинистых грунтов прочность при одноосном сжатии снижается сравнительно быстро, а отношение прочностей при  $\tau_\infty$  и  $\tau_0$  (здесь  $\tau$  – время воздействия нагрузки, а индекс 0 обозначает разрушение образца при обычном испытании в лабораторных условиях в течение 1 минуты и менее) колеблется в пределах от 0,2 до 0,6. У плотных глин это отношение повышается до 0,5 – 0,8 и даже до 0,9. У скальных и полускальных пород в зависимости от вязких свойств, как цементационных связей, так и самих кристаллов, отношение прочностей варьируется преимущественно в пределах 0,6 – 0,8. Для силвинита это отношение составляет около 0,5 – 0,6. Многие металлы также обладают подобными свойствами, но с меньшей потерей прочности. Кривые ползучести грунта и длительной прочности для иллюстрации методики определения  $\tau_0$  и  $\tau_\infty$  приведены на рис. 1.

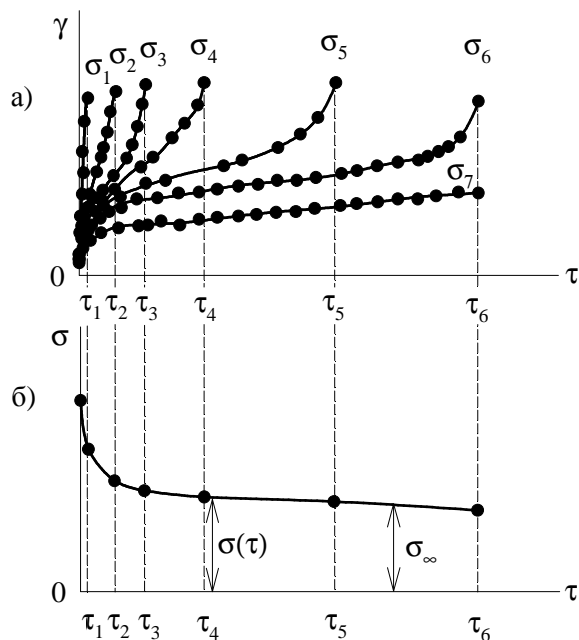


Рис. 1. Кривые ползучести материала (а) и кривая длительной прочности (б)

Снижение прочностных свойств материалов происходит за счет образования и развития трещин, а также поврежденности внутренней структуры материала в процессе деформирования.

Как показала обработка результатов испытаний на сжатие силвинита, проведенных А.Н. Ставрогиным [4], а также известняка, песчаника и сланца (изгиб), проведенных В.С. Артемьевым и В.Л. Водопьяновым [5], наилучшей формой аппроксимации (рис. 1 б) является уравнение:

$$\sigma_\tau = \sigma_0 [\alpha_1 + \alpha_2 \exp(-c\tau) ], \quad (1)$$

где:  $\sigma_\tau$  – прочность породы на сжатие (изгиб) через время  $\tau$  пребывания в напряженном состоянии, МПа;

$\sigma_0$  – прочность породы на сжатие (изгиб) при весьма кратковременном действии напряжения, МПа;

$\alpha_1$  – доля прочности при весьма длительном ( $\tau \rightarrow \infty$ ) действии напряжений;

$\alpha_2$  – доля прочности, зависящая от времени действия напряжений;

$c$  – эмпирический коэффициент показателя степени, сут<sup>-1</sup>;

$\tau$  – промежуток времени действия напряжения, сут.

Например, для силвинита выражение (1) аппроксимирует экспериментальные точки с корреляционным отношением 0,99 и относительным коэффициентом вариации  $K_{в.0} = 0,42\%$  при  $\sigma_0 = 32$  МПа,  $\alpha_1 = 0,6$ ;  $\alpha_2 \approx 0,4$  и  $c = 0,3235$  сут<sup>-1</sup>. Результаты экспериментов со скальными и полускальными породами также хорошо аппроксимируются приведенным выражением.

Дальнейшему развитию теории Гриффитса-Орвана посвящены сотни научных работ, анализ которых и результаты новых исследований приведены в изданной недавно монографии С.Н. Леоновича [6], посвященной трещиностойкости и долговечности бетонных и железобетонных элементов.

В этой фундаментальной работе получены существенно новые результаты, позволяющие увязывать капиллярно-пористые характеристики бетонов с трещинообразованием и разрушением под действием временного фактора. Приведена методика прогноза долговечности бетона и нормирования основной характеристики трещиностойкости. При этом обобщенный суммарный параметр трещиностойкости  $K_c$  находится по коэффициентам интенсивности напряжений в соответствии с формулой С.П. Черепанова [7] для отрыва и В.В. Панасюка [8] для сдвига.

Если приведенные в [6] расчетные формулы достаточно хорошо описывают влияние многих факторов на долговечность бетона, то погрешность расчета влажности ( $W$ ) цементного камня на его трещиностойкость при  $W > 40\%$  достигает 30% от фактических значений (рис. 2 взят из [6, с. 84, рис. 3.25]). При этом необходимо учесть, что во влажном климате Беларуси высокая влажность наружных слоев бетонных конструкций без влагоизоляции может достигать высоких значений.

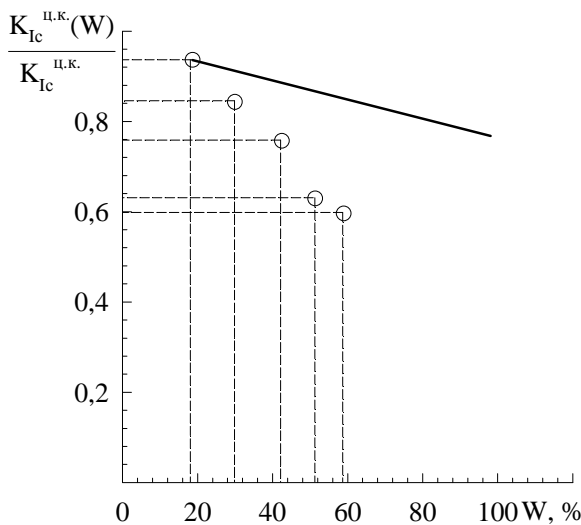


Рис. 2. Зависимость трещиностойкости цементного камня от его влажности сплошная линия – теоретическая кривая; точки – результаты опытов [6]

Однако, несмотря на многочисленные исследования до сих пор проблемы расчета долговечности строительных конструкций не получили достаточно законченного решения. Последнее в первую очередь относится к описанию закономерностей вероятностной составляющей природы разрушения. Поэтому работа Б.Г. Холодарь [2] представляет особый интерес.

Хотя основные кинетические уравнения получены около 30 лет назад, но их дальнейший анализ и интерпретация и теперь представляют теоретический и практический интерес, особенно в связи с возникшей проблемой контроля прочности бетона [9].

Новая интерпретация результатов испытаний на долговечность образцов из поликристаллического цинка [10, 11] позволила Б.Г. Холодарь получить [2] новые интересные ре-

зультаты. К таковым в первую очередь следует отнести распределение плотности вероятности разрушения образцов во времени при постоянной нагрузке  $dP/d\tau$  и исходной поврежденности  $dP/d\omega_0$ , плотность вероятности которой представляет большой интерес. Форма этой плотности вероятности [2, рис. 3] больше напоминает логнормальное распределение, а не распределение Вейбулла [12], чего можно было ожидать. Однако в этой работе [2] рассматривается статистическая вероятность разрушения образцов с начальным и неизменным во времени распределением повреждений, приводящим к различным вероятностям и моментам разрушений в зависимости от величины и режима нагружения.

Как пишет автор работы [2] в ее заключительной части: «Поскольку частотный параметр  $\nu$  в уравнении (2)\* рассматривался выше как некоторая константа материала, то само уравнение при этом не описывает режимов зарождения и размножения дефектов структуры, появляющихся в материале в процессе его активного нагружения, например, циклического. В этом смысле сделанный выше вывод о применимости критерия Бейли фактически относится к случаю медленноменяющихся нагрузок, для которых непосредственно вызываемая ими (наведенная в материале) поврежденность составляет некоторую достаточно малую долю от исходной «технологической» поврежденности». Однако, как видно из [2, рис. 5], уровень нагруженности ( $X = 4; 16; 32$ ) не влияет на изменение максимального уровня начальной поврежденности материала ( $\omega_0 \approx 0,22$ ), что противоречит физике процесса подготовки разрушения, т.к. разрушение 25% образцов (12 из 48) происходит уже при  $X = 8$ . Последнее также видно из заимствованного [2] рис. 3. Здесь также необходимо отметить, что практикой установлена особая опасность превышения расчетной нагрузки различных элементов строительной конструкции (дополнительная нагрузка на кровлю в результате укладки новых слоев кровельных материалов без удаления старых [13], превышения снеговой нагрузки расчетной, обледенения и т.п.).

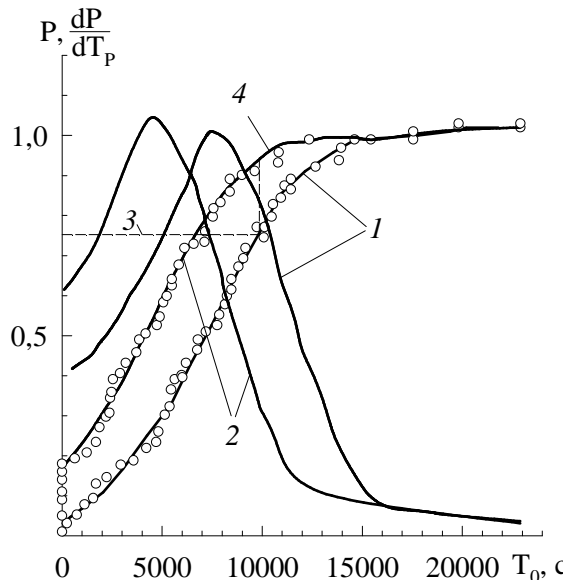


Рис. 3. Вероятность разрушения и плотность ее распределения при непрерывном нагружении (кривые 1) и нагружении с прерыванием (кривые 2). Пунктирная линия 3 – уровень вероятности разрушения 0,75; линия 4 – время почти полного разрушения всех образцов при повторном нагружении [2]

\* Уравнение (2) в [2] описывает скорость изменения меры поврежденности  $\omega$  во времени при одноосном растяжении. Уравнения (1) в [2] описывают изменение меры поврежденности за счет гидростатической и девиаторной (сдвиговой) компонент.

Интересно отметить, что при повторном нагружении образцов произошел сдвиг по времени кривой вероятности разрушения образцов по сравнению с непрерывным нагружением (рис. 3). Повторное нагружение образцов произошло после первого нагружения при  $\sigma = 8 \text{ кгс/мм}^2$  в течение  $\tau = 3000 \text{ с}$  в результате чего из 48 образцов разрушилось 12 (25%). Оставшиеся 36 образцов кратковременно «отдохнули» и были нагружены повторно при  $\sigma = 8 \text{ кгс/мм}^2$  (рис. 3, кривая 2). Новая кривая вероятности разрушения проходит существенно выше таковой при непрерывном нагружении (кривая 1). Интересно отметить, что если провести уровень  $P = 0,75$  (пунктир 3), то есть вычесть использованный при первичном нагружении уровень вероятности 0,25 (25%), до кривой 1 и перенести точку пересечения на кривую 2 (точка 4), то уровень достигнутой вероятности практически приближается к 1. Таким образом, первичная нагрузка в течение  $\tau = 3000 \text{ с}$  уменьшила завершение процесса разрушения всех образцов с 20000 с до примерно 10000 с. Первичная нагрузка в течение 3000 с оказалась эквивалентной конечной части процесса разрушения в 10000. Поэтому при переменном режиме нагрузки даже с одинаковой предельной нагрузкой интенсивность процесса разрушения не остается постоянно соответствующей режиму непрерывного нагружения.

Сравнивая методики определения материала, предлагаемые С.Н. Леоновичем [6] и Б.Г. Холодарь [2] необходимо отметить и разную идеологическую основу. Если методика С.Н. Леоновича использует детерминированный подход, то Б.Г. Холодарь в значительной мере использует стохастический подход. По-видимому, наиболее важные теоретические и практические результаты можно ожидать от рационального совместного использования детерминированной и стохастической моделей.

Отмеченная в начале работы Б.Г. Холодарь [2] особенность испытаний различных материалов на долговечность, заключающаяся в значительном разбросе результатов даже на несколько десятичных порядков вполне объяснима не только различием материалов, уровнем и характером нагружения, но также особенностью конечного участка кривой вероятности разрушения (рис. 3, кривые 1 и 2). Если рассмотреть зависимость  $\tau_p = f(P)$ , развернув рис. 3 на  $90^\circ$ , то конечные участки кривых указывают на стремление к сингулярности, когда малые изменения  $P$  приводят к большим изменениям  $\tau_p$ . Такая особенность присуща многим законам распределения вероятности [12] в том числе и нормальному закону. Таким образом, в области  $P \rightarrow 1$  практические возможности определения времени разрушения  $\tau_p$  теряют устойчивость, что делает расчет  $\tau_p$  достаточно неопределенным. Вообще следует отметить, что при вероятности реализации явления  $P < 10^{-3}$  у человека обычно теряется ощущение опасности, например, автомобильной аварии или несчастного случая. Хотя теоретически можно просчитать условия реализации до сколь угодно малых вероятностей, но, как показывает реальная практика и обыденная человеческая жизнь, так называемые «случайности» происходят при расчетных вероятностях  $10^{-6}$  и  $10^{-8}$  из-за «невероятного» стечения обстоятельств.

Поэтому в реальных условиях при определении долговечности строительных конструкций следует ориентироваться на физический износ не более 70 – 80%, что подтверждается рекомендациями ВСН 53-86(р) «Правила оценки физического износа жилых зданий» [14]. В этом нормативном документе, например, для стен из слоистых железобетонных панелей рекомендуется [14, с. 22 табл. 14] при физическом износе 61 – 70% производить замену панелей. Такой износ, как это видно из рис. 4 (пунктирные линии 1 и 2), заимствованного из ВСН 53-86(р) [14, с. 6, рис. 2], соответствует 0,8 – 0,9 от срока

службы. По-видимому, такой же подход необходимо применять при определении срока службы всех силовых элементов строительных конструкций.

Следует отметить, что после обрушения кровли в спортзале Краснопольской школы УП «Стройнаука» в соответствии с указанием Минстройархитектуры были обследованы 16 школ, аналогичные Краснопольской [13]. В результате в несущих конструкциях залов всех обследованных школ были обнаружены существенные дефекты и повреждения. В том числе, сквозные трещины с раскрытием до 1,6 мм наклонной ориентации в опорных узлах безраскосных железобетонных ферм пролетом 24 м – основных несущих конструкциях спортивных залов; скалывание бетона оголовков удлиненных стоек ферм под опорами плит покрытия; горизонтальные и наклонные трещины в узлах сопряжения стоек с поясами ферм [13]. В результате сопоставления компьютерных исследований конечно-элементных и стержневых моделей с реальной картиной трещинообразования с учетом возможного превышения массы ограждающих элементов покрытий на 25-30% по сравнению с проектной за счет переувлажнения утеплителя, а также наращиванием его слоев установлено, что на отдельных объектах резервы до стадии разрушения составляли всего 10 – 20%, в то время как нормами предусматривалось 50 – 70%.

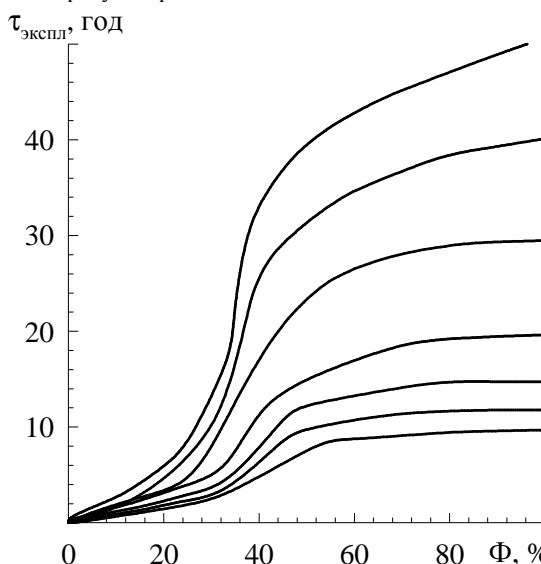


Рис. 4. Физический износ слоистых конструкций (срок службы 10 – 50 лет) [14]

Такое уменьшение запаса прочности даже в 3 раза при нормальном распределении вероятности разрушения с учетом 1 реализованного случая из 17 (6% односторонний квантиль) может произойти при коэффициенте вариации прочности  $K_v \approx 0,13$  [15]. В таком случае для достижения принимаемого строителями значения вероятности разрушения  $10^{-4}$  необходимый запас прочности должен быть около 50% ( $3,72 K_v$ ). Запасу прочности в 70% соответствует  $K_v \approx 0,19$ .

Однако эти расчеты соответствуют нормальному закону распределения случайных величин. Реальные законы распределения могут существенно отличаться от нормального закона [16], что вносит большие искажения в приведенные результаты расчета. Поэтому исследование стохастичности процессов эксплуатации строительных конструкций имеет не только теоретическое, но и огромное практическое значение. При этом стохастичность необходимо изучать и учитывать не только в пространстве, но и во времени.

Использованная Б.Г. Холодарь аналитическая модель разрушения [2] не предусматривает возможности релаксации различных повреждений внутренней структуры материала под действием определенного вида и уровня нагрузок. Одна-

ко в этом отношении показательны результаты исследований, приведенные в табличном виде в монографии С.С. Вялова [3] для каолина. Вопросы релаксации повреждений структуры бетона рассмотрены также С.Н. Леоновичем [6].

При исследовании весьма пластичного каолина с влажностью  $W = 40\%$  для оценки изменения структуры в процессе деформирования установлено [3], что в исходном состоянии при отсутствии нагрузки (напряжение  $\sigma = 0$ ) степень поврежденности материала составляла  $\omega_0 = 24,1\%$ . Создание напряжения  $\sigma = (7,5 - 9,1)$  кПа привело к уменьшению поврежденности структуры до средней величины  $\omega = 21,4$  при значении для отдельных образцов  $\omega_c = (20,3 - 23,1)\%$ . При этом наблюдалась затухающая ползучесть при отсутствии преобладающей ориентации частиц, уменьшилось количество дефектов структуры по сравнению с исходным состоянием. Микротрещины стремятся сомкнуться, а полости и пустоты – сжаться и вытянуться в направлении сдвига. Происходит уплотнение с образованием новых межчастичных связей взамен нарушенных. При этом дефекты структуры в основном уменьшаются в начальный период деформирования, соответствующий наиболее интенсивному росту деформаций. В одном из опытов степень поврежденности при ее начальном значении  $\omega_0 = 25\%$  уменьшилась до 22% через 2 суток после начала испытания при затухающей ползучести и до 20% после 6 суток.

Необходимо отметить, что «залечивание» микротрещин и улучшение структуры материала, например, для ручных стальных кос известно давно. Для этого лезвия старых много поработавших кос «отбивали» ударами молотка, что улучшало их качество. Полезность применения «наклепа» для качества даже холодного металла известна очень давно.

При установившейся деформации каолина, которая возникает при  $\sigma = (10,0 - 13,3)$  кПа, средняя степень поврежденности структуры достигает  $\bar{\omega} = 34,4\%$  с зоной разброса  $\omega_i = (27 - 35)\%$ . Одновременно появляется преобладающая ориентация частиц в размере  $g = 18,4 - 41,1\%$ .

При прогрессирующей деформации (верхние точки  $\sigma_1 - \sigma_6$  на рис. 1) средняя степень поврежденности достигает  $\bar{\omega} = 36,9\%$  при  $\omega_i = 36,3 - 37,2\%$ , а степень ориентации частиц от 65,8% до нуля, что зависит от продолжительности воздействия напряжений в каолине. Если разрушение каолина происходит быстро, переориентация частиц зачастую не успевает произойти и структура практически не меняется. Однако микро- и макротрещины образуются даже в этом случае и, например, при разрушении за 0,03 часа степень поврежденности увеличилась с 24,1 до 36%.

При прогрессирующей деформации время выхода на лавинообразное разрушение образцов каолина сильно зависит от величины напряжения (рис. 5).

Использование 6-ти значений из 7-ми, приведенных в [3, с. 315, табл. 10.1], дает линейную зависимость вида

$$\lg \tau_p = a_3 - v\sigma, \quad (2)$$

где  $a_3$  и  $v$  – эмпирические коэффициенты,  $a_3 = 9,34$  и  $v = 6,5$  при  $\sigma$  в кПа и  $\tau_p$  в час.

Эта эмпирическая зависимость имеет весьма тесную корреляционную связь (корреляционное отношение  $r = 0,99$ ) и небольшую величину относительного коэффициента вариации ( $K_{в.0} = 12,5\%$ ). Здесь необходимо отметить, что при увеличении напряжения в 1,7 раза (с 10 до 17 кПа) время перехода к разрушающей деформации уменьшается примерно на 3 порядка (рис. 5). При этом, конечно, нужно учитывать также физические особенности пластических глинистых материалов.

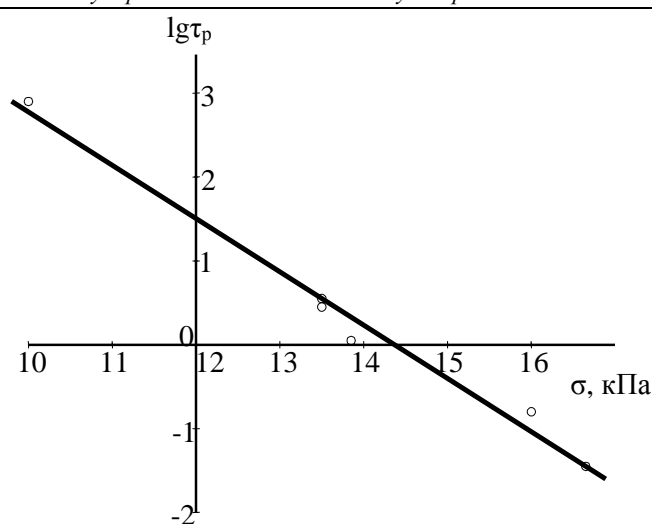


Рис. 5. Зависимость логарифма продолжительности перехода образцов каолиновой массы к разрушению от действия напряжений. Точки – результаты экспериментов

Значения степени поврежденности структуры каолина в момент разрушения составляли  $\omega_p = 35,9 - 40,5\%$  при среднем значении  $\bar{\omega} = 37,5\%$ , т.е. всего на 0,6% больше по сравнению со средним значением при прогрессирующей деформации, которая практически является началом процесса разрушения. Для юрской глины [3] с влажностью  $W = 32\%$  степень поврежденности структуры в момент разрушения составляла  $\omega_i = 39,6 - 43,0\%$  при среднем значении  $\bar{\omega} = 40,9\%$ .

Для оценки уровней разброса значений величин поврежденности  $\omega_i$  при разрушении каолиновой массы под действием разных напряжений (10 – 16 кПа и 16,6 – 20 кПа) произведено определение среднеквадратических отклонений  $\lambda$  и коэффициентов вариации  $K_v$ . Как показывают расчеты, при  $\sigma = 13$  кПа  $\lambda = 1,39\%$  и  $K_v = 4\%$  при 12 экспериментах и  $\bar{\omega} = 37,5\%$ . При  $\sigma = 18,3$  кПа, т.е. при напряжении в 1,4 раза больших,  $\lambda = 0,82\%$  и  $K_v = 2,2\%$ , что примерно в 1,8 раза меньше по сравнению с предыдущим случаем. Таким образом, увеличение напряженности каолиновой массы приводит к уменьшению разброса критических величин ее поврежденности.

Для юрской глины при напряжении  $\sigma_i = 41,6 - 55,0$  кПа среднеквадратическое отклонение (8 значений) составляет  $\lambda = 1,18\%$  при коэффициенте вариации  $K_v = 2,9\%$ , что соответствует уровню разброса значений каолиновой массы.

При установившемся режиме деформации каолиновой массы и  $\bar{\omega} = 32,2\%$  среднеквадратическое отклонение составило  $\lambda = 3,4\%$ , а  $K_v = 10,5\%$ , что существенно больше по сравнению с режимом быстрого разрушения. Таким образом, для разрушения каолиновой и юрской глины определен сравнительно узкий (по сравнению с поликристаллическим цинком [2]) коридор разброса величин поврежденности структуры, который также существенно уменьшается при переходе от установившейся деформации к режиму быстрого разрушения.

Сравнение условий разрушения поликристаллического цинка, бетона и глин показывает, что с ростом пластичности материала в этом случае требуется увеличение уровня поврежденности структуры. Так, для поликристаллического цинка [2] уровень начала разрушения соответствует поврежденности структуры примерно  $\omega_0 = 0,2 - 0,22$ . Для бетона [6] при общей пористости более 25 – 30% ( $\omega_0 > 0,25 - 0,3$ ) этот материал теряет прочность. Для каолиновой массы разрушение может происходить уже при  $\omega = 0,36$  (36% поврежденности структуры), для юрской глины – при  $\omega \geq 0,396$  (39,6%).

Хотя приведенных примеров мало, но общая тенденция вполне понятна и физически достаточно обоснована, так как с повышением пластичности материала увеличивается возможность релаксации повреждений внутренней структуры.

Как видно из рис. 6, на котором графически представлены табличные данные, приведенные в [3], процесс изменения поврежденности структуры каолиновой массы под действием напряжений можно разделить на 3 зоны.

Первая зона соответствует затухающей деформации каолиновой массы, которая происходит при напряжении до  $\sigma \leq 9,0 - 9,5$  кПа. Вторая зона соответствует установившейся и прогрессирующей деформациям, что происходит при  $\sigma > 9,0$  кПа. Переход от установившейся к прогрессирующей деформации в значительной мере зависит от продолжительности действия и величины напряжений. Поэтому вторая зона имеет своеобразный вид и в 2 – 3 раза растянута по степени поврежденности структуры каолиновой массы по сравнению с зонами затухающей деформации и итогового разрушения. Третья зона соответствует итоговому разрушению каолина и начинается при  $\sigma \geq 10,0$  кПа. Ширина этой зоны относительно невелика и примерно соответствует первой зоне.

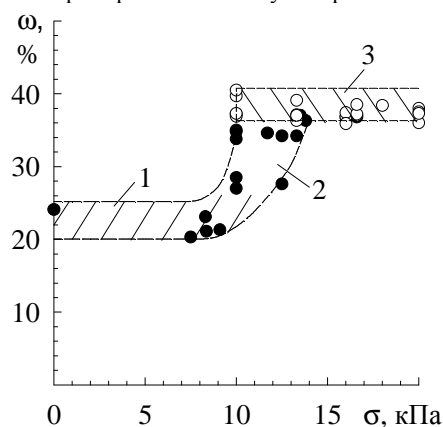


Рис. 6. Влияние напряжения каолиновой массы на степень поврежденности структуры. 1 – зона затухающей деформации; 2 – зона установившегося и прогрессирующего течения; 3 – зона итогового разрушения; сплошные точки (•) – отсутствие разрушения; полые точки (○) – разрушение

Индивидуальные свойства глинистых, а тем более формовочных масс с различными свойствами шихты, безусловно, определяют соответствующие зоны разрушения и трещинообразования. Повреждение структуры глинистой массы должно приводить к существенному уменьшению ее прочностных свойств. Такое повреждение структуры может быть достигнуто различными способами: механическим, физико-химическим и многими другими.

Многие исследователи указывают на сильное влияние структурных характеристик на прочностные свойства глинистых масс.

За последние 20 лет опубликовано несколько интересных монографий [17 – 19], в которых рассмотрены в основном теоретические вопросы оценки надежности строительных конструкций и нормирования расчетных параметров. Однако при теоретических оценках надежности недостаточно учитываются физические закономерности развития условий разрушения строительных конструкций во времени и пространстве.

Огромное практическое значение познания условий разрушения материалов и конструкций требует проведения дальнейших исследований на основе обобщения имеющегося огромного теоретического и экспериментального материала.

**Заключение**

Учитывая изложенное выше, представляется возможным сделать следующие выводы:

1. Необходимо проверить допускаемые погрешности при расчете весьма многозвенных зависимых строительных систем (конструкций) на ЭВМ и при необходимости модернизировать методику таких расчетов.
2. Найти разумное сочетание детерминированных и стохастических методик расчета прочностных, силовых и временных показателей строительных материалов и конструкций и на этой основе создать надежный метод расчета.
3. При расчетах долговечности строительных материалов и конструкций необходимо учитывать существенную неопределенность при уровне вероятности реализации явления более 0,9 – 0,95.
4. При разработке методов расчета необходимо учитывать процессы возможной релаксации повреждений строительных материалов и конструкций, особенно при частичном или полном переводе отдельных элементов с одноосного или двухосного в объемное напряженное состояние, при котором прочностные свойства строительных материалов существенно возрастают.

**СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Кингери У.П. Введение в керамику (издание второе) – М.: Изд. лит. по строительству, 1967. – 500 с.
2. Холодарь Б.Г. Связь долговечности материала с уровнем его исходной поврежденности. – Брест: Строительство и архитектура (Вестник Брестского государственного технического университета) № 1, 2005. – с.40 – 46.
3. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. – М.: Высшая школа, 1978. – 448 с.
4. Ставрогин А.И. Исследование реологических свойств грунтов. – М.: Энергия. Труды координационных совещаний по гидротехнике, вып.38, 1968.
5. Артемьев В.Г., Водопьянов М.М. О длительной прочности горных пород. – Киев: Наукова думка, сб. Проблемы реологии горных пород, 1970.
6. Леонович С.Н. Трещиностойкость и долговечность бетонных и железобетонных элементов. – Минск: «Гыдзень», 1996. – 266 с.
7. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974. – 640 с.
8. Панасюк В.В. Предельное равновесие хрупких тел с трещинами. – Киев: Наукова думка, 1968. – 246 с.
9. Блещик Н.П., Тур В.В., Кравченко В.К. К вопросу о контроле прочности бетона в свете требований ГОСТ 18105-86 и общеевропейского стандарта EN206-1:2001 – Минск: Строительная наука и техника, № 1, 2005.
10. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.И. Кинетическая природа прочности твердых тел. – М.: Наука, 1974-560с.
11. Бобоев Т.Б., Регель В.Р., Слуцкер А.И. Статистический разбор значений долговечности при механическом испытании и необратимость разрушения твердых тел. – Проблемы прочности, № 3, 1974 – с. 40 – 44.
12. Хастингс Н., Пикок Дж. Справочник по статистическим распределениям. – М.: Статистика, 1980. – 96 с.
13. Лапчинский А.К. Эксплуатационная надежность железобетонных безраскосных ферм. – Минск: Архитектура и строительство, № 1, 2005. – с. 114 – 116.
14. ВСН 53-86(р). Правила оценки физического износа жилых зданий. – М.: Госгражданстрой, 1988. – 72 с.
15. Яцко Я. Математика – статистические таблицы. – М.: Госстатиздат, 1961. – 244 с.
16. Тур В.В., Пецольд Т.М., Зарубежный опыт нормирования в области оценки технического состояния существующих железобетонных конструкций зданий и сооружений. – Мн.: Строительная наука и техника, №2 (5), 2006. – С. 32 – 46.
17. Райзер В.Д. Методы теории надежности в задачах нормирования расчетных параметров строительных конструкций. – М.: Стройиздат, 1986. – 96 с.
18. Райзер В.Д. Теория надежности в строительном проектировании. – М.: Изд-во АСВ, 1998. – 304 с.
19. Шпете Г. Надежность несущих строительных конструкций. – М.: Стройиздат, 1994. – 288 с.

Статья поступила в редакцию 23.02.07