

О долговечности твердых строительных материалов

Докт. техн. наук, проф. С. Н. Осипов¹⁾, асп. А. В. Захаренко¹⁾, Д. А. Поздняков¹⁾

¹⁾ГП «Институт жилища – НИПТИС имени Атаева С. С.» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Надежное прогнозирование долговечности твердых строительных материалов, особенно бетона и железобетона, является сложной научно-технической проблемой, которая описывается во многих научных работах. Однако до сих пор эта задача не имеет надежного аналитического решения с необходимой статистической мерой реализации. В статье приведен краткий анализ современных представлений о процессах разрушения твердых строительных материалов, в том числе бетона и железобетона, как под действием силовых (в частности, на основании временной зависимости прочности при статической нагрузке), так и несиловых факторов, в том числе карбонизации и уменьшения водородного показателя. Описаны особенности снижения прочности строительных пород во времени при действии процессов ползучести (пластичности). Представлены два варианта оценки возможной долговечности: без исходной поврежденности и с имеющимися исходными дефектами. При первом варианте распределение испытываемых образцов материала по долговечности примерно соответствует логнормальному закону, а при втором – более сложному закону. Приведены уровни показателей карбонизации и водородного показателя, при которых коррозия стальной арматуры не происходит. Установлена необходимость учета в теории прочности твердых строительных материалов не только характеристик и особенностей их структуры, но и статистических закономерностей, так как сам процесс разрушения представляет собой интегральное явление, в связи с чем конечный результат может изменяться в зависимости от случайных величин имеющихся дефектов структуры, погрешностей испытаний и других факторов. При этом вероятность их возможных сочетаний также описывается законами статистики. Показано, что для повышения надежности вероятностно-статистических методов расчета долговечности желательно учитывать максимальное количество подобных факторов.

Ключевые слова: твердый материал, разрушение, долговечность, ползучесть материала, карбонизация, расчет долговечности, статистические характеристики

Для цитирования: Осипов, С. Н. О долговечности твердых строительных материалов / С. Н. Осипов, А. В. Захаренко, Д. А. Поздняков // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 4. С. 278–287. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-4-278-287>

On Longevity of Solid Construction Materials

S. N. Osipov¹⁾, A. V. Zakharenko¹⁾, D. A. Pozdnyakov¹⁾

¹⁾UE “Institute of Housing – NIPTIS named after Ataev S. S.” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Reliable forecasting of longevity for solid construction materials, especially for concrete and reinforced concrete is considered as a rather complicated scientific and technical problem which is often described in a great number of research papers. However this problem does not have a reliable analytical solution with the required statistical realization level. The paper contains a brief analysis of modern views pertaining to breakage processes in solid construction materials including concrete and reinforced concrete due to action of force (in particular, on the basis of temporary strength dependence with a static load) and non-force factors comprising as well carbonization and decrease of hydrogen index. Peculiar features concerning strength decrease of construction materials in time due to action of creep processes (plasticity) have been described in the paper. The paper presents two variants for assessment of possible longevity: without initial damage and with

Адрес для переписки

Осипов Сергей Николаевич
ГП «Институт жилища – НИПТИС имени Атаева С. С.»
ул. Ф. Скорины, 156,
220114, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 263-81-91
up-niptis@rambler.ru

Address for correspondence

Osipov Sergey N.
UE “Institute of Housing – NIPTIS named after Ataev S. S.”
15b F. Skoriny str.,
220114, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 263-81-91
up-niptis@rambler.ru

available initial defects. According to the first variant distribution of the test specimens of material for longevity corresponds to a lognormal law and in the second variant the distribution follows more complicated law. The paper provides levels of carbonization indices and a hydrogen index when corrosion of steel reinforcement does not occur. The following necessity has been established that is recommended to take into account not only characteristics and specific features in structure of solid construction materials in their strength theory but also statistical regularities because the breakage process represents in itself an integral phenomenon and due to this the final result can change according to random values of available structural defects, test errors and other factors. In this connection probability of their possible combinations has been described with the help of statistical laws. It has been shown that it is desirable to pay due consideration to maximum number of similar factors in order to increase a reliability of probabilistic-statistical methods for calculation of longevity.

Keywords: solid material, breakage, longevity, creep of material, carbonization, calculation of longevity, statistical characteristics

For citation: Osipov S. N., Zakharenko A. V., Pozdnyakov D. A. (2018) On Longevity of Solid Construction Materials. *Science and Technique*. 17 (4), 278–287. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-4-278-287> (in Russian)

Предельная физическая долговечность зданий, в том числе жилых, в принципе, определяется долговечностью природных и искусственных твердых строительных материалов (щебень и гравий различной крупности; плиты и другие формы строительных элементов из относительно прочных пород; кирпичи и блоки разного размера и технологии изготовления; бетон и железобетон и т. п.) и сталей (строительные конструкции и арматура), из которых изготавливаются несущие конструкции, особенно не предназначенные к замене.

В основе долговечности твердых строительных материалов, элементов и конструкций лежит их прочность, обеспечивающая надежную безопасность эксплуатации зданий и сооружений. Как отмечают В. Р. Регель, А. И. Слущер и Э. Е. Томашевский в [1], «согласно А. А. Гриффиту (1921 г.) разрыв идеально упругих тел считался возможным, если количество упругой энергии, освобождающейся при росте трещин разрушения, было достаточным, чтобы компенсировать затраты энергии на образование новой поверхности разрыва». Таким представляется механизм разрушения твердого тела с чисто механического, статического подхода к проблеме с позиции механики сплошных сред или при учете атомно-молекулярного строения [1, с. 8–10].

Предпосылкой для формирования кинетической основы разрушения послужили как общетеоретические соображения, так и результаты работ по изучению деформационных свойств твердых тел (ползучести) и релаксационных явлений [1, с. 11–13]. Временная зависимость прочности при статической нагрузке наблюдалась многими исследователями и прак-

тиками. Так, Е. Орован предложил объяснение зависимости прочности стекла от времени воздействия нагрузки, основанное на допущении существования гриффитовых трещин, образовавшихся за счет химических изменений на поверхности при сорбции влаги из воздуха поверхностью стекла. Влияние времени на прочность объясняется тем, что при медленном разрыве на поверхности растущей трещины успевает образоваться сорбционный слой, и прочность материала понижается. При этом временная зависимость прочности наблюдается как для малоустойчивых материалов, так и для стойких по отношению к окружающей среде [1, с. 14].

Без какого-либо внешнего несилового воздействия (газы, влажность, температура и т. п.) долговечность различных твердых тел, в том числе образцов из цемента (рис. 1), по крайней мере в течение 10–100 сут., заметно зависит от напряжений [1, с. 49–53]:

$$\tau = A \exp(-\alpha\sigma), \quad (1)$$

где τ – долговечность при постоянной (комнатной) температуре; A , α – постоянные коэффициенты; σ – величина разрывного напряжения.

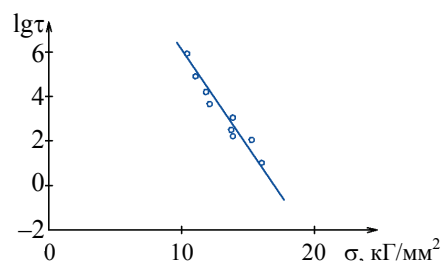


Рис. 1. Долговечность τ цементного камня в зависимости от напряжения σ [1, рис. 16]

Fig. 1. Longevity τ of cement stone according to stress σ [1, fig. 16]

Необходимо отметить, что разброс точек по шкале $\lg t$ при практически одинаковой величине напряжения ($\sigma \approx 15 \text{ кГ/мм}^2$, рис. 1) достигает одного порядка (10 раз). В [1, с. 52] отмечается, что разброс точек может достигать двух порядков величины долговечности, т. е. долговечность одинаковых образцов, испытываемых при одном и том же напряжении при идентичных условиях, может различаться в 100 раз. Для статистической проверки такого разброса значений прочности были проведены специальные опыты на одинаковых образцах (примерно по 100 шт. в серии), которые испытывались на долговечность при максимально тщательном поддержании постоянства условий эксперимента. По измеренным значениям для каждой серии строились кривые распределения образцов по долговечности (рис. 2), которые по $\lg t$ имеют симметричную форму, близкую к гауссовой. При данной форме кривой вероятный диапазон случайных изменений величин $\lg t$ зависит от величины заданной вероятности реализации. Таким образом, распределение плотности вероятности долговечности твердых тел под действием нагрузки близко к логарифмически-нормальному. Подобный характер распределения отмечает и К. А. Браунли [2, с. 36] в опытах по коррозии, согласно которым при сильной коррозии кривая распределения будет асимметричной, с длинным «хвостом» в сторону увеличения абсциссы. Такая асимметрия значительно уменьшается при логарифмировании.

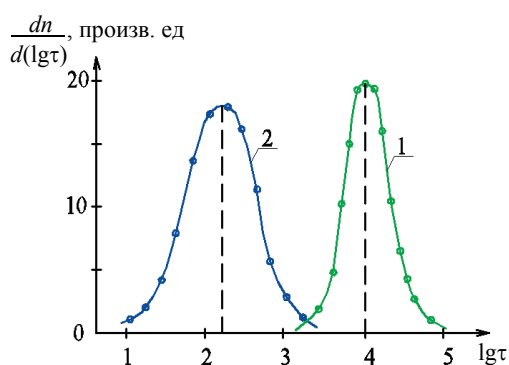


Рис. 2. Распределение образцов по долговечности [1, рис. 17]: 1 – алюминий (80 образцов); 2 – капрон (поликапроамид, 100 образцов); n – количество образцов

Fig. 2. Distribution of specimens according to longevity [1, fig. 17]: 1 – aluminium (80 specimens); 2 – capron (polycaproamide, 100 specimens); n – number of specimens

Логнормальное распределение встречается и при исследовании других характеристик твердых тел. Так, плотность распределения значений коэффициентов вариации прочности на одноосное сжатие групп образцов горных пород, приведенных в [3] (в количестве около 4500 образцов, сведенных в 486 групп), соответствует логнормальному распределению [4]. При этом плотность распределения результатов испытаний 6070 образцов горных пород на одноосное растяжение, сведенных в 405 групп [3], соответствует нормальному распределению (Гаусса) [4].

При расчете вероятности карбонизации железобетона, существенно определяющей его прочность, из используемых восьми вероятностных параметров для пяти рационально принять логнормальное распределение [5]. Такая же расчетная модель использована при расчете глубины и распространения фронта карбонизации в бетоне гидротехнических сооружений Хабаровского края [6].

Как показывает сопоставление кинетических характеристик процесса разрушения (долговечности τ) и деформирования (скорости установившейся ползучести ϵ^*) [1, с. 506], в результате опытов обнаружена тесная связь между величинами τ и ϵ , проявляющаяся в постоянстве их произведения:

$$\tau \epsilon = \text{const.} \quad (2)$$

Исключения из этого правила относительно редки, но известно, что оно оказывается чувствительным к виду напряженного состояния.

Аналогичная зависимость приведена у С. С. Вялова [7, с. 285, 286]. Так, на стадии установившегося течения деформацию ползучести γ_c в любой момент времени τ можно выразить через скорость течения $\gamma_c = \gamma \tau$. В момент разрушения $\tau = \tau_p$ деформация будет равна $\gamma_{c.p} = \bar{\gamma} \tau_p$, что с учетом средней скорости течения дает

$$\bar{\gamma} \tau_p = \text{const.}, \quad (3)$$

где $\bar{\gamma}$ – средняя скорость течения деформации ползучести.

* Ползучесть – пластическая деформация, происходящая при постоянных температуре и напряжении (нагрузке) в зависимости от времени (СТБ 1723–2007).

Приведенный в [7, рис. 9.18] сводный график зависимости между скоростью деформации ползучести и временем до разрушения, по данным для самых разных грунтов, свидетельствует о линейной зависимости $\gamma = f(\tau)$, которая может быть аппроксимирована выражением

$$\lg \tau_p = \lg C + b \lg \bar{\gamma}, \quad (4)$$

где C, b – константы уравнения.

Уравнение длительной прочности грунта в соответствии с [7, с. 324] можно записать в виде

$$\ln \frac{\tau_p}{T} = \frac{\sigma_0}{\sigma} \ln \left(\frac{1}{T} \right), \quad (5)$$

где σ_0 – условно-мгновенная прочность; σ – действующее напряжение, в общем случае переменное во времени – $\sigma = f(\tau)$; T – параметр, характеризующий соотношение неповрежденной площади сечения грунта в начальный момент и в момент разрушения.

При испытании 44 образцов цинка по долговечности [1, с. 164–167] получен иной вид функции распределения, приведенный на рис. 3 [1, рис. 49], у которого по сравнению с рис. 2 левая ветвь распределения с самого начала ($\tau > 0$) составляет существенную величину (около половины максимальной). Такой вид левой (начальной) ветви распределения объясняется степенью начальной поврежденности испытуемого материала и качеством изготовления образцов.

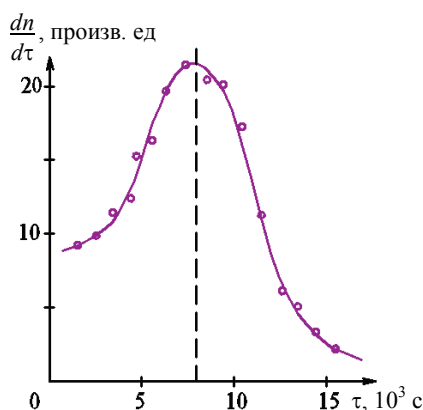


Рис. 3. Распределение образцов цинка (44 образца) по долговечности

Fig. 3. Distribution of zinc specimens (44 specimens) according to longevity

Показанную на рис. 3 функцию распределения величин долговечности, ввиду своеобразия формы, уже не представляется возможным приблизить к нормальному закону путем использования логарифмирования значений времени разрушения (как это получается с кривой на рис. 2.). Таким образом, при наличии существенной начальной поврежденности материала найти подходящую функцию распределения достаточно трудно.

Связь долговечности материала с уровнем его исходной поврежденности и напряженным состоянием рассматривается в [8], где приведено математическое описание такого процесса разрушения в зависимости от уровня номинального напряжения материала. В этой же статье рассмотрено изменение долговечности материала при повторном и ступенчатом нагружении. В приведенном в [8] примере величина исходной поврежденности образцов поликристаллического цинка в этой серии опытов достаточно велика и составляет примерно $\omega_0 = 0,218$.

Сравнение условий разрушения поликристаллического цинка, бетона и глин показывает [9], что с ростом пластичности материала требуется увеличение уровня поврежденности структуры. Так, для поликристаллического цинка [8] уровень начала интенсивного разрушения соответствует поврежденности структуры $\omega_0 \approx 0,20–0,22$. Для бетона [10, рис. 5.7] при общей пористости более 25–30 % потеря прочности наступает при $\omega_0 \geq 0,25–0,30$. Для каолиновой массы [7] разрушение может происходить уже при $\omega = 0,36$ (36 % поврежденности структуры), для юрской глины – при $\omega \geq 0,4$ (~40 %). Как следует из приведенных данных, с ростом пластичности для разрушения материала необходимо большее повреждение структуры.

При прогрессирующей деформации время выхода на лавинообразное разрушение образцов каолина заметно зависит от величины напряжения [9, рис. 5]. Использование шести значений из семи, приведенных в [7, табл. 10.1], дает зависимость вида

$$\lg \tau_p = a - b\sigma, \quad (6)$$

где a, b – эмпирические коэффициенты, $a \approx 9,34$; $b \approx 6,5$ при σ в кПа и τ в ч.

Эмпирическая зависимость (6) имеет весьма тесную корреляционную связь ($r = 0,99$). Необходимо отметить, что при увеличении напряжения каолина в 1,7 раза время перехода к разрушающей деформации уменьшается почти на три порядка. Следовательно, необходимо особенно осторожно оценивать устойчивость фундаментов зданий при каолиновых и аналогичных грунтах.

Среди горных пород есть большая группа, которая даже в справочнике [3, с. 241–247, 256–260, 265–270] отнесена к строительным материалам. К таковым относятся изверженные (базальты, гранодиориты, граниты и т. п.), метаморфические (мрамор, сланец и т. п.) и осадочные (песчаники, гипсы, известняки и т. п.) породы: всего около 320 разновидностей.

Многовековое ведение горных работ и использование горных пород для строительства обусловили изучение реологических свойств горного массива и слагающих его пород. Среди многочисленных научных работ этого направления особый интерес вызывает статья В. Т. Глушко, В. П. Чередниченко и Б. С. Усатенко [11]. Исследование ползучести горных пород Западного Донбасса, проведенное на 198 образцах 78 пород с максимальной продолжительностью до 9360 ч, показало [11, с. 56–84], что средняя величина отношения деформаций ползучести к условно-мгновенным деформациям для аргиллитов составляет 0,529, алевролитов – 0,427 и песчаников – 0,390.

Для количественного описания относительной величины деформации ползучести для больших моментов времени удобно пользоваться выражением М. И. Розовского [12, 13] в виде

$$\varepsilon(\tau) = \frac{\sigma}{E} \left[1 + \frac{\chi}{\beta - \chi} \left(1 - e^{-(\beta - \chi)(1 - \alpha)^{1 - \alpha} \tau} \right) \right], \quad (7)$$

где χ, β – параметры ползучести; α – параметр, численно равный 0,7; σ – нагрузка на образец; E – модуль упругости.

С увеличением напряжений в образцах меняется качественная картина деформационного процесса. При постоянных напряжениях выше предела длительной прочности через определенный промежуток времени образец горной породы разрушается [11, с. 67]. На кривых ползучести (рис. 4) в этом случае наблюдаются три стадии деформирования: затухающей, устано-

вившейся и прогрессирующей ползучести. При напряжениях, составляющих $(0,7-0,85)\sigma_{сж}$, породы с пределом прочности $\sigma = (14-35)$ МПа интенсивно деформируются на первой стадии ползучести в течение 1–25 ч. Здесь $\sigma_{сж}$ – предел прочности при условно-мгновенном сжатии. На втором участке кривая выполаживается. Напряжения, составляющие $(0,7-0,8)\sigma_{сж}$, вызывают разрушение образцов горных пород через 200–700 ч. Анализ показывает, что предел длительной прочности испытанных горных пород соответствует $(0,7-0,9)\sigma_{сж}$.

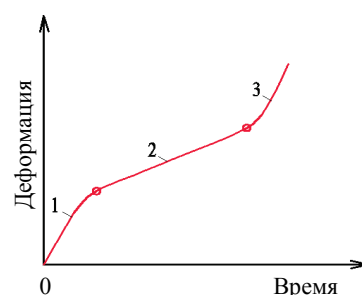


Рис. 4. Развитие деформаций во времени для ползучести: 1 – затухающей; 2 – установившейся; 3 – прогрессирующей

Fig. 4. Development of deformations in time for creep: 1 – decaying creep; 2 – steady-state creep; 3 – progressive creep

Уравнение длительной прочности [11, (III.28)] имеет вид

$$\sigma_{дл}(t) = \sigma_{сж} \sqrt{1 - \frac{\chi}{\beta} \left(1 - e^{-\beta \gamma t^{1-\alpha}} \right)}. \quad (8)$$

Предельное значение длительной прочности пород получено в [11, с. 78] из выражения (8) при $t \rightarrow \infty$

$$\sigma_{дл}^{пр} = \sigma_{сж} \sqrt{1 - \frac{\chi}{\beta}}. \quad (9)$$

Из (9) видно, что величина $\sigma_{дл}^{пр}$ зависит только от отношения параметров ползучести χ/β , т. е. от реологического показателя, который положен в основу классификации горных пород по реологическим свойствам, используемой для приближенного прогноза их поведения при нормальной температуре 20 °С в натуральных условиях (табл. 1, аналогичная [11, с. 79] с замеченной крепости по шкале М. М. Протождяконова на МПа).

Классификация строительных пород по реологическим свойствам
Classification of construction rocks according to rheological properties

Класс ползучести	Ориентировочная прочность на сжатие $\sigma_{сж.}$, МПа	Реологический показатель χ/β	Степень ползучести (пластичности)	Предел длительной прочности $\sigma_{дл}/\sigma$
I	>100	<0,16	Весьма слабая	>0,92
II	50–100	0,16–0,25	Слабая	0,92–0,87
III	30–50	0,25–0,40	Средняя	0,87–0,77
IV	15–30	0,40–0,63	Сильная	0,77–0,61
V	<15	0,63–1,0	Весьма сильная	<0,61

По данным табл. 1 на рис. 5 приведена гистограмма зависимости относительного уменьшения прочности строительных пород от их прочности на условно-мгновенное (очень быстрое) сжатие, из которой наглядно видно уменьшение влияния времени на потерю прочности с ростом прочности пород. Доказательством этому могут служить многочисленные каменные дома и замки Европы, построенные 500 и даже 1000 лет назад. Похожей долговечностью обладают крепостные стены и башни России, возведенные из высококачественного обожженного кирпича на таком же растворе более 500 лет назад (Смоленская крепость и Кремль).

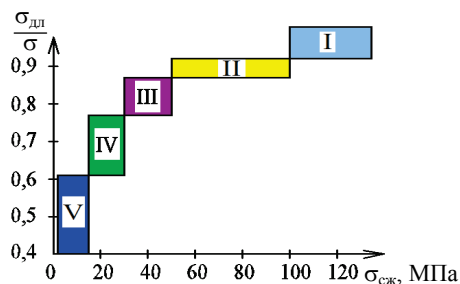


Рис. 5. Влияние природной условно-мгновенной прочности пород на сжатие на величину длительной прочности: I – весьма слабая степень ползучести; II – слабая степень ползучести; III – средняя степень ползучести; IV – сильная степень ползучести; V – весьма сильная степень ползучести

Fig. 5. Influence of structural nominal and instantaneous rock strength on compression under value of long-term strength: I – rather poor degree of creep; II – poor degree of creep; III – medium degree of creep; IV – strong degree of creep; V – rather strong degree of creep

Интересная аналогия наблюдается (рис. 6) между кривыми длительной прочности ($\sigma_{дл}/\sigma$) некоторых горных пород [11, с. 73, рис. 26] и коэффициентами интенсивности напряжений

на отрыв ($K_I = \sigma\sqrt{\pi l}$ [14]) на берегах трещин в твердом материале, прекрасно использованными в [10, с. 69, с. 93, рис. 3.28 и с. 103, рис. 4.1] для зависимостей ($K_{Ic}(\tau)/K_{Ic}(28)$) и $K_{Ic}(\tau)$ при 20 °С. Необходимо заметить, что на рис. 6 кривые длительной прочности пород (1 и 2), характеризующихся прочностью на сжатие в диапазоне 15–90 МПа, что примерно соответствует прочности бетона, проведены только до $\tau \approx 100$ сут., а расчетные кривые для бетона 3, 4 и 5 – до 400 и 18250 сут. (~50 лет), хотя экспериментальные точки (K_I) соответствуют примерно девяти годам. Следует отметить, что изменение прочности и трещиностойкости (которая является основной причиной разрушения бетона) во времени после 28 сут. (рис. 6, кривые 3–5) имеет противоположные направления [10, с. 57, рис. 3.1]. При этом скорость уменьшения трещиностойкости превышает увеличение прочности во времени.

Как сказано в учебнике Ю. М. Баженова, «в настоящее время еще не разработаны способы, которые позволяли бы надежно определять глубину разрушения бетона при коррозии на основе данных о его составе и условий агрессивного воздействия» [15, с. 180]. По-видимому, здесь ключевым является понятие «надежно», чего не удалось достичь за последние 15 лет ([15] было издано в 2002 г.) до настоящего времени. Так, до сих пор нет практических методик расчета вероятностных характеристик теоретического прогноза глубины разрушения бетона во времени ни для одного из трех видов возможной коррозии бетона [15, с. 170]. Уменьшение прочности строительных материалов во времени необходимо учитывать при оценке надежности строительных элементов и конструкций, что зачастую производится не в полной мере.

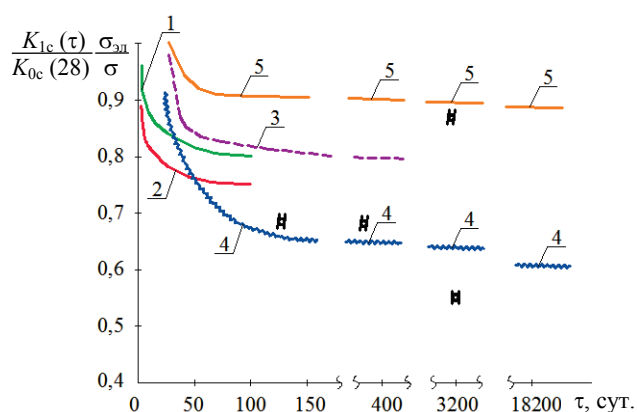


Рис. 6. Влияние времени на относительную прочность пород и трещиностойкость бетона: 1 – алевролит; 2 – аргиллит; 3 – расчетная величина относительной ($K_{1c}(\tau)/K_{1c}(28)$) интенсивности напряжений на отрыв; 4, 5 – расчетные величины (линии) и экспериментальные точки (β) изменения относительной интенсивности напряжений на отрыв во времени

Fig. 6. Influence of time on relative strength of rocks and concrete crack resistance: 1 – aleurolite; 2 – argillite; 3 – calculation value of relative ($K_{1c}(\tau)/K_{1c}(28)$) intensity for discontinuity stresses; 4, 5 – calculation values (lines) and extreme points (β) for changing relative intensity of discontinuity stresses in time

Для прогнозирования глубины разрушения бетона в диффузионный период [15, с. 181], что чаще встречается на практике, рекомендуется использовать выражение

$$h = \frac{k\sqrt{\tau} - a}{\text{ЦП}}, \quad (10)$$

где $k = (P_1 - P_2) / (\sqrt{\tau_1} - \sqrt{\tau_2})$; P_i , $\sqrt{\tau_i}$ – координаты двух точек на опытной кривой коррозии, построенной в координатах $P = f\sqrt{\tau}$; $a = k\sqrt{\tau_1} - P_1$; Ц – расход цемента в бетоне; P – содержание СаО в цементе (по данным химического анализа).

Из (10) легко определить долговечность τ при известной предельно допустимой глубине разрушения бетона.

В случае диффузионно-кинетического механизма переноса веществ ориентировочная глубина коррозии линейно зависит от времени [15, с. 184, (8.5)]. Следует отметить, что бетон обладает ползучестью, которая явно зависит от перечисленных в [15, с. 159] 11 факторов, в том числе пяти факторов, существенно

влияющих на меру ползучести [15, рис. 6.6]. При этом диапазон возможного изменения меры ползучести составляет от полутора до пяти раз, в зависимости от времени. Деформации ползучести во времени постепенно затухают, но иногда наблюдаются у бетона в возрасте одного года и более, что аналогично строительным породам [3, 11].

Для сохранения пассивности стали (арматуры) в бетоне необходим ее постоянный контакт с поровой жидкостью, щелочность которой должна иметь водородный показатель $\text{pH} \geq 11,8$ [15, с. 183]. В затвердевшем за 28 сут бетоне начальное $\text{pH} \approx 12,0-12,5$, что больше, чем критическое значение $\text{pH} \geq 11,8$.

Как отмечает Ю. М. Баженов [15, с. 121], теория прочности бетона должна учитывать не только структуру материала, но и статистические закономерности, так как разрушение есть интегральное явление, и конечный результат может изменяться в зависимости от сочетания дефектов структуры, погрешностей испытаний и других факторов, а вероятность тех или иных возможных сочетаний описывается законами статистики. Поэтому описание поведения бетона при нагружении и во времени обусловлено рядом структурных и статистических факторов. При этом для оценки глубины разрушения бетона в диффузионный период влияние времени используется в виде $\sqrt{\tau}$ [15, с. 181], а при диффузионно-кинетическом механизме – прямо пропорционально времени.

Особый интерес для рассматриваемой проблемы представляет статья С. Н. Леоновича [10], в которой в качестве основных исходных научных положений использованы работы А. А. Гриффитса и формулы Л. П. Черепанова [14] и В. В. Панасюка [16] для коэффициентов интенсивности напряжений на берегах трещины при нормальном отрыве и поперечном сдвиге. В результате сложных исследований предложена методика расчета долговечности и несущей способности эксплуатируемых и опытных железобетонных конструкций [10, с. 226–243]. Также предложены три категории долговечности бетона (А – 25–50 лет; В – 50–65 лет и С – 65–75 лет), которые соответствуют определенным интервалам значений аналитических параметров критической трещиностойкости K_{1c} и K_{IIc} в виде $K_c = \sqrt{K_{1c}^2 + K_{IIc}^2}$ [10, с. 106, табл. 4.4].

Однако в [10] нет каких-либо статистических характеристик многочисленных факторов (более 10), которые учитываются при расчете долговечности железобетона. Поэтому приведенные величины долговечности охватывают только какую-то часть реально возможных показателей.

В дальнейшем С. Н. Леонович и О. Ю. Чернякевич, используя результаты западноевропейских исследований, предложили схему расчета срока службы железобетонных конструкций в условиях коррозии карбонизации с учетом индексов надежности или вероятностей отказов в зависимости от необходимого класса надежности конструкции [17, 18]. Однако практическое статистическое подтверждение надежности такой схемы расчета долговечности отсутствует.

Уникальная расчетная модель и соответствующие ей компьютерные программы для количественной оценки свойств бетона и железобетона, в том числе условий разрушения и долговечности, разработаны В. В. Бабицким [19–21]. При этом в модели учтено влияние около 40 факторов, что удалось сделать на базе исследований многих известных ученых. Не имея из-за ограниченности объема статьи возможности описать особенности данной модели, необходимо отметить отсутствие статистических характеристик как отдельных факторов, так и всей модели.

Большой интерес представляет практическое пособие Т. М. Пецольда, В. П. Богданова, В. В. Бабицкого, А. А. Васильева и С. В. Дзирко [22], в котором рассматриваются критерии оценки технического состояния железобетонных конструкций по условиям эксплуатации [22, табл. 5.2, 5.3]. При этом предложена балльность степени коррозии арматуры [22, табл. 5.1, рис. 5.1], из которой следует, что рост карбонатной составляющей K_c сопровождается уменьшением показателя щелочности поровой жидкости бетона, при величине которой $pH \geq 11,8$ [15, с. 183] коррозии стальной арматуры не происходит. Авторы [22, с. 82] утверждают, что при содержании карбонатной составляющей (K_c) от 6,8 до 12,5 % стальная арматура не корродирует, и это соответствует II баллу, при котором pH уменьшается до 11. В целом [22] представляет большой интерес для анализа и обобщения проблемы долговечности бетона и железобетона.

Следует заметить, что в [22, с. 11] отмечена разница в эффективных коэффициентах диффузии CO_2 (D') в бетонах, которая достигает двух порядков. При этом близкие по составу бетоны имеют значительно различающийся D' . Установленные эмпирические зависимости эффективного коэффициента диффузии CO_2 от водоцементного отношения, вида цемента и его расхода, условий твердения бетона и эксплуатации конструкций позволяют лишь весьма ориентировочно оценить длительность защитного действия бетона.

В работе В. Г. Пастушкова [23] уравнение для расчета долговечности железобетона имеет вид системы коэффициентов, отражающих влияющие факторы:

$$D = D_0 K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 K_6 K_7, \quad (11)$$

где D_0 – эталон долговечности, принимаемый равным 60 годам; K_1 – K_7 – коэффициенты, имеющие значения от 0,095 до 4,480, в результате чего долговечность железобетона автомобильных мостов в условиях Беларуси может составлять от 5,7 до 269 лет, т. е. изменяться в пределах около 1,5 порядков.

Однако оценка статистических характеристик используемых факторов также отсутствует. Следует отметить, что влияние времени на интенсивность разрушения бетона оценивается по-разному. Так, Е. П. Матвеев указывает [24, с. 91], что интенсивность разрушения бетона при появлении первых признаков возрастает по зависимости, пропорциональной квадрату времени.

Анализ приведенных методов оценки долговечности твердых строительных материалов, особенно бетона и железобетона, свидетельствует о сложности таких расчетных многофакторных комплексов. Среди приведенных методов наилучшее впечатление своей полнотой производит предложение В. В. Бабицкого [19–21]. Однако ни в одном из методов расчета не учитываются статистические характеристики надежности определения величин используемых факторов и их совместное влияние на итоговую величину.

Определенное влияние на долговечность бетона и железобетона оказывает пластичность (ползучесть) [25, с. 447–452]. Показано [25, с. 452], что к концу заданного срока службы сооружения вследствие ползучести бетона напряжения в арматуре колонны могут

увеличиваться на 50 %, а в бетоне уменьшаться на 25 %.

В статье О. Ю. Чернякевича и С. Н. Леоновича [26], являющейся продолжением [17, 18], на основе расчета изменения толщины защитного слоя бетона при карбонизации обосновывается проектная долговечность железобетонных конструкций. При этом предельные отклонения $\pm\Delta a$ защитного слоя составляют примерно 50–100 % от величины номинального размера a [26, табл. 1]. Поэтому возможные значения $((a + \Delta a)/(a - \Delta a))$ толщины защитного слоя могут различаться в три и более раза при отсутствии оценки вероятности реализации. Становится понятной рекомендация Ю. М. Баженова [15, с. 181] прогнозировать толщину защитного слоя по результатам экспериментов в течение относительно короткого времени.

ВЫВОДЫ

1. Разработка надежного метода расчета долговечности твердых строительных материалов, особенно бетона и железобетона, является сложной научно-технической проблемой.

2. Для надежной оценки долговечности бетона и железобетона следует использовать метод расчета, учитывающий наибольшее количество факторов.

3. Необходимо продолжать исследования в направлении оценки статистических характеристик как отдельных факторов, так и результатов расчета долговечности твердых строительных материалов в целом.

ЛИТЕРАТУРА

- Регель, В. Р. Кинетическая природа прочности твердых тел / В. Р. Регель, А. И. Слуцкер, Э. Е. Томашевский. М.: Наука, 1974. 560 с.
- Браунли, К. А. Статистические исследования в производстве / К. А. Браунли; пер. с англ. В. А. Говоркова; под ред. А. Н. Колмогорова. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1949. 228 с.
- Справочник (кадастр) физических свойств горных пород / О. П. Якобашвили [и др.]; под ред. Н. В. Мельникова [и др.]. М.: Недра, 1975. 279 с.
- Осипов, С. Н. О распределении значений коэффициентов вариации прочности групп образцов горных пород / С. Н. Осипов, Е. А. Смычкин, Р. Г. Шваб // Горная механика и машиностроение. 2013. № 2. С. 52–62.
- Леонович, С. Н. Вероятностная модель карбонизации железобетонных конструкций / С. Н. Леонович, О. Ю. Чернякевич // Наука и техника. 2012. № 5. С. 58–64.
- Шальи, Е. Е. Вероятностный расчет глубины и распространения фронта карбонизации в бетоне гидротехнических сооружений Хабаровского края / Е. Е. Шальи, Л. В. Ким, С. Н. Леонович // Инновации в бетоне, строительстве и подготовке инженерных кадров: материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения И. Н. Ахвердова и С. С. Атаева, 9–10 июня 2016 г., в 2 ч. / редкол.: Э. И. Батыновский, В. В. Бабицкий. Минск, 2016. Ч. 1. С. 243–247.
- Вялов, С. С. Реологические основы механики грунтов / С. С. Вялов. М.: Высш. шк., 1978. 447 с.
- Холодарь, Б. Г. Связь долговечности материала с уровнем его исходной поврежденности / Б. Г. Холодарь // Вестник БрГТУ. Сер. Строительство и архитектура. 2006. № 1. С. 40–45.
- Осипов, С. Н. О стохастической надежности оценки прочностных свойств строительных материалов и конструкций / С. Н. Осипов // Вестник БрГТУ. Сер. Строительство и архитектура. 2007. № 1. С. 93–98.
- Леонович, С. Н. Трещиностойкость и долговечность бетонных и железобетонных элементов в терминах силовых и энергетических критериев механики разрушения / С. Н. Леонович. Минск: Ред. журнала «Тыдзень», 1999. 263 с.
- Глушко, В. Т. Реология горного массива / В. Т. Глушко, В. П. Чердиченко, Б. С. Усатенко. Киев: Наук. думка, 1981. 171 с.
- Розовский, М. И. Ползучесть и длительное разрушение материалов / М. И. Розовский // Журнал технической физики. 1951. № 11. С. 76–80.
- Розовский, М. И. Обработка кривых ползучести на основе интегральных уравнений / М. И. Розовский // Известия вузов. Машиностроение. 1960. № 3. С. 49–54.
- Черепанов, Г. П. Механика хрупкого разрушения / Г. П. Черепанов. М.: Наука, 1974. 640 с.
- Баженов, Ю. М. Технология бетона / Ю. М. Баженов. М.: Изд-во Ассоц. строит. вузов, 2002. 499 с.
- Панасюк, В. В. Предельное равновесие хрупких тел с трещинами / В. В. Панасюк. Киев: Наук. думка, 1968. 246 с.
- Чернякевич, О. Ю. Долговечность железобетонных конструкций в условиях коррозии карбонизации в бетоне без трещин / О. Ю. Чернякевич, С. Н. Леонович. Минск: Стринко, 2007. С. 316–326.
- Чернякевич, О. Ю. Расчет срока службы железобетонных конструкций в условиях коррозии карбонизации / О. Ю. Чернякевич, С. Н. Леонович // Перспективы развития новых технологий в строительстве: сб. науч. статей. Гродно: ГрГУ, 2010. С. 369–375.
- Бабицкий, В. В. Автоматизация расчетов основных технологических параметров при производстве сборного железобетона / В. В. Бабицкий. Минск: БГПА, 1997. С. 153.
- Бабицкий, В. В. Метод прогнозирования коррозионного состояния стальной арматуры железобетона / В. В. Бабицкий, С. Н. Ковшар // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки. 2016. № 8. С. 33–37.
- Бабицкий, В. В. Структура и коррозионная стойкость бетона и железобетона / В. В. Бабицкий // Строительная наука и техника. 2005. № 2. С. 33–38.
- Неразрушающие методы оценки и прогнозирования технического состояния железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в воздушных средах / Т. М. Пецольд [и др.]. Гомель: БелГУТ, 2007. 145 с.

23. Пастушков, В. Г. Напряженно-деформированное состояние и долговечность конструкции проезжей части транспортных сооружений / В. Г. Пастушков. Минск, 2007. 21 с.
24. Матвеев, Е. П. Реконструкция жилых зданий / Е. П. Матвеев. М., 1999. Ч. 1: Теория, методы и технологии реконструкции жилых зданий. 367 с.
25. Справочник по сопротивлению материалов / Е. Ф. Винокуров [и др.]. Минск: Наука и техника, 1988. 463 с.
26. Чернякевич, О. Ю. Расчет состава бетона железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в условиях класса ХС1, в зависимости от толщины защитного слоя / О. Ю. Чернякевич, С. Н. Леонович // Наука и техника. 2016. Т. 15, № 6. С. 460–468.
- Поступила 28.04.2017
Подписана в печать 04.07.2017
Опубликована онлайн 27.07.2018
- REFERENCES
1. Regel V. R., Slutsker A. I., Tomashevsky E. E. (1974) *Kinetic Nature of Solid Bodies Strength*. Moscow, Nauka Publ. 560 (in Russian).
 2. Brownlee K. A. (1947) *Industrial Experimentation*. NY, Chemical Publishing Co., Inc. 151.
 3. Yakobashvili O. P., Levushkin L. N., Osipenko N. M., Protodyakonov M. M., Teder R. I., Il'nitskaya E. I., Mel'nikov N. V. (ed.), Rzhvskii V. V. (ed.) (1975) *Reference Book (Inventory) for Physical Properties of Rock Formations*. Moscow, Nedra Publ. 279 (in Russian).
 4. Osipov S. N., Smychkin E. A., Shvab R. G. (2013) On Distribution of Coefficient Values in Variations of Strength for Groups of Rock Formation Specimens. *Gornaya Mekhanika i Mashinostroyeniye = Mining Mechanical Engineering and Mechanical Engineering*, (2), 52–62 (in Russian).
 5. Leonovich S. N., Tchernyakevich O. Yu. Probability Model for Carbonization of Reinforced-Concrete Structures. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, (5), 58–64 (in Russian).
 6. Shaly E. E., Kim L. V., Leonovich S. N. (2016) Probability Calculation of Depth and Distribution of Carbonization Front in Concrete of Hydraulic Engineering Installations on the Khabarovsk Territory. *Innovatsii v Betonovedenii, Stroitel'nom Proizvodstve i Podgotovke Inzhenernykh Kadrov: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., Posvyashch. 100-letiyu so Dnya Rozhdeniya I. N. Akhverdova i S. S. Ataeva, 9–10 Iyunya 2016 g. Ch. 1* [Innovations in Concrete Science, Construction Production and Training of Engineering Personnel: Proceedings of International Scientific and Technical Conference Dedicated to the 100th Birthday Anniversary of I. N. Akhverdov and S. S. Ataev, June 9–10, 2016. Part. 1]. Minsk, 243–247 (in Russian).
 7. Vyalov S. S. (1978) *Rheological Fundamentals of Soil Mechanics*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 447 (in Russian).
 8. Kholodar B. G. (2006) Relations of Material Longevity with the Level of its Initial Damage. *Vestnik Brestskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Ser. Stroitel'stvo i Arkhitektura* [Bulletin of Brest State Technical University. Construction and Architecture], (1), 40–45 (in Russian).
 9. Osipov S. N. (2007) On Stochastic Reliability for Evaluation of Strength Properties in Construction Materials and Structures. *Vestnik Brestskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Ser. Stroitel'stvo i Arkhitektura* [Bulletin of Brest State Technical University. Construction and Architecture], (1), 93–98 (in Russian).
 10. Leonovich S. N. (1999) *Crack Resistance and Longevity of Concrete and Reinforced Concrete Elements in Terms of Force and Energy Criteria for Fracture Mechanics*. Minsk, Editorial Board of Journal "Tydzen". 263 (in Russian).
 11. Glushko V. T., Tcherednichenko V. P., Usatenko B. S. (1981) *Rheology of Mining Rock Massif*. Kiev, Naukova Dumka Publ. 171 p.
 12. Rozovsky M. I. (1951) Creep and Delayed Fracture of Materials. *Zhurnal Tekhnicheskoy Fiziki = Journal of Applied Physics*, (11), 76–80 (in Russian).
 13. Rozovsky M. I. (1960) Processing of Creep Curves on the Basis of Integral Equations. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Mashinostroyeniye = Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, (3), 49–54 (in Russian).
 14. Tcherapanov G. P. (1974) *Mechanics of Brittle Fracture*. Moscow, Nauka Publ. 640 (in Russian).
 15. Bazhenov Yu. M. (2002) *Technology of Concrete*. Moscow, Publishing House of Association of Educational Civil Engineering Institutions. 499 (in Russian).
 16. Panasiuk V. V. (1968) *Limit Equilibrium of Brittle Solids with Cracks*. Kiev, Naukova Dumka Publ. 246 (in Russian).
 17. Tcherniakevich O. Yu., Leonovich S. N. (2007) *Longevity of Reinforced Structures under Conditions of Carbonization Corrosion in Concrete Without Cracks*. Minsk, Strinko Publ., 316–326 (in Russian).
 18. Tcherniakevich O. Yu., Leonovich S. N. (2010) Calculation of Service life for Reinforced-Concrete Structures under Conditions of Carbonization Corrosion. *Perspektivy Razvitiya Novykh Tekhnologii v Stroitel'stve: Sb. Nauch. Statei* [Prospects for Development of New Technologies in Construction: Collection of Scientific Papers]. Grodno, Publishing House of Grodno State University, 369–375 (in Russian).
 19. Babitsky V. V. (1997) *Automation in Calculation of Main Technological Parameters while Producing Precast Reinforced Concrete*. Minsk, Belarussian State Polytechnical Academy. 153 (in Russian).
 20. Babitsky V. V., Kovshar S. N. (2016) Elements of Forecasting of the Corrosion Condition of the Iron Fittings of Ferro-Concrete. *Vestnik Polotskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya F, Stroitel'stvo. Prikladnye Nauki = Vestnik of Polotsk State University. Part F. Constructions. Applied Sciences*, (8), 33–37 (in Russian).
 21. Babitsky V. V. (2005) Structure and Corrosion Resistance in Concrete and Reinforced Concrete. *Stroitel'naya Nauka i Tekhnika* [Construction Science and Engineering], (2), 33–38 (in Russian).
 22. Petsol'd T. M., Babitskii V. V., Bogdanov V. P., Vasil'ev A. A., Dzirko S. V. (2007) *Nondestructive Methods for Evaluation and Forecasting of Technical State in Reinforced Structures Being Used in Air Environment*. Gomel, Belarussian State University of Transport. 145 (in Russian).
 23. Pastushkov V. G. (2007) *Stress and Deformed State and Longevity of Structures in Traffic Area of Transport Facilities*. Minsk. 21 (in Russian).
 24. Matveev E. P. (1999) *Reconstruction of Residential Buildings. Part 1: Theory, Methods and Technologies for Reconstruction of Residential Buildings*. Moscow. 367 (in Russian).
 25. Vinokurov E. F., Balykin M. K., Golubev I. A., Zayats V. N., Makaruk P. N. (1988) *Reference Book for Material Resistance*. Minsk, Nauka i Tekhnika. 463 (in Russian).
 26. Tcherniakevich O. Yu., Leonovich S. N. (2016) Concrete Mix Design for Structures Subjected to Exposure Class ХС1 Depending on Concrete Cover *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 15 (6), 460–468 <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2016-15-6-460-468> (in Russian).
- Received: 28.04.2017
Accepted: 04.07.2017
Published online: 27.07.2018