

4. Korobetskiy I. A., Shpirt M. Ya. *Genesis i svoystva mineral'nykh komponentov ugley* [Genesis and properties of coal mineral components]. Novosibirsk: Nauka, 1988, 227 p (in Russian).
5. Grim R. E. *Mineralogiya i prakticheskoe ispol'zovanie glin* [Mineralogy and practical use of clays]. Moscow: Mir, 1967, 512 p (in Russian).
6. Kotlyar V. D., Ustinov A. V., Kovalev V. Yu., et al. Compression molding structural clay tile based on gaize and waste coal. *Stroitel'nye materialy*, 2013, no. 4, pp. 44–48 (in Russian).
7. Ustinov A. V., Skapenko Yu. A., Kotlyar A. V. Effective wall ceramics products based on gaize and coal slurries. *Sovremennye tekhnika i tekhnologii: sb. tr. XIX Mezhdunarodnoy nauch.-prakt. konf. studentov, aspirantov i molodykh uchenykh*. Tomsk: TPU, 2013, vol. 2, pp. 172–173 (in Russian).
8. Kotlyar V. D., Ustinov A. V. Effective wall ceramics based on gaize and waste coal. *Naukovedenie: Internet-zhurnal*, 2013, no. 3 (16) [Electronic resource]. URL: <http://naukovedenie.ru>. 31TRGSU313 (in Russian).

О МЕХАНИЗМЕ ПОЛЗУЧЕСТИ ЦЕМЕНТНЫХ БЕТОНОВ

Г. Н. Пшеничный, Ю. Ю. Галкин, Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар

Ключевые слова: гидратация цемента, стадийность процесса, микробетон, ползучесть, остаточные поверхностно-активные зоны

Key words: cement hydration, the staging process, microconcrete, creep, residual surface-active zone

Одним из сопутствующих процессов, протекающих при твердении бетона и несущих железобетонных конструкций в эксплуатационный период, является пластическое необратимое деформирование композита при приложении сжимающей нагрузки (ползучесть). Развивающаяся деформация становится причиной трещинообразования изделий и конструкций, потери усилий натяжения в предварительно напряженном железобетоне, увеличения максимального прогиба пролетных элементов. Негативные последствия и непредсказуемость деформации ползучести могут привести (и приводят!) к надвигающейся угрозе аварийной ситуации. Стало, к примеру, порочной практикой повсеместное усиление колонн монолитных многоэтажных зданий обоймами из силового проката. В связи с этим очевидна актуальность уточнения физической сущности ползучести бетонов, что позволит обосновать выбор соответствующих технологических режимов для повышения надежности зданий и сооружений, прогнозировать их поведение в конкретных условиях эксплуатации.

Впервые явление неупругой деформации цементного бетона при длительном нагружении установил Е. Фрейсине (1938 г.). По его воззрениям, бетон – это капиллярно-пористый материал, состоящий из твердого скелета и пор, заполненных водой и воздухом. Под действием приложенной нагрузки происходит вязкое перемещение воды по тонким капиллярам, что приводит к капиллярной усадке вследствие нарушения гигрометрического равновесия с окружающей средой и развитию деформаций ползучести. Однако данное представление едва ли можно признать исчерпывающим, поскольку оно не объясняет ползучесть в водной среде, когда влияние капиллярных сил минимально, а также протекание необратимых деформаций при изгибе, кручении, растяжении, сдвиге и т. п., при которых роль силового отжатия воды несущественна.

Р. Е. Дэвис, Г. Е. Дэвис, С. В. Александровский, Р. Лермит, Т. С. Пауэрс, У. Гансен, З. П. Базант, А. М. Невилль, Р. Ф. Фельдман связывают деформацию ползучести главным образом с механическим отжатием воды, адсорбированной на поверхностях частичек цемента и новообразований, а также кристаллизационной (межслоевой) воды в результате силового воздействия. Отдельные положения этой гипотезы близки к представлениям Е. Фрейсине. Однако данная гипотеза не объясняет причин затухания деформаций, стабильности структуры и даже улучшения прочностных свойств цементного камня в условиях неизбежного нарушения сплошности смещающихся друг относительно друга структурных элементов. Она не согласуется и с известными фактами, свидетельствующими о ползучести предварительно высушенных образцов, а также о повышении интенсивности деформаций при длительном нагружении с увеличением влажности окружающей среды.

В отечественном бетоноведении распространена схема А. Е. Шейкина [1], рассматривающая ползучесть как результат перераспределения усилий между компонентами цемент-

ного камня (по В. Н. Юнгу, микробетона), содержащего, по мнению автора, следующие структурные составляющие (рис. 1):

кристаллический сросток, сформированный сросшимися кристаллогидратами – продуктами гидратации цемента (гидроалюминатами и гидроферритами кальция, известью, этtringитом и др.);

наполняющий сросток тоберморитовый гель, представляющий собой взвесь субмикроскопических кристаллов гидросиликатов кальция с адсорбционно связанной водой;

не полностью гидратированные цементные зерна (так называемые ядра), являющиеся балластом, переставшим играть активную роль в химизме процесса и твердении;

сообщающиеся поры, капилляры, микротрещины, межзерновые пустоты различных размеров и конфигураций с адсорбционно связанной и свободной (гравитационной) водой.

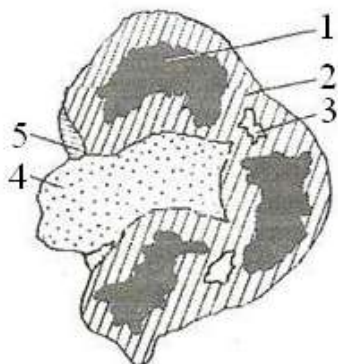


Рис. 1. Фрагмент кристаллизационно-коагуляционной структуры цементного камня:

- 1 – цементное ядро; 2 – кристаллогидратные образования;
- 3 – микропоры; 4 – включения гелевых структур;
- 5 – жидкая фаза

Таким образом, на начальном этапе усилие воспринимается как кристаллическим сростком, так и тоберморитовым гелем. Поскольку энергия связи в коагуляционных (гелевых) контактах меньше, чем в кристаллизационных (химических) сшивках сростка, по мере увеличения внешней нагрузки, возникновения механического напряжения и тепловых флуктуаций происходит постепенное разрушение гелевых структур. В результате вязкого течения гель разгружается, а кристаллический каркас вместе с «несущими» не нарушенными контактами геля гидросиликатов кальция принимает на себя дополнительные усилия. Деформирование геля при этом способствует релаксации внутренних напряжений, и деформация ползучести имеет затухающий во времени характер.

Если движущая сила процесса по А. Е. Шейкину заключается в течении тоберморитового геля и передаче усилий на неподвижный жесткий каркас кристаллогидратов, то А. К. Малмейстер, И. И. Улицкий, Я. В. Столяров и некоторые другие исследователи определяющим фактором механизма ползучести полагают пластическую деформацию не гелевой, а именно кристаллической составляющей цементного камня. Между тем опытные данные, полученные при пропитке нагружаемых образцов неполярным керосином с тем, чтобы смазочное действие вещества в структуре цементного камня облегчило межплоскостное скольжение кристаллической структуры, не подтвердили данную теорию – ползучесть таких образцов едва наблюдалась даже при высоких уровнях напряжения.

Весьма распространено представление о том, что причиной ползучести является возникновение и развитие в структуре цементного камня микротрещин, которые развиваются и превращаются в макротрещины, обуславливая протекание деформативных процессов (О. Я. Берг, А. В. Саталкин, З. Н. Цилосани, Д. Е. Чоговадзе, Г. Рюш, А. В. Яшин, К. Г. Красильников, С. Н. Журков, Б. Н. Нурзулаев). Элементарный акт остаточной деформации – разрыв межатомных связей, приводящий к возникновению субмикротрещин, перерастающих по мере их накопления в микро- и макротрещины [2].

На современном этапе развития бетоноведения в описание явления ползучести ничего кардинально нового привнесено не было. В результате изучения структуры бетона на наноразмере М. Вандамм и Ф. Ульм [3] пришли к выводу о том, что причина ползучести заключается в перераспределении наноразмерных частиц гидросиликата кальция (C–S–H), изменяющих плотность своей упаковки – в одних местах на большую, в других – на меньшую. Изменение плотности, а также локальное уплотнение структуры отмечалось ранее О. Я. Бергом при исследовании прохождения ультразвуковых импульсов через находящийся под нагрузкой твердеющий цементный камень.

Исходя из основных принципов рассмотренных гипотез, ползучесть расценивают как явно негативное явление, сопровождающееся трещинообразованием и неизбежным ухудшением прочностных показателей. Однако при напряжениях ниже разрушающих деструкция отсутствует, мало того, многочисленные экспериментальные работы свидетельствуют об улучшении эксплуатационных характеристик цементных бетонов (повышение прочности при изгибе и сжатии, модуля упругости), например, в условиях раннего нагружения, что рекомендуется использовать на практике в качестве эффективного технологического приема [4–9].

При всем разнообразии взглядов ползучесть связывают с протеканием исключительно физико-механических явлений (усадки, деформирования, уплотнения, силового отжатия воды, перераспределения напряжений, микротрещинообразования и т. п.), совершенно не принимая во внимание возможность химических преобразований в условиях силовых воздействий [10]. Реальность же химического аспекта проблемы подтверждается энергетическими расчетами (Р. Л. Дей) и опытным путем (А. Бентур, Н. Б. Милстон, Дж. Ф. Джоун). Методом адсорбции азота установлено увеличение площади поверхности цементного камня после деформации ползучести на 10–20% ([11], с. 42), что можно объяснить не чем иным, как появлением в условиях внешнего давления дополнительной порции гидратированного материала.

Следует отметить, что отсутствие достаточной ясности в понимании механизма ползучести – частный случай, следствие основополагающей, имеющей хронический характер проблемы превращения пластичной цементной массы в камень (гидратационный аспект). Существующая в настоящее время трехстадийная схема твердения цемента и материалов на его основе не отражает в полной мере особенности процесса, подтверждением чему может служить множество не решенных до сих пор вопросов. Так, непонятна причина избирательного растворения цементных минералов, сопровождающегося выходом в поровую жидкость преимущественно ионов кальция (К. Дорш, Ю. С. Малинин, Г. Н. Сиверцев и др.). К аномалиям зачастую относят давно известные и не вызывающие сомнений скачкообразность отвердевания (В. А. Кинд, В. Ф. Журавлев), а также пилообразный рост и сбросы прочности бетонов на поздних этапах (И. Н. Ахвердов, Ю. С. Малинин, Л. А. Малинина, С. А. Миронов, В. Н. Малинский, Т. Л. Пылаева, Д. И. Штакельберг). Распространено стремление к предельно полному превращению цементных зерен в гидратированные соединения, что совершенно невозможно в условиях формирования экранной оболочки новообразований с ничтожной и практически постоянной при любых условиях и на разных этапах твердения толщиной. Наделение некоторых высокодисперсных добавок кристаллозатравочными функциями выглядит архаичным в «не совсем» [12] кристаллическом цементном композите. Все это вводит исследователей и практиков в заблуждение, делает невозможным объективное описание процесса твердения и морфологических особенностей конечного продукта, выявление влияния различных технологических факторов и внешних (в том числе силовых) воздействий, обоснование выбора рациональных приемов и режимов, обеспечивающих повышенную эксплуатационную надежность бетона и железобетона.

Взаимодействие гетерогенной цементной системы имеет поверхностный характер, предусматривающий переход из исходного в гидратированный вид через стадию формирования и развития на границе раздела фаз переходного активированного комплекса, что полностью соответствует фундаментальному положению химической кинетики гетерогенных реакций [13]. Активированный комплекс представляет собой определенным образом сосредоточенные на клинкерной поверхности шатровые полимолекулярные структуры с исходным диаметром ($D_{исх}$, рис. 2) до 0,5 мкм (впервые обнаруженные американскими исследователями в середине прошлого столетия), неравновесность которых определяется динамизмом (постоянным нарушением и возобновлением структуры) адсорбированных диполей и наличием под дипольными сводами огромного количества энергетически ненасыщенных активных центров (связей ионов кальция) твердой фазы. Развитие переходных структур идет по пути эстафетного ослабления и разрушения сетки Н-связей, концентрации диполей у адсорбционных центров (показано стрелками на рис. 2), возмущения, достижения критического уровня, распада (разрушения Са–О-связей) системы, появления активных элементов (Ca^{2+} , $(SiO_4)^{4-}$, H_3O^+ , OH^- и др.) и их быстротечного взаимодействия. При этом структуру цементных минералов покидают преимущественно ионы кальция; кремнекислородные гидролизные остатки остаются на своих исходных рубежах, гидратируются и образуют водонепроницаемый экраный барьер, делающий невозможным глубинное распространение гид-

ратационного фронта. Процесс протекает стадийно, скачкообразно – с полуторачасовыми индукционными (подготовительными) интервалами в начальный период обычного твердения, превращающимися со временем (по мере снижения количества активной воды, повышения энергии связи диполей, уменьшения поверхностной энергии цементных зерен) в сутки, недели, месяцы...

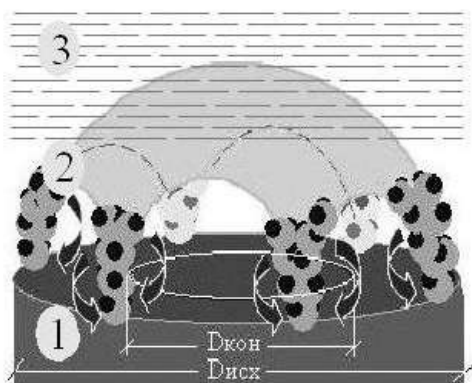


Рис. 2. Схема строения переходного энергетического комплекса:
1 – фрагмент цементной частицы;
2 – полимолекулярный дипольный свод;
3 – область свободной воды

Стадийность гидратационного процесса приводит к последовательному снижению диаметра шатровых комплексов за счет заполнения покрываемой клинкерной поверхности клеящим материалом – гидросиликатом. Стадийное потребление цементными минералами воды затворения сопровождается развитием в межзерновых пустотах вакуума – движущей силы отвердевания и становления микробетона (бетона в целом). Логическое завершение процесса – формирование на гидратированной поверхности цементных зерен локально расщепленных поверхностно-активных зон ($D_{кон}$, рис. 2), включающих остаточные активные центры и адсорбированные диполи, которые легко обнаруживаются электронной микроскопией в виде сферических пор и цилиндрических каналов диаметром 0,1–0,3 мкм и менее (рис. 3). Эти зоны относительно равновесны, сохраняются в цементном композите неопределенно продолжительное время, становятся объектами естественной поздней гидратации с неизбежным возникновением внутренних структурных напряжений и временным сбросом прочности.

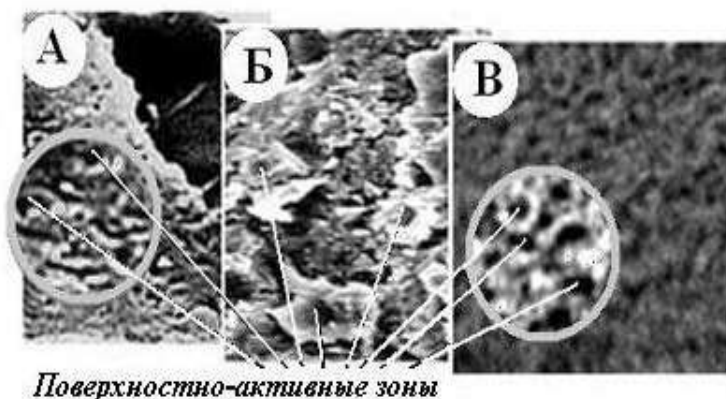


Рис. 3. Фрагменты гидратированной поверхности цементных зерен трехмесячного (А, Б) и 105-летнего (В) возрастов

Затвердевший цементный камень (бетон, железобетон), таким образом, не есть нечто замершее, неизменное, данное на века. Это сложная, постоянно изменяющаяся энергетическая система, обладающая чрезвычайной чувствительностью и адаптационной способностью к окружающей среде, «некоторым формальным сходством с живым организмом» [14]. Многие внешние (термохимические, электрофизические, вибрационные, в том числе силовые) воздействия способны активировать адсорбционно-связанную воду, нарушить равновесие поверхностно-активных зон, спровоцировать одновременную гидратацию цементных минералов на подавляющем большинстве зерен со сложно прогнозируемым результатом.

Приведем достаточно убедительный аргумент в пользу не только поверхностного характера отвердевания цемента, но и химической природы ползучести бетонов (рис. 4). При получении сколов разрушение эталонного и испытанного в течение 10 сут на ползучесть образцов произошло по цементным зернам (путем вскрытия их гладкой поверхности), что позволило оценить толщину гидратированного продукта (обведено на рис. 4), которая не пре-

вышает 1,5 мкм. Этот параметр практически неизменен на всем протяжении существования цементного композита при любых температурно-влажностных условиях. Кажущееся противоречие между постоянством толщины экранной пленки и неуклонным повышением степени гидратации вяжущего вещества достаточно просто объясняется с учетом непрерывного заполнения гидратом остаточных поверхностно-активных зон. Следовательно, вести речь о цементных ядрах нет никаких оснований, а такие понятия, как «глубина гидратации цемента», «степень использования клинкерного фонда» и др., необходимо рассматривать на основе представлений о поверхностном характере отвердевания цемента.

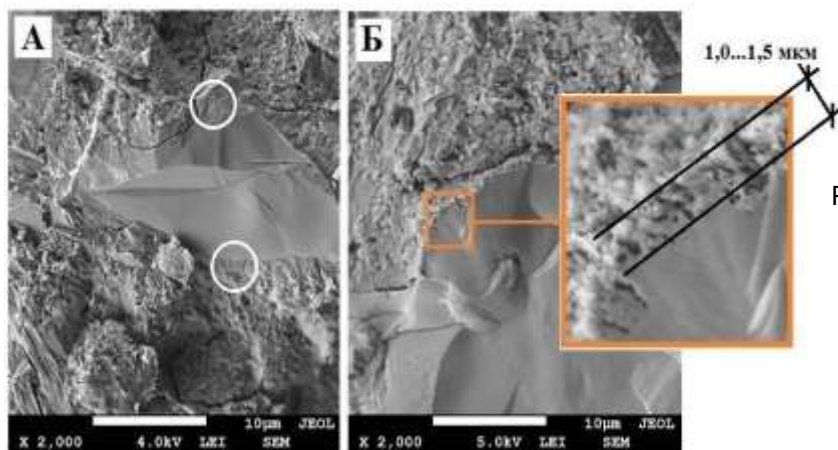


Рис. 4. Строение эталонного (А) и подвергнутого ползучести (Б) цементного камня

Обратим внимание на морфологию гидратированного продукта полученных сколов. Разрушение эталонного, находящегося в относительно структурно-стабильном состоянии образца, произошло по наиболее слабым структурным элементам – порам, межзерновым пустотам, границе раздела массив зерна – новообразования, местам механического взаимодействия выдавливаемого из соседних активных центров гидрата, что дает рядовую и маловыразительную картину (рис. 4, А). В то же время в испытанном на ползучесть образце (рис. 4, Б) появилось дополнительное, обусловленное гидратационным процессом слабое звено – остаточные поверхностно-активные зоны, по которым и произошло разрушение, что красноречиво иллюстрируется данными микроскопии.

В деформативных свойствах бетонов определяющая роль, таким образом, принадлежит не ранее отмеченным зависимым и вторичным физико-механическим явлениям, а химическим процессам. Появляющийся в условиях нагружения гидратный продукт временно снижает прочность межзерновых связей, определяя пластическое деформирование бетона с одновременным залечиванием микродефектов и, при благоприятном стечении обстоятельств, возвращением, а нередко и приумножением прочностных позиций композита.

Выводы

1. Физико-механические представления о деформативных свойствах цементных бетонов не раскрывают в должной мере всех аспектов формирования и развития этих свойств, о чем свидетельствует противоречивость многих экспериментальных данных. Основной недостаток таких представлений (и это давно отмечалось) – отсутствие химической составляющей, которую, в свою очередь, весьма проблематично обосновать с позиций существующей трехстадийной (кристаллизационной) схемы гидратации цементных минералов, структурообразования и упрочнения цементного камня (бетона).

2. Выявление физической сущности ползучести и иных накопившихся в строительном бетоне проблем должно базироваться не на сквозьрастворном (трехстадийном) принципе, а на основе электроповерхностных гидратационных преобразований системы «цемент–вода». Гидратация и твердение цемента протекают путем стадийного формирования в межфазной зоне переходных энергетических комплексов, их развития (аккумулирования собственной энергии), достижения критического уровня и распада (появления активных элементов). Это фундаментальная позиция кинетики гетерогенных реакций.

3. Стадийно образующиеся энергетические комплексы представляют собой адсорбированные на клинкерной подложке полимолекулярные пористые (шатровые) водные структуры диаметром до 0,5 мкм, неравновесность которых определяется динамизмом диполей и

наличием под их сводами огромного количества энергетически ненасыщенных активных центров – связей ионов кальция. Процесс твердения заключается в последовательном связывании воды цементными минералами, снижении диаметра шатровых композиций, заполнении их оснований аморфным гидросиликатом.

4. Завершение указанного процесса – формирование в гидросиликатной массе остаточных относительно равновесных поверхностно-активных зон диаметром 0,1–0,3 мкм с адсорбционно-связанной водой, играющих сложно прогнозируемую роль в эксплуатационный период. Не прекращающаяся ни на мгновение энергетическая живучесть микробетона обуславливает периодическое возникновение гидратационных явлений на поздних этапах; образующийся при этом с увеличением объема твердой фазы гидрат становится источником внутренних напряжений и причиной сброса прочности бетонов.

5. Остаточные поверхностно-активные зоны чрезвычайно чувствительны к внешним воздействиям, в том числе силовым. Нагружение микробетона (бетона в целом) деформирует структуру, активизирует адсорбционно-связанную воду, провоцирует гидратационный процесс. Ослабление при этом межзерновых связей и есть основная причина пластического (необратимого) деформирования композита. Появляющийся гидратный продукт при благоприятном стечении обстоятельств залечивает микротрещины, возвращает бетону исходные и даже повышенные прочностные показатели.

6. Цементный камень (бетон, железобетон) – сложная, динамичная, находящаяся в постоянном развитии энергетическая система, что обусловлено электроповерхностным характером гидратационного процесса, формированием на затвердевших цементных зернах остаточных поверхностно-активных зон. Многие внешние воздействия (силовые, вибрационные, температурные, электромагнитные и др.) способны активировать связанную воду с неизбежными деструктивными последствиями, что следует учитывать в теории бетоноведения и строительной практике.

7. Путь достижения структурной стабильности и эксплуатационной надежности микробетона (бетона в целом) достаточно очевиден – обеспечение условий предельно возможной степени гидратации портландцемента. С этой целью целесообразно использование тепловой обработки, достаточного количества воды затворения, циклической виброактивации, обеспечение влажностных условий твердения, ограничение применения пластификаторов, минеральных добавок и добавок-электролитов, характеризующихся «положительной» (по О. Я. Самойлову) гидратацией.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шейкин А. Е., Чеховский Ю. В., Бруссер М. И. Структура и свойства цементных бетонов. – М.: Стройиздат, 1979. – С. 185–202.
2. Цицосани З. Н. Усадка и ползучесть бетона. – Тбилиси: Мецниреба, 1979. – 227 с.
3. Vandamme M., Ulm F. Nanogranular origin of concrete creep // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2009. – Vol. 106, № 26. – P. 10552–10557.
4. Саталкин А. В. Изменение структуры и свойств цементного камня и бетона при твердении их под нагрузкой // Труды совещания по химии цемента. – М.: Госстройиздат, 1956. – С. 154–172.
5. Бабич Е. М., Макаренко Л. П. Прочность бетона, твердеющего при трехосном сжатии // Бетон и железобетон. – 1966. – № 7. – С. 29–30.
6. Семенов А. И. Влияние длительного обжата бетона на его прочностные и деформативные свойства // Бетон и железобетон. – 1972. – № 12. – С. 34–37.
7. Красильников К. Г., Никитина Л. В., Скоблинская Н. Н. Физико-химия собственных деформаций цементного камня. – М.: Стройиздат, 1980. – 256 с.
8. Васильев А. П., Мурашкин Г. В. Колонны из бетона, твердеющего под давлением // Бетон и железобетон. – 1983. – № 11. – С. 11–12.
9. Безгодов И. М., Андрианов А. А. Влияние длительного нагружения на физико-механические характеристики высокопрочного керамзитобетона // Технологии бетонов. – 2008. – № 8. – С. 54–56.
10. Александровский С. В., Багрий В. Я. Ползучесть бетона при периодических воздействиях. – М.: Стройиздат, 1970. – 168 с.
11. Рамачандран В., Фельдман Р., Бодуэн Дж. Наука о бетоне. – М.: Стройиздат, 1986. – 280 с.
12. Ученым удалось определить структуру застывшего цемента // Технологии бетонов. – 2009. – № 11–12. – С. 5.

13. Кузнецова Т. В., Кудряшев И. В., Тимашев В. В. Физическая химия вяжущих материалов. – М.: Высшая школа, 1989. – 384 с.
14. Подвальный А. М. Физико-химическая механика – основа научных представлений о коррозии бетона и железобетона // Бетон и железобетон. – 2000. – № 5. – С. 23–27.

REFERENCES

1. Sheykin A. E., Chekhovskiy Yu. V., Brusser M. I. *Struktura i svoystva tsementnykh betonov* [Structure and properties of cement concrete]. Moscow: Stroyizdat, 1979, pp. 185–202 (in Russian).
2. Tsilosani Z. N. *Usadka i polzuchest' betona* [Shrinkage and creep of concrete]. Tbilisi: Metsnireba, 1979, 227 p (in Russian).
3. Vandamme M., Ulm F. Nanogranular origin of concrete creep. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, vol. 106, no. 26, pp. 10552–10557.
4. Satalkin A. V. Changes in the structure and properties of cement paste and concrete hardening them under load. *Trudy soveshchaniya po khimii cementa*. Moscow: Gosstroyizdat, 1956, pp. 154–172 (in Russian).
5. Babich E. M., Makarenko L. P. Concrete strength, hardening under triaxial compression. *Beton i zhelezobeton*, 1966, no. 7, pp. 29–30 (in Russian).
6. Semenov A. I. Effect of prolonged compression of concrete on its strength and deformation properties. *Beton i zhelezobeton*, 1972, no. 12, pp. 34–37 (in Russian).
7. Krasil'nikov K. G., Nikitina L. V., Skoblinskaya N. N. *Fiziko-khimiya sobstvennykh deformatsiy tsementnogo kamnya* [Physico-chemistry of the own strain of cement stone]. Moscow: Stroyizdat, 1980, 256 p (in Russian).
8. Vasil'ev A. P., Murashkin G. V. Columns made of concrete, the hardening under pressure. *Beton i zhelezobeton*, 1983, no. 11, pp. 11–12 (in Russian).
9. Bezgodov I. M., Andrianov A. A. Effect of long-term loading on the physico-mechanical properties of high strength concrete keramsit. *Tekhnologii betonov*, 2008, no. 8, pp. 54–56 (in Russian).
10. Aleksandrovskiy S. V., Bagriy V. Ya. *Polzuchest' betona pri periodicheskikh vozdeystviyakh* [Creep of concrete at periodic effects]. Moscow: Stroyizdat, 1970, 168 p (in Russian).
11. Ramachandran V., Fel'dman R., Boduen Dzh. *Nauka o betone* [The science of the concrete]. Moscow: Stroyizdat, 1986, 280 p (in Russian).
12. Scientists were able to determine the structure of the cured cement. *Tekhnologii betonov*, 2009, no. 11–12, p. 5 (in Russian).
13. Kouznetsova T. V., Kudryashev I. V., Timashev V. V. *Fizicheskaya khimiya vyazhushchikh materialov* [Physical chemistry of binders]. Moscow: Vysshaya shkola, 1989, 384 p (in Russian).
14. Podval'nyy A. M. Physico-chemical mechanics – the basis of scientific concepts of corrosion of concrete and reinforced concrete. *Beton i zhelezobeton*, 2000, no. 5, pp. 23–27 (in Russian).

КОРРОЗИЯ КАК ФАКТОР ДЕГРАДАЦИИ МАТЕРИАЛОВ

**Ю. С. Саркисов, Т. С. Шепеленко, Н. П. Горленко, Д. А. Афанасьев,
Томский государственный архитектурно-строительный университет**

Ключевые слова: коррозия, деградация, металлы, строительные материалы, цемент, бетон, термодинамика, кинетика, синергетика, неравновесное материаловедение

Key words: corrosion, degradation, metals, building materials, cement, concrete, thermodynamics, kinetics, synergetics, nonequilibrium materials

Коррозия (позднелат. *corrosio* – разъедание, от лат. *corrodo* – грызу) – это процесс разрушения твердых тел, вызываемый химическими и электрохимическими явлениями, развивающимися на поверхности тела при его взаимодействии с внешней средой [1]. Огромный ущерб народному хозяйству наносит коррозия металлов. В результате коррозии ежегодно теряется около 10% общего количества выплавляемых черных металлов. Коррозии подвергаются и неметаллические материалы. Например, в Советском Союзе ущерб от коррозии, с учетом косвенных потерь, в 1982 г. составил 40,8 млрд руб., из которых 12–18% приходилось на строительные конструкции [2]. Особо следует выделить среди них коррозию бетонных и железобетонных изделий. Различают разрушение бетона и железобетонных изделий под воздействием агрессивной внешней среды, главным образом в результате фильтрации