

*О ВЗАИМОСВЯЗИ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
БЕТОНА С ЕГО СТОЙКОСТЬЮ*

**В.Н. МИРСОЯНОВ<sup>1</sup>, В.В. БРАТОШЕВСКАЯ<sup>2</sup>, Р.В. МИРСОЯНОВ<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Кубанский государственный технологический университет,  
350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2,  
электронная почта: mir6@mail.ru*

<sup>2</sup> *Кубанский государственный аграрный университет,  
350044, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Калинина, 13,  
электронная почта: violetta-architector@yandex.ru*

Исследована способность тел с капиллярно-пористой структурой сопротивляться действию нагрузок и внутренних напряжений по характеру релаксации возникших в структуре напряжений. Установлено, что кинетика релаксации напряжений в установившейся стадии может служить показателем сравнительной оценки стойкости пропаренных и нормального твердения бетонов при воздействии агрессивных факторов окружающей среды (увлажнение и высушивание, замораживание и оттаивание). Даны рекомендации по увеличению долговечности бетона.

**Ключевые слова:** бетон, капиллярно-пористая структура, деформации, релаксация напряжений, прочность.

Условия эксплуатации бетонных и железобетонных изделий таковы, что на них большое влияние оказывает окружающая среда [1]. Цементный камень и бетон относятся к капиллярно-пористым телам, которые чутко реагируют на изменение внешних условий. К напряженному состоянию, вызванному эксплуатационными нагрузками, физическое воздействие (замораживание и оттаивание, увлажнение и высушивание и др.) приводят к появлению дополнительных внутренних напряжений. Структура цементного камня и бетона – это сложная гетерогенная система, состоящая из твердой, жидкой и газообразных фаз, в граничных слоях которой при изменении внешних условий и возникают указанные напряжения, влияющие на стойкость. Наши исследования путем изменения влажностного состояния тел с капиллярно-пористой структурой позволили представить характер возникающих при этом напряжений в виде зависимостей, показанных на рисунке 1.

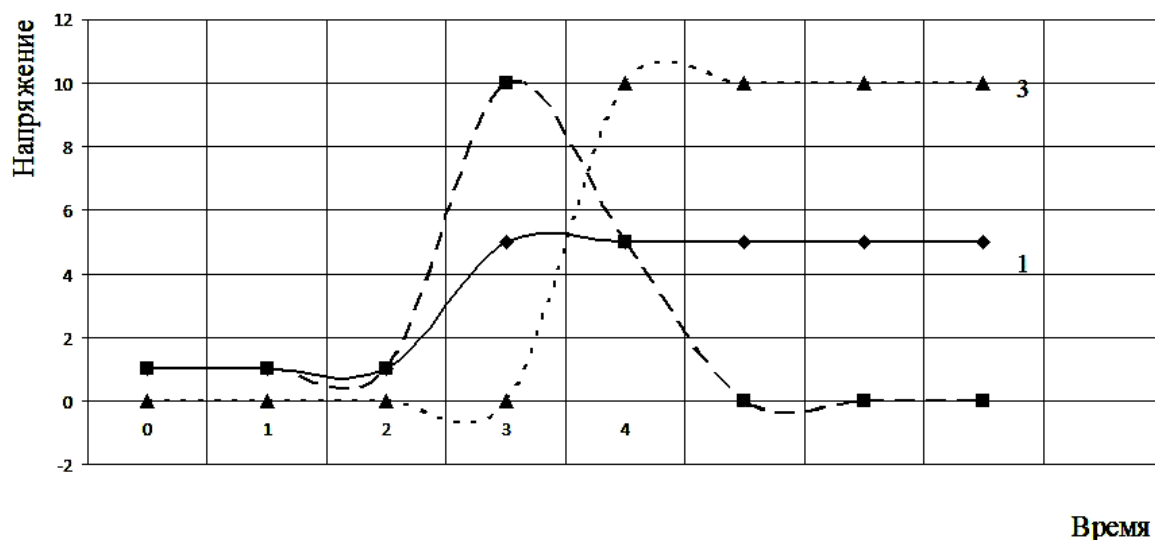


Рисунок 1 - Развитие усадочных напряжений как равнодействующей составляющих его величин.

Как видно из рисунка, усадочное напряжение 1 является сложной величиной – равнодействующей нескольких причин, в том числе капиллярных сил 2, адгезионно-когезионного взаимодействия 3, а также сил упругого сопротивления структуры.

Исследованиями выявлено, что способность тел с капиллярно-пористой структурой сопротивляться действию нагрузок и внутренних напряжений зависит от структурных особенностей материала. Твердая фаза цементного камня и бетона в основном характеризуется наличием двух структурных составляющих - кристаллических продуктов в виде гидрата окиси кальция, шестиводного трехкальциевого алюмината, гидросульфоалюмината кальция, непрореагировавших зерен цемента и заполнителя, а также гелеобразных продуктов в виде субмикрочастиц кальция с переменным составом. Изменение состава бетона и, следовательно, соотношения между структурными составляющими осуществляется различными технологическими факторами – видом и расходом цемента, свойствами заполнителя, условиями твердения и другими [2].

Различные составы бетона по-разному переносят воздействия нагрузок. В нагруженном состоянии во времени могут происходить процессы

перераспределения напряжений между структурными составляющими – в зависимости от вида напряженного состояния, проявляются ползучесть, а также релаксация напряжений.

Учитывая то, что релаксация напряжений как самопроизвольный универсальный процесс стремления любой системы к равновесному состоянию протекает во всех реальных телах, было решено воспользоваться им для оценки стойкости бетона : исследовать внутренние напряжения, развивающиеся в бетоне при колебаниях температуры и влажности, релаксацию напряжений и ползучесть при действии нагрузок и внутренних напряжений и выявить взаимосвязь релаксации со стойкостью бетона.

Исследования проводились на различных составах цементного камня и бетона, причем в большинстве экспериментов обеспечивалось постоянство прочности, чтобы исключить влияние этого фактора на основные показатели, и в то же время исследуемые структуры должны были обладать различным соотношением между структурными составляющими. В основном это достигалось изменением условий твердения бетона.

Исследования показали, что разрушающие усилия с уменьшением влажности бетона уменьшаются с последующим ростом. Однако при выдерживании образцов в течение некоторого промежутка времени при постоянной влажности, соответствующей минимальным разрушающим усилиям, они увеличивались до начальных значений. По этой зависимости легко прослеживаются изменения ряда состояний – водонасыщенное, развитие капиллярных сил, сил адгезионно-когезионного взаимодействия и действие адсорбционных эффектов. Представленные на рисунке 2 зависимости для цементов, твердевших в различных условиях, показывают, что большие значения указанных характеристик обнаружены у цементного камня нормального твердения, связанные с увеличенным содержанием «мягкой» гелеобразной фазы, в то время как в жестких структурах автоклавного твердения препятствие внешнему воздействию (упругие силы сопротивления) создают условия для возникновения остаточных напряжений и деформаций.

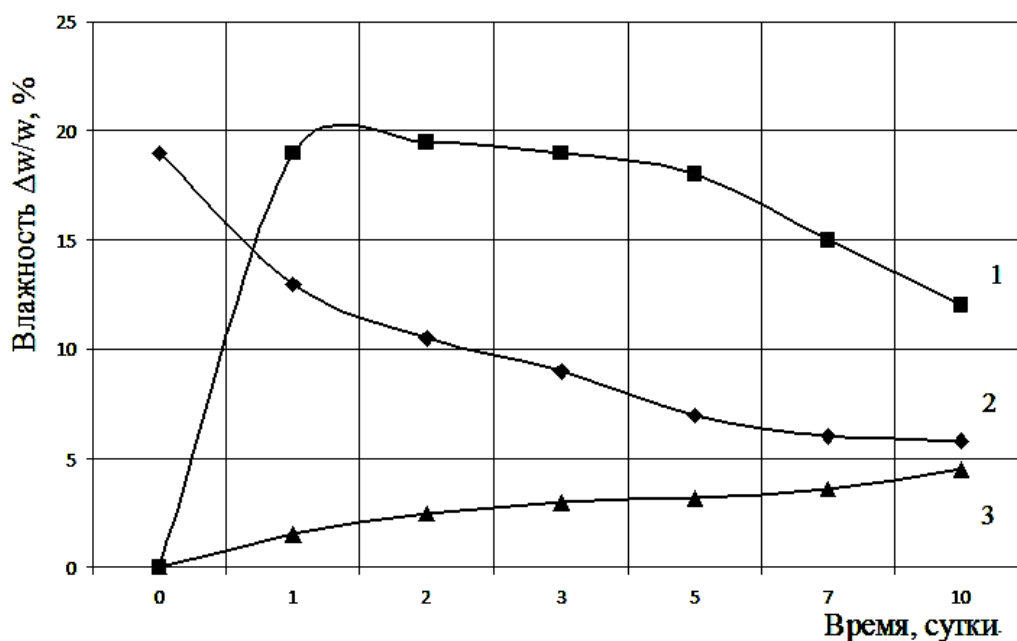


Рисунок 2 - Развитие внутренних напряжений: 1 - при высыхании цементного камня, 2 - влажность, 3 - усадочные напряжения.

Поведение материала в нагруженном состоянии в значительной мере зависит от величины исходного нагружения. Для бетонов, очевидно, исходное усилие должно быть меньше нагрузки, вызывающей неустойчивое деформирование, но в то же время оно должно превышать усилие, приводящее к линейной ползучести, т.е. к началу испытания в материале необходимо обеспечить пластические деформации, связанные с появлением внутренних структурных разрушений – микротрещин. Последние влияют на такие свойства бетона, как водопроницаемость, сопротивление коррозионному воздействию и других, приводящих к снижению стойкости. Способность бетона релаксировать напряжения в таком деформированном состоянии должна в большей степени свидетельствовать о стойкости материала. Основываясь на изложенном и существующих данных о границах компонентов деформации бетона, в наших опытах принято исходное усилие, равное 0,8 от разрушающей нагрузки [3].

Анализ многочисленных экспериментальных данных позволяет представить процесс релаксации напряжений в бетонах в виде экспоненциальной зависимости, представленной на рисунке 3. Из графика видно, что процесс релаксации напряжений в бетоне условно можно разделить

на две стадии: первую, с неустановившейся, затухающей во времени скоростью. Большое количество упругой энергии в деформированном теле в начальный период приводит к интенсивным процессам по поверхности раздела и в контактах срастания структуры, особенно в местах с искаженной кристаллической решеткой. Вторая стадия характеризуется почти постоянной и незначительной скоростью. Энергетический потенциал деформированного тела в этот период незначителен, что приводит к постепенному, достаточно медленному уменьшению упругих напряжений.

Соотношение между указанными стадиями для различных структур не остается постоянным и зависит от структурных особенностей, которые присущи данному составу бетона и изменение которых достигается различными технологическими факторами.

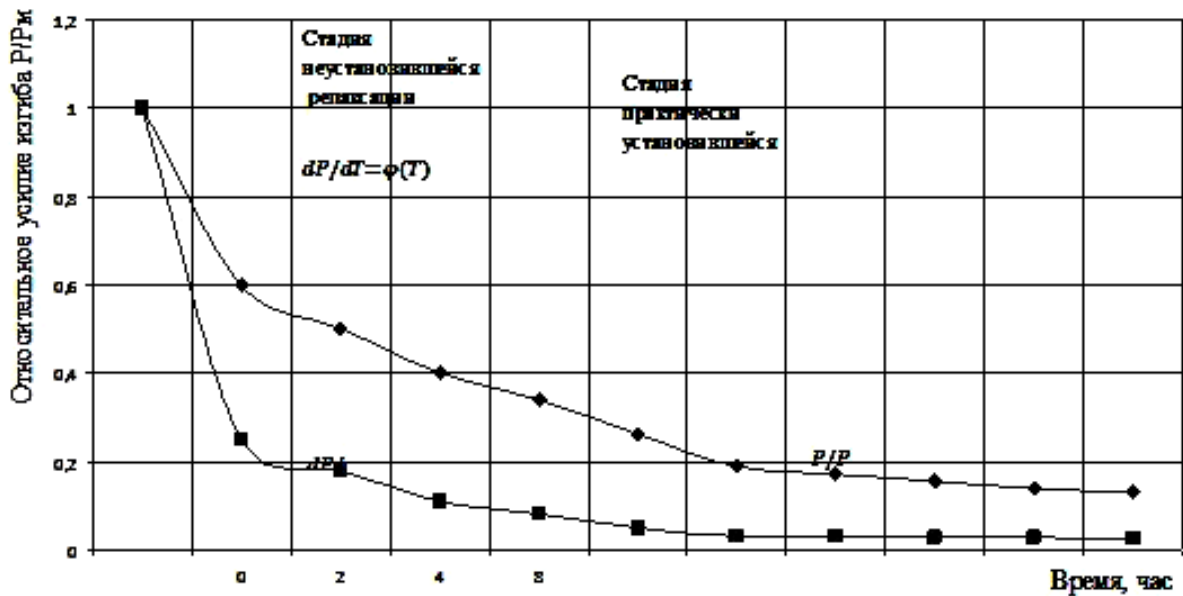


Рисунок 3 - Характер процесса релаксации напряжения в бетоне.

В нашем случае был выбран постоянный состав бетона, пропаренный по различным режимам. Перед тепловой обработкой образцы выдерживались в течение двух часов до окончания индукционного периода гидратации. Выбранные режимы пропаривания позволили установить одинаковую продолжительность собственного пропаривания, что обеспечивало большую

сопоставимость результатов испытаний, которые осуществлялись через 7 и 28 суток нормального хранения, при этом определялись следующие показатели: прочность при сжатии и изгибе, предельная растяжимость, релаксация напряжений и динамический модуль упругости.

Результаты экспериментов показали, что по относительным значениям релаксации напряжений показатели располагаются в следующем порядке: наибольшая – у образцов нормального твердения, затем пропаренных по мягкому режиму, далее пропаренных по жесткому режиму и минимальная у автоклавированных образцов - рисунок 4.

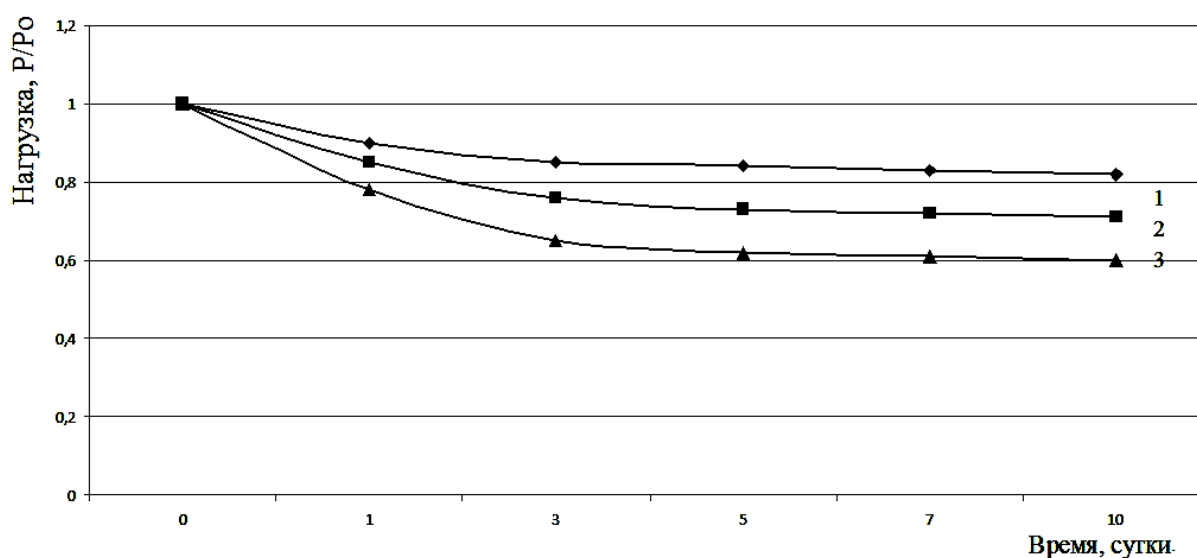


Рисунок 4 - Релаксация напряжения цементного камня В/Ц 0,3, твердеющего в различных условиях:  
1- автоклавной обработки, 2 - пропаренные, 3 - нормальное твердение.

Проведенные эксперименты позволили установить довольно четкую зависимость между характером строения структуры материала и релаксацией. Мелкодисперсная структура бетона нормального твердения позволила релаксировать напряжения значительно больше, чем пропаренных по различным режимам. Пропаренные бетоны релаксируют нагрузку тем медленней, чем выше температура и продолжительность твердения в период изотермического обогрева. Соответственные условия твердения привели к формированию достаточно жесткой кристаллической составляющей, что повышает вероятность деструкции, снижает деформативные свойства. Жесткие

<http://ntk.kubstu.ru/file/1071>

структуры не в состоянии с достаточной скоростью перераспределить напряжения, быстро рассеять энергию деформации.

Проведенные параллельно испытания по стойкости бетонов показали, что физическая стойкость равнопрочных структур находится в прямой зависимости от их способности релаксировать напряжения. Наибольшей стойкостью обладают бетоны нормального твердения. Далее расположены бетоны, прошедшие тепловую обработку и показавшие более медленную релаксируемость. В опытах отмечено, что чем ниже температура пропаривания и мягче режим твердения, тем больше в структуре гелеобразной фазы, ответственной за ползучесть и релаксацию. Поэтому, микротрещины и микродефекты в таких структурах, в отличие от хрупких, где они развиваются с большей скоростью, блокируются в процессе пластической деформации, что и обеспечивает большую долговечность структуры.

Полученные данные позволяют заключить о наличии принципиальной возможности оценки стойкости пропаренных бетонов по кинетике

По результатам проведенных исследований можно сделать основные выводы:

1. Установлено, что разрушающая нагрузка, усадка и усадочные напряжения в цементном камне и бетоне возрастают с увеличением гелевой структурной составляющей. Такие же структуры оказались более стойкими при агрессивном воздействии окружающей среды.

2. Обнаружено, что абсолютные значения уменьшения напряжений при релаксации не находятся в прямой зависимости от прочности бетона, а в большей степени зависят от соотношения между структурными составляющими и дефектами, возникшими в процессе ускоренного твердения. При циклических воздействиях окружающей среды (увлажнение и высушивание, замораживание и оттаивание) способность бетона к релаксации и ползучести увеличивается. При этом более «мягкие» структуры проявляют большую сопротивляемость разрушающему действию нагрузок и внутренних напряжений, развивающихся при агрессивном воздействии.

3. Установлено, что кинетика релаксации напряжений в ее практически установившейся стадии, наряду с известными показателями, может служить сравнительной оценкой стойкости пропаренного бетона при увлажнении и высушивании, замораживании и оттаивании.

Для увеличения долговечности бетона и его способности релаксировать напряжения рекомендуется:

- применение цементов с минералогическим составом клинкера, позволяющим получать бетоны с относительным преобладанием гелеобразной структурной составляющей.

- использование «мягких» режимов тепловлажностной обработки, приводящей в максимальной степени к сохранению сформировавшейся структуры.

- применение добавок, которые, наряду с улучшением поровых характеристик бетона, усиливают его коллоидные свойства.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Братошевская В.В., Иванченко В.Т., Мирсоянов В.Н. Архитектурная и градостроительная экология. – Краснодар. Изд. ГОУВПО «КубГТУ», 2006.-145 с.

2. Братошевская В.В., Мирсоянов В.Н., Мирсоянов Р.В. Об оценке стойкости дисперсных структур бетона: Современная наука: актуальные проблемы и пути их решения, №9(22).- Липецк: ООО «Максимал информационные технологии», 2015.-15-18с.

3. Братошевская В.В., Мирсоянов В.Н., Мирсоянов Р.В. Исследование деформативных свойств бетона при разной степени его нагружения: Потенциал современной науки, №2, март 2015 - Липецк, 2015. - 136с.

#### REFERENCES

1. Bratoshevskaya V.V., Ivanchenko V.T., Mirsoyanov V.N. Arkhitekturnaya i gradostroitelnaya ekologiya. – Krasnodar. Izd. GOUVPO «KubGTU», 2006.-145 s.

2. Bratoshevskaya V.V., Mirsoyanov V.N., Mirsoyanov R.V. Ob otsenke stoykosti dispersnykh struktur betona: Sovremennaya nauka: aktualnye problemy i



puti ikh resheniya, №9(22).- Lipetsk: ООО «Maksimal informatsionnye tekhnologii», 2015.-15-18s.

3. Bratoshevskaya V.V., Mirsoyanov V.N., Mirsoyanov R.V. Issledovanie deformativnykh svoystv betona pri raznoy stepeni ego nagruzheniya: Potentsial sovremennoy nauki, №2, mart 2015 - Lipetsk, 2015. - 136s.

*ON THE RELATIONSHIP OF THE ELASTIC-PLASTIC PROPERTIES OF  
CONCRETE WITH ITS DURABILITY*

**V.N. MIRSOYANOV<sup>1</sup>, V.V. BRATOSHEVSKAYA<sup>2</sup>, R.V. MIRSOYANOV<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Kuban State Technological University,  
2, Moskovskaya st., Krasnodar, Russian Federation, 350072,  
e-mail: mir6@mail.ru*

<sup>2</sup> *Kuban State Agrarian University,  
13, Kalinina st., Krasnodar, Russian Federation, 350044,  
e-mail: violetta-architector@yandex.ru*

Investigated the ability of bodies with capillary-porous structure to resist the action of the loads and internal stresses on the nature of the relaxation occurred in the structure of the stresses. It is established that the kinetics of stress relaxation in the steady-state stage can serve as an indicator for comparative evaluation of resistance of parboiled and normal hardening of concrete when exposed to aggressive environmental factors (wetting and drying, freezing and thawing). Recommendations for increasing the durability of concrete.

**Key words:** concrete, capillary-porous structure, deformation, stress relaxation, strength.