Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal https://esj.today

2022, №3, Том 14 / 2022, No 3, Vol 14 https://esj.today/issue-3-2022.html

URL статьи: https://esj.today/PDF/41SAVN322.pdf

Ссылка для цитирования этой статьи:
Братошевская, В. В. О взаимосвязи релаксации напряжений в бетоне с его упруго-пластическими свойствами / В. В. Братошевская // Вестник евразийской науки. — 2022. — Т. 14. — № 3. — URL: https://esj.today/PDF/41SAVN322.pdf

For citation:
Bratoshevskaya V.V. On the relationship of stress relaxation in concrete with its elastic-plastic properties. *The Eurasian Scientific Journal*, 14(3): 41SAVN322. Available at: https://esj.today/PDF/41SAVN322.pdf. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 620.178

Братошевская Виолетта Витальевна
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина», Краснодар, Россия
Профессор
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: violetta-architector@yandex.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=511325

О взаимосвязи релаксации напряжений в бетоне с его упруго-пластическими свойствами

Аннотация. Исследована способность капиллярно-пористых тел бетона сопротивляться действию внешних нагрузок и внутренних напряжений при воздействии внешней среды. Изучено влияние внутренних факторов: состава бетона, характера пористости, структурных составляющих, условий его твердения на развитие внутренних напряжений и способность их релаксировать. В зависимости от характера структуры материала (жесткая закристаллизованная или «мягкая, податливая) при воздействии агрессивных сред могут быть разные виды напряженного состояния.

Автором представлены результаты исследования релаксации напряжений в цементном камне, который позволил классифицировать процесс по двум стадиям: неустановившаяся — с высокой и установившаяся — с постоянной скоростью.

Изучена и экспериментально проверена зависимость влияния структурных составляющих в цементном камне и бетоне, сформировавшихся при различных режимах твердения на долговечность в условиях обезвоживания, водонасыщения и замораживания.

Доказана взаимосвязь между характером строения структуры материала и релаксацией напряжений при испытании на изгиб образцов цементного камня нормального твердения и пропаренных по различным режимам («мягких и жестких»).

Проведена оценка характера пористости — капиллярной, контракционной и гелевой. Установлено отрицательное влияние на стойкость бетона замораживания водонасыщенных и предварительно подсушенных структур в течение первых суток. Исследованы развитие и релаксация напряжений в зависимости от скорости высыхания капиллярно-пористых структур при развитии напряжений, вызванных колебаниями влажности окружающей среды.

В результате экспериментов было выяснено, при понижении температуры тепловлажностной обработки и мягком режиме твердения, в структуре образуется больше гелеобразной фазы, ответственной за ползучесть и релаксацию.

Ключевые слова: поровая структура бетона; упруго-пластические свойства; усадочные напряжения; релаксация напряжений; стойкость; водонасыщение и высушивание; замораживание и оттаивание

Анализ многочисленных данных показывает, что многие исследователи по-разному оценивают стойкость бетона, причем оценки в определенных условиях могут не совпадать; так, в ряде работ [1; 2] за основной критерий стойкости бетона принято изменение его прочности. Действительно, при кратковременных механических нагрузках поведение структуры материала может определяться способностью воспринимать эти нагрузки (прочность), однако при достаточно длительном воздействии, в силу протекающих процессов ползучести материалов и релаксации возникающих напряжений, необходимы дополнительные структурные показатели. Примером тому может служить тот факт, например, что структуры одинаковой начальной прочности при различных воздействиях имеют разные ее показатели. При многократных воздействиях среды разрушение бетона сопровождается необратимым расширением материала — накоплением остаточных деформаций вследствие микротрещинообразования, и это также принимается за критерий стойкости материалов [3; 4].

Однако показатель необратимых деформаций также недостаточно четко определяет начало необратимого разрушения. Молекулярно-поверхностные силы в конце периода высыхания приводят к уплотнению структуры, фиксируя усадочные напряжения и деформации. При этом мерой отсчета служит состояние структуры бетона в водонасыщенном состоянии. В других случаях предложено определять стойкость бетона по отношению к замораживанию и оттаиванию путем определения количества циклов, в течение которых начальный динамический модуль упругости не меняется [4; 5].

Поскольку бетон является конструкционным материалом, он должен обладать комплексом структурно-механических свойств — прочностью, упругостью, пластичностью. Вследствие своеобразной структуры, свойства которой формируются в процессе изготовления (формования) конструкций, требуемые механические свойства бетона обеспечить достаточно сложно. Поэтому изучение свойств структуры цементного камня и бетона и экспериментальное сопровождение, особенно в нагруженном состоянии, являются актуальными, что позволит приблизиться к познанию его стойкости.

Способность капиллярно-пористых структур противостоять воздействию внешних факторов естественно зависит от реакции структуры — ее упруго-пластических свойств. Если структура материала обладает достаточной прочностью и в тоже время обладает «вязкими», пластическими свойствами, то напряженное состояние вследствие ползучести уменьшается без возникновения опасных напряжений. В «жесткой» кристаллизационной структуре при замерзании лед использует имевшийся резерв пластичности, что приводит к появлению растягивающих напряжений и образованию микротрещин уже в начальные циклы.

Таким образом, в зависимости от характера структуры при агрессивном воздействии среды могут возникнуть разные виды напряженного состояния. В одном случае, если структура достаточно податлива, то стенки капилляров при напряжениях деформируются, возникает своего рода ползучесть с релаксацией внутренних напряжений. В другом — если структура «жесткая», напряжения остаются вследствие невозможности быстрой релаксации. Так, при ползучести и релаксации происходит нарастание пластических деформаций, и в первом случае это выражается в увеличении внешних размеров системы, во втором — происходит своего рода «внутренняя ползучесть» без видимых внешних изменений.

Известно, что в любом материале, особенно в его поверхностных слоях имеются микротрещины различных размеров и ориентации. Под действием приложенной нагрузки на краях микротрещин возникают перенапряжения, во много раз превосходящие величину среднего напряжения, а с ее увеличением происходит катастрофический рост трещин и последующее разрушение материала. Образование микродефектов возможно не только при приложении механических нагрузок. Они могут возникать как в результате тепловых, газообразных и жидких агрессивных сред, так и вследствие несовершенства структуры материала.

Ранее было показано, что скорость релаксации напряжений и величина релаксируемых напряжений равнопрочных структур бетона может явиться при определенных условиях мерой качественной оценки стойкости бетонов [5; 6]. Действительно, если на тело воздействуют достаточно длительные внешние факторы, то с течением времени напряжения, вызванные этими факторами, будут релаксировать. Однако и одно явление релаксации также не может явиться критерием стойкости. При кратковременных нагружениях поведение структуры определяется свойствами упругих элементов, в том числе и прочностью [7–8].

В наших исследованиях влияние структурных составляющих проводилось на цементном камне и бетоне при водоцементном отношении 0,3 и 0,5, твердевших в различных условиях (нормального твердения, пропаренных по различным режимам и автоклавного твердения) и соответственно разной степени деструкции в условиях обезвоживания, водонасыщения и замораживания [5; 6].

Для мониторинга кинетики развития напряжений и деформаций при разных режимах испытаний было использовано оборудование, позволяющее фиксировать показатели внутренних напряжений, релаксации и ползучести.

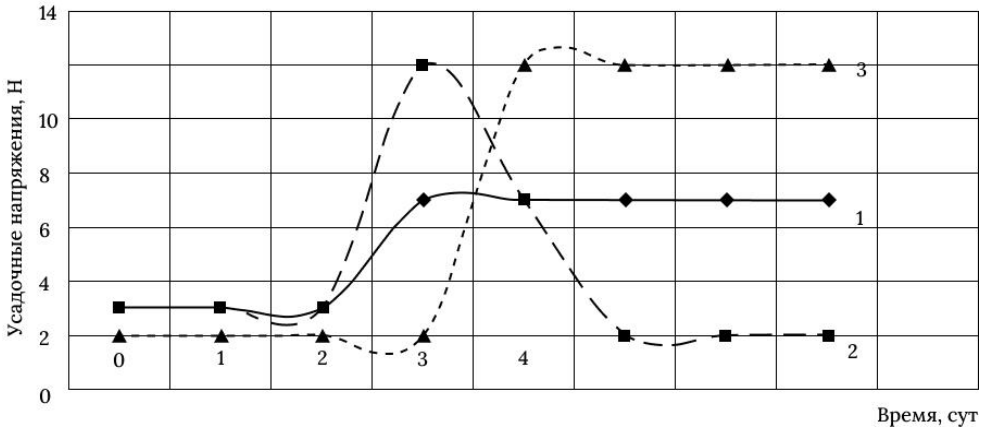

Рисунок 1. *Развитие усадочных напряжений при высыхании образцов:*
1 — результирующая сил упругого сопротивления структуры; 2 — капиллярные силы;
3 — силы адгезионно-когезионного взаимодействия.

Усадочные напряжения в образцах достигают весьма больших значений (для В/Ц 0,3 через 48 часов высушивания они составляли около 50 % от разрушающей нагрузки — рисунок 1). При их действии возможны значительные деформации, а при защемлении противоположных концов образцов происходит релаксация напряжений. В том случае, когда структуры не в состоянии быстро отрелаксировать напряжения, возможно и разрушение материала, как это произошло с образцами с В/Ц 0,5, когда усадочные напряжения через 24 часа достигли разрушающей в данный момент нагрузки, в результате чего часть образцов разрушилась. При этом большое влияние оказывают адгезионные свойства на границе цементный камень-заполнитель. Так, разрушение бетонов с высоким расходом цемента влажных и подсушенных образцов происходило по щебню, а при малом — влажные образцы

разрушались в зоне контакта, что свидетельствует о большом влиянии поверхности межфазного контакта [6].

На рисунке 2 представлены результаты, которые позволяют разделить процесс релаксации на две стадии. Первая — с высокой, затухающей во времени скоростью релаксации (-dP/dτ), вторая — почти постоянной.

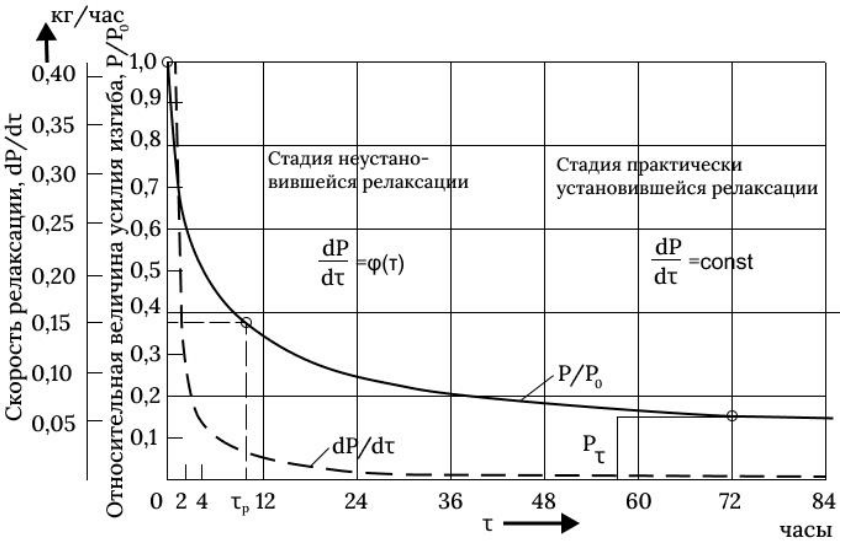

Рисунок 2. *Релаксация усилий изгиба в бетоне*

Достаточно надежным является величина релаксации к определенному моменту времени ($P_0 - P_\tau$) или ($1 - P_\tau/P_0$). В период первой стадии происходит резкое падение приложенной нагрузки. Далее наступает стадия практически установившейся релаксации. В наших опытах для оценки релаксируемости структуры цементного бетона принята относительная величина напряжения P_τ/P_0 к 72 час. Все исследованные нами структуры к этому моменту уже приобретали практически постоянную скорость релаксации (рис. 2, 3).

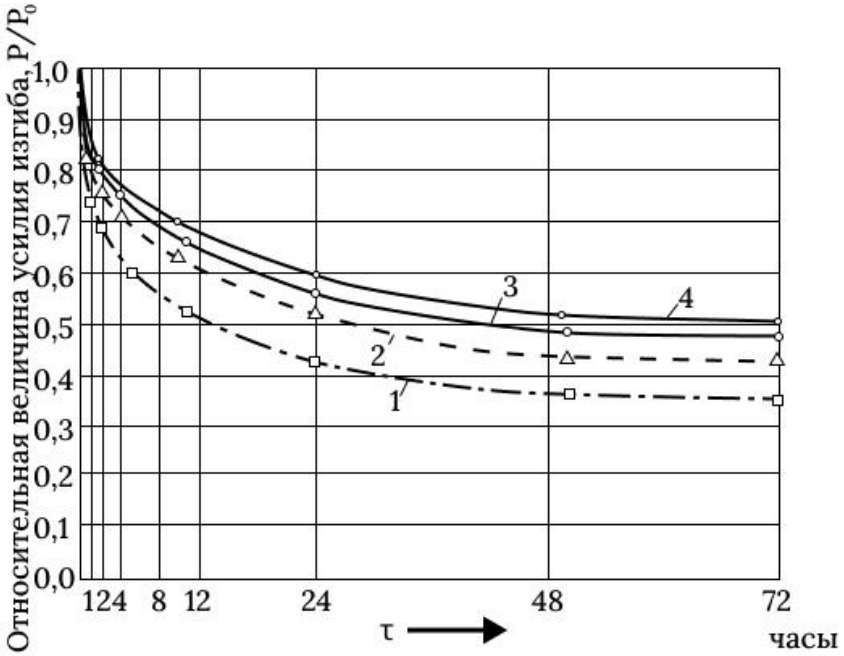

Рисунок 3. *Релаксация нагрузки при изгибе образцов цементного камня: 1 — нормального твердения; 2 — пропаренных по режиму 3 + 8/80° + 2; 3 — по режиму 4 + 1/100° + 3; 4 — по режиму 4 + 5/100° + 3*

Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

По представленным на рисунке 3 графикам можно установить достаточно четкую зависимость между характером строения структуры и релаксацией напряжений.

Пропаренные бетоны релаксируют тем медленнее, чем выше температура и большая продолжительность твердения в период изотермического обогрева, это приводит к преобладанию в структуре кристаллизационной составляющей — в «жесткой» структуре внутренние напряжения «перераспределяются» медленно, что вызывает вероятность деструкции и снижает деформативные свойства материала [9; 10].

При замораживании ненапряженных водонасыщенных и напряженных предварительной подсушкой образцов в их структурах происходят сложные физико-химические превращения, связанные с возникновением напряжений и их наложением на уже возникшие ранее напряжения от высыхания. Когда эти дополнительные напряжения имеют тот же знак, что и возникшие ранее, происходит их сложение — и, как следствие, разрушение материала. Такой эффект наблюдался при замораживании образцов с В/Ц 0,3, высушенных в течение 24 и 48 часов и образцов с В/Ц 0,5 в течение 12 и 24 часов (рис. 4). Если предварительная подсушка не вызвала значительных внутренних напряжений (В/Ц 0,3 в течение 1–12 часов и В/Ц 0,5 в течение 1–6 часов), суммарные напряжения вызывают лишь дальнейшее сжатие структуры до определенного температурного интервала, когда в действие вступают новые факторы.

Установлено, что замораживание водонасыщенных и предварительно подсушенных образцов в течение 12–24 часов отрицательно влияет на стойкость бетона. В первом случае превалирующим фактором является давление замерзшей в порах и капиллярах воды, во втором — совместное действие усадочных и развивающихся при замораживании напряжений, в результате чего возможно разрушение материала.

Предварительная подсушка образцов в течение 1–6 часов способствует к появлению в материале такого напряженного состояния, которое, суммируясь с напряжениями, вызванными замораживанием, способствуют сжатию структуры. Это — положительный фактор, поскольку, как известно, бетон выдерживает значительные нагрузки при сжатии.

При исследовании влияния режима тепловлажностной обработки бетона на развитие внутренних напряжений при замораживании проводилась оценка характера пористости, в том числе капиллярной, контракционной и гелевой. В зависимости от скорости высыхания капиллярно-пористых структур, длительности сушки, количества удаленной влаги и свойств высыхаемого объекта в нем развиваются, фиксируются и релаксируют напряжения, вызванные колебаниями влажности окружающей среды. При изменении суточных и сезонных температур в материале происходит дополнительное перемещение влаги, также влияющее на физико-механические изменения в материале.

Воздух и жидкая фаза, находящиеся в микро- и макротрещинах цементного камня, мигрируют при изменениях температуры и влажности среды. При уплотнении структуры возникающими из пересыщенных растворов кристаллогидратными новообразованиями, растет ее поверхность и соответственно увеличивается количество гидратно-связанная с ней вода, подвижность которой изменяется с температурой. Вся эта система межфазных структурных связей и взаимодействий в бетоне изменяется при охлаждении и, особенно при фазовых переходах в процессе замерзания (рис. 4). Рост напряжений, продолжается и в области отрицательных температур, как представлено на графиках. Очевидно, что область спада напряжений и усадки цементного камня является температурным интервалом замерзания слабосвязанной воды. Этот интервал лежит несколько ниже нуля, потому что жидкая фаза представляет собой раствор, часть воды которого связана со структурой гидратно. При дальнейшем понижении температуры, когда расширение, вызванное фазовым переходом воды, закончено, продолжается обычное сжатие [6].

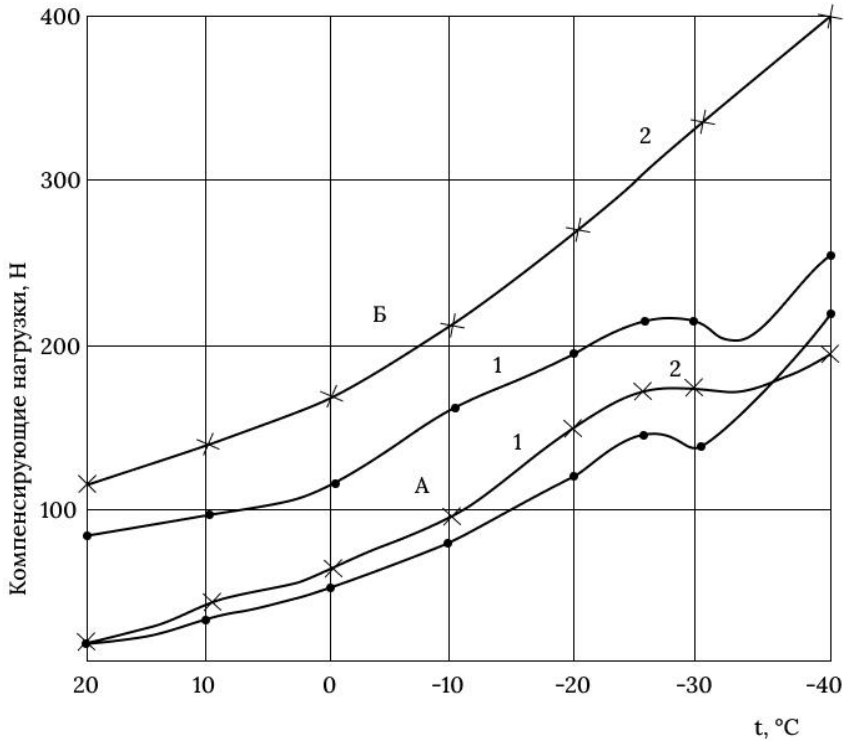

Рисунок 4. *Изменение нагрузок при замораживании образцов в ненагруженном А и нагруженном Б состоянии 1 — В/Ц — 0,5; 2 — В/Ц — 0,3*

Полученные результаты позволяют утверждать, что более высокой стойкостью обладают бетоны нормального твердения, затем прошедшие тепловую обработку и показавшие меньшую релаксируемость. Эксперименты показали, что при понижении температуры тепловлажностной обработки и мягком режиме твердения, в структуре образуется больше гелеобразной фазы, ответственной за ползучесть и релаксацию. При этом микротрещины и микродефекты в них, в отличие от хрупких, где они развиваются с большей скоростью, блокируются в процессе пластической деформации, что и обеспечивает большую долговечность материала; если структура достаточно податлива, то стенки капилляров деформируются, т. е. возникает своего рода ползучесть с релаксацией внутренних напряжений. Если же структура жесткая, то напряженное состояние фиксируется вследствие невозможности быстрой релаксации возникших напряжений.

Для повышения стойкости бетона и его способности релаксировать прилагаемые нагрузки рекомендуется: применение цементов с минералогическим составом клинкера, позволяющим получать бетоны с относительным преобладанием гелеобразной структурной составляющей, использование «мягких» режимов тепловлажностной обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Братошевская, В.В. Исследование адсорбционных явлений на силикатах / В.В. Братошевская, В.Н. Мирсоянов // Энергосбережение и водоподготовка. — 2019. — № 3(119). — С. 64–66. — EDN ZSCKBF.

2. Bratoshevskaya, V.V. On the relationship between the structural form of concrete and its resistance / V.V. Bratoshevskaya, V.N. Mirsoyanov // Materials Science Forum. — 2019. — Vol. 974. — P. 373–378. — DOI 10.4028/www.scientific.net/MSF.974.373. — EDN VRDIPO.

3. Мирсоянов, В.Н. О взаимосвязи упруго-пластических свойств бетона с его стойкостью / В.Н. Мирсоянов, В.В. Братошевская, Р.В. Мирсоянов // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». — 2016. — № 8. — С. 33–41. — EDN WISRQD.

4. Bratoshevskaya, V. Study of the relationship between concrete and its reinforcement elastic-plastic characteristics / V. Bratoshevskaya // Materials Science Forum. — 2021. — Vol. 1043 MSF. — P. 109–114. — DOI 10.4028/www.scientific.net/MSF.1043.109. — EDN FNLIHQ.

5. Братошевская, В.В. Влияние тепловлажностной обработки на упругопластические свойства бетона / В.В. Братошевская, В.Н. Мирсоянов, Р.В. Мирсоянов // Материалы и технологии XXI века: сборник статей XIV Международной научно-технической конференции, Пенза, 28–29 марта 2016 года. — Пенза: Автономная некоммерческая научно-образовательная организация «Приволжский Дом знаний», 2016. — С. 145–149. — EDN WDQVWP.

6. Братошевская, В.В. Влияние режима твердения на стойкость бетона / В.В. Братошевская, В.Н. Мирсоянов // Научное обеспечение агропромышленного комплекса: Сборник статей по материалам 71-й научно-практической конференции преподавателей по итогам НИР за 2015 год, Краснодар, 09 февраля 2016 года / Ответственный за выпуск А.Г. Кощаев. — Краснодар: ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный аграрный университет», 2016. — С. 458–459. — EDN WCPFCN.

7. Пересыпкин, Е.Н. Факторы, определяющие количество растянутой арматуры во внецентренно сжатых железобетонных элементах / Е.Н. Пересыпкин, С.Е. Пересыпкин // Итоги научно-исследовательской работы за 2017 год: сборник статей по материалам 73-й научно-практической конференции преподавателей, Краснодар, 14 марта 2018 года. — Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2018. — С. 111–112. — EDN KMHEBB.

8. Пересыпкин, Е.Н. Расчёт растянутой арматуры в переармированных железобетонных элементах / Е.Н. Пересыпкин, С.Е. Пересыпкин // Итоги научно-исследовательской работы за 2017 год: сборник статей по материалам 73-й научно-практической конференции преподавателей, Краснодар, 14 марта 2018 года. — Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2018. — С. 109–110. — EDN YWHLUR.

9. Peresypkin, E.N. Determination of coefficients for defining the deformations when calculating reinforced concrete structures on deformation and cracking disclosure / E.N. Peresypkin, S.E. Peresypkin // Materials Science Forum. — 2019. — Vol. 974. — P. 564–569. — DOI 10.4028/www.scientific.net/MSF.974.564. — EDN DLWGIP.

10. Peresypkin, E.N. To determination of stresses in the stretched armature of extracredly compressed elements in the limit condition / E.N. Peresypkin, S.E. Peresypkin // Materials Science Forum. — 2019. — Vol. 974. — P. 556–563. — DOI 10.4028/www.scientific.net/MSF.974.556.

Bratoshevskaya Violetta Vital'evna
Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia
E-mail: violetta-architector@yandex.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=511325

On the relationship of stress relaxation in concrete with its elastic-plastic properties

Abstract. The ability of capillary-porous bodies of concrete to resist the action of external loads and internal stresses under the influence of the external environment has been studied. The influence of internal factors: the composition of concrete, the nature of porosity, structural components, the conditions of its hardening on the development of internal stresses and the ability to relax them, was studied. Depending on the nature of the structure of the material (hard crystallized or "soft, pliable"), under the influence of aggressive media, there can be different types of stress state.

The author presents the results of a study of stress relaxation in cement stone, which made it possible to classify the process into two stages: unsteady — with a high and steady — with a constant rate.

The dependence of the influence of structural components in cement stone and concrete formed under various hardening modes on durability under conditions of dehydration, water saturation and freezing has been studied and experimentally verified.

The relationship between the nature of the structure of the material structure and stress relaxation during bending tests of cement stone samples of normal hardening and steamed according to various modes ("soft and hard") is proved.

An assessment of the nature of porosity — capillary, contraction and gel. A negative effect on the resistance of concrete of freezing water-saturated and pre-dried structures during the first day has been established. The development and relaxation of stresses depending on the rate of drying of capillary-porous structures during the development of stresses caused by fluctuations in environmental humidity are studied.

As a result of the experiments, it was found that with a decrease in the temperature of the heat-moisture treatment and a mild hardening regime, more gel-like phase is formed in the structure, which is responsible for creep and relaxation.

Keywords: porous structure of concrete; elastic-plastic properties; shrinkage stresses; stress relaxation; resistance; water saturation and drying; freezing and thawing