

## СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА



УДК 691.539.216

### ПОЛЗУЧЕСТЬ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО КАРБОНАТНОГО БЕТОНА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УРОВНЯХ НАПРЯЖЕНИЙ

**В.В. Белов, Т.Р. Баркая, П.В. Куляев***Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*© Белов В.В., Баркая Т.Р.,  
Куляев П.В., 2022

**Аннотация.** В работе исследованы показатели мгновенной и кратковременной ползучести мелкозернистого карбонатного бетона при различных уровнях напряжений в сравнении с обычными мелкозернистыми бетонами. Показано изменение значений деформации ползучести в зависимости от величины приложенной нагрузки и дней выдержки, а также в зависимости от содержания известнякового наполнителя и суперпластификатора. Представлено сравнение результатов испытаний базового состава бетона и состава мелкозернистого карбонатного бетона.

**Ключевые слова:** ползучесть мелкозернистого карбонатного бетона, влияние уровней напряжений.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2022-4-5-12**

Все компоненты мелкозернистого карбонатного бетона работают совместно при появлении напряжений, что имеет решающее значение для оценки пластических деформаций в различных структурах материала при разных уровнях напряжений. Важно различать условно-мгновенные и кратковременные деформации. Вода в твердеющем цементном камне присутствует в порах, внутренних микро- и мезотрещинах и находится как в свободном, так и в адсорбционно-связанном состоянии. Кроме того, между частицами всех уровней находится водная микропленка в виде гелеобразного вещества, которое является коагулирующей фазой в бетоне. Избыток воды и повышенное водоцементное соотношение, по мнению многих авторов, приводят к увеличению упругих и изменению пластических деформаций, обусловленных выдавливанием свободной воды из пор, деформацией каркаса (твёрдого скелета), развитием деформаций ползучести под влиянием капиллярного перераспределения жидкости при сжатии и силовом сдавливании пор, а также перемещением влаги к границе раздела цементного камня с воздухом. Все эти моменты являются решающими в случае изменения напряжений при учете факторов ползучести.

При оценке деформационных и прочностных характеристик бетона при различных напряжениях необходимо учитывать степень дисперсности композитных элементов. С

увеличением удельной поверхности наполнителя и микродобавок растет количество центров кристаллизации на единицу объема композита и микроструктуры межфазных областей, что приводит к увеличению количества воздушных и капиллярных микропор. Кроме того, в быстротвердеющем монолите на основе цемента на границах центров кристаллизации возникают многочисленные концентраторы внутренних напряжений на микроуровне, в связи с чем увеличиваются микротрещины. Это также вызывает увеличение деформаций и значений как кратковременной, так и мгновенной прочности или ползучести материала.

Таким образом, задача снижения уровней деформации ползучести бетона и повышения его механических свойств сводится к рассмотрению по крайней мере двух парадигм: замедления процесса схватывания цементной пасты (гидратации) во времени за счет более равномерного распределения частиц цемента в объеме композита и замедления доступа свободной воды в фазу, неактивную по отношению к основным процессам гидратации; физического вытеснения воды из крупных воздушных и капиллярных микропор и, как следствие, ее частичного переноса в область геля (тем самым ползучесть бетона становится менее изменчивой в зависимости от различных воздействующих факторов, изменения напряжений). Как известно, состав минеральной части сырьевой смеси может быть оптимизирован двумя способами: приближением к эталонной кривой гранулометрического состава путем выбора соотношения отдельных фракций агрегатов; смешиванием реального сырья в определенном соотношении.

В работе [1] показаны современные исследования бетона с добавками известняка, а также влияние различных факторов на его ползучесть. Установлено, что на деформации ползучести в значительной степени влияют следующие факторы: соотношение вода – твердое вещество, тонкость помола вяжущего, прочность, возраст бетона на момент приложения нагрузки и ее величина. Влияние таких параметров, как структура, состав бетона, процент пластифицирующих и минеральных добавок, рассмотрено в статьях [2, 3], где также изучено влияние мелкодисперсного наполнителя из известняка на реологические и технологические свойства бетона.

В настоящей работе исследовано изменение значений деформаций ползучести для базовой и карбонатной мелкозернистой смесей. Деформации ползучести на различных уровнях напряжений – мгновенные (в течение 1 дня нагружения) и кратковременные (нагружение осуществлялось от 1 до 7 дней) – определены экспериментально в различных условиях. При этом варьировались следующие факторы. При различных напряжениях (значение нагрузки составляло 50, 60, 70, 80 кН) отношение известняка к цементу составляло 0,5, содержание суперпластификатора СП-1 было принято равным 0,5 % от массы цемента. Относительные деформации ползучести (далее – деформации ползучести) рассчитывались путем деления их абсолютных значений по индикатору часового типа на базу индикатора, равную 50 мм. По результатам экспериментов установлены характеристики, а именно поведение (в динамике) деформаций ползучести на образцах с размерами граней  $10 \times 10 \times 10$  см для базовой и карбонатной мелкозернистых смесей. Заполнителем базового состава бетона была песчано-гравийная смесь, а дробленые известняковые породы составляли карбонатный мелкозернистый заполнитель. Все образцы бетона (по 8 для каждого из обоих составов, по 2 на одну нагрузку) хранились в естественных условиях в течение 28 дней. В табл. 1 и 2 представлены базовый и известняковый составы мелкозернистой смеси.

Таблица 1

Базовый состав мелкозернистого бетона

| Компоненты              | Состав, кг/м <sup>3</sup> |
|-------------------------|---------------------------|
| Цемент                  | 660                       |
| Песчано-гравийная смесь | 1 460                     |
| Вода                    | 292                       |
| СП-1                    | 1,8                       |

Таблица 2

Состав мелкозернистого карбонатного бетона

| Компоненты                | Состав, кг/м <sup>3</sup> |
|---------------------------|---------------------------|
| Цемент                    | 348                       |
| Известняковый заполнитель | 1 490                     |
| Вода                      | 298                       |
| Известняковый наполнитель | 348                       |
| СП-1                      | 2,6                       |

Испытательное устройство состояло из жесткой рамы, метрической линейки, уровня, динамометра и индикатора часового типа (рис. 1).



Рис. 1. Устройство для испытания на деформацию ползучести (фото автора)

Результаты испытаний приведены в табл. 3 (для основной смеси) и табл. 4 (для карбонатной мелкозернистой бетонной смеси).

Таблица 3

Измеренные деформации ползучести бетона базового состава  
в зависимости от приложенной нагрузки и дней ее воздействия

|                       |                |          |          |          |          |          |          |
|-----------------------|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Деформации ползучести | Сутки          |          |          |          |          |          |          |
|                       | 1-е            | 2-е      | 3-е      | 4-е      | 5-е      | 6-е      | 7-е      |
|                       | Нагрузка 50 кН |          |          |          |          |          |          |
|                       | 0,000 02       | 0,000 06 | 0,000 09 | 0,000 11 | 0,000 15 | 0,000 17 | 0,000 21 |
|                       | Нагрузка 60 кН |          |          |          |          |          |          |
|                       | 0,000 09       | 0,000 13 | 0,000 18 | 0,000 27 | 0,000 31 | 0,000 39 | 0,000 42 |
|                       | Нагрузка 70 кН |          |          |          |          |          |          |
|                       | 0,000 26       | 0,000 35 | 0,000 52 | 0,000 66 | 0,000 78 | 0,000 89 | 0,000 93 |
|                       | Нагрузка 80 кН |          |          |          |          |          |          |
|                       | 0,000 32       | 0,000 39 | 0,000 64 | 0,000 78 | 0,000 86 | 0,001 02 | 0,001 06 |

Таблица 4

Измеренные деформации ползучести  
мелкозернистого карбонатного бетона  
в зависимости от приложенной нагрузки и дней ее воздействия

|                       |                |          |          |          |          |          |          |
|-----------------------|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Деформации ползучести | Сутки          |          |          |          |          |          |          |
|                       | 1-е            | 2-е      | 3-е      | 4-е      | 5-е      | 6-е      | 7-е      |
|                       | Нагрузка 50 кН |          |          |          |          |          |          |
|                       | 0,000 05       | 0,000 08 | 0,000 12 | 0,000 16 | 0,000 18 | 0,000 18 | 0,000 19 |
|                       | Нагрузка 60 кН |          |          |          |          |          |          |
|                       | 0,000 13       | 0,000 18 | 0,000 28 | 0,000 34 | 0,000 36 | 0,000 38 | 0,000 40 |
|                       | Нагрузка 70 кН |          |          |          |          |          |          |
|                       | 0,000 33       | 0,000 40 | 0,000 60 | 0,000 72 | 0,000 84 | 0,000 87 | 0,000 91 |
|                       | Нагрузка 80 кН |          |          |          |          |          |          |
|                       | 0,000 41       | 0,000 44 | 0,000 72 | 0,000 83 | 0,000 91 | 0,001 00 | 0,001 08 |

Результаты испытаний свидетельствуют о некотором уменьшении деформаций ползучести карбонатного мелкозернистого бетона в более поздние периоды твердения (рис. 2).

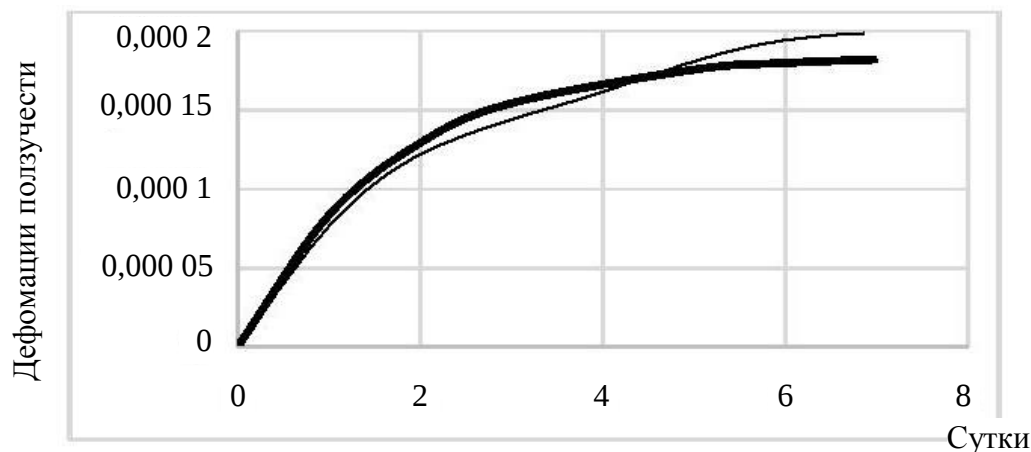


Рис. 2. Кривая деформации ползучести  
для известнякового композита (жирная кривая)  
в сравнении с базовым (тонкая) при нагрузке 50 кН

На рис. 2 показано, что, хотя кратковременные деформации ползучести карбонатных мелкозернистых композиций оказались больше, чем у основного состава, из-за кратковременного объемного пластического деформирования матрицы, выравнивание микроструктуры композита способствует улучшению характеристик ползучести бетона, стимулирует деформации на первых стадиях затвердевания, но ограничивает их в более поздние периоды, особенно в долгосрочной перспективе. Установлено, что точка выравнивания двух кривых в значительной степени зависит от дней приложения нагрузки, ее величины, соотношения воды и твердого вещества, содержания известнякового наполнителя и суперпластификатора, размера заполнителя и тонкости наполнителя. Выравнивание может появиться как на более ранних, так и на более поздних стадиях твердения камня.

Известняковый наполнитель имеет широкий диапазон размеров гранул. Благодаря этому заполняются пустоты между частицами цемента во время обработки, что приводит к снижению потребности в воде, улучшению однородности смеси и унификации микроструктуры композита. Из-за лучшей упаковки частиц внутри бетонной матрицы и уменьшения пористости, вызванного переносом микротрещин из воздушных и капиллярных областей в микрзоны и сжатием микротрещин до внутренних микроструктурных ядер (что, в частности, лишает композитную структуру микропластичных энергозатратных областей), также происходит неуклонное уменьшение ползучести известнякового мелкозернистого бетона в поздние сроки. Это делает карбонатный мелкозернистый композит менее хрупким и несвязным на микроуровне, чем базовый состав.

Таким образом, можно сказать, что комплексная добавка известнякового наполнителя и суперпластификатора СП-1 положительно влияет на характеристики ползучести известнякового мелкозернистого бетона в более поздние сроки его твердения. Дальнейшие перспективы улучшения характеристик ползучести известняковых мелкозернистых бетонов, как полагают многие ученые, связаны с использованием некоторых современных материалов, новых гиперпластификаторов и методов моделирования наноразмерных областей.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Schutter G.De. Effect of limestone filler as mineral addition in self compacting concrete // *36th Conference on Our World in Concrete & Structures: «Recent Advances in the Technology of Fresh Concrete»*, Proceedings. Ghent: Ghent University, Department of Structural Engineering. 2011, pp. 49–54.
2. Белов В.В., Субботин С.Л., Куляев П.В. Прочностные и деформационные свойства бетона с карбонатными микрозаполнителями // *Строительные материалы*. 2015. № 7. С. 25.
3. Chaid R., Jaubertie R., Boukhaled A. Effect de l'ajout calcaire sur la durabilite des betons // *Lebanese Science Journal*. 2010. No. 1. P. 11.
4. Desnerck P., Schutter G.De., Taerwe L. Stress-strain behavior of self-compacting concretes containing limestone fillers // *Structural concrete*. 2012. No. 2 (13), pp. 95–101.
5. Методические рекомендации по оценке напряженного состояния железобетонных элементов транспортных конструкций с учетом ползучести и усадки бетона М.: ЦНИИС. 2011. 253 с.
6. Бердов Г.И., Ильина Л.В., Зырянова В.Н., Никоненко Н.И., Мельников А.В. Улучшение свойств композитных строительных материалов путем внедрения минеральных микроволокон // *Стройпрофи: строительные технологии и бетон*. 2012. № 2. С. 25–27.
7. Белов В.В., Смирнов М.А. Новые принципы определения состава высококачественного бетона // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2008. № 13. С. 341–346.

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**БЕЛОВ Владимир Владимирович** – советник РААСН, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственный технический университет, 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

**БАРКАЯ Темур Рауфович** – кандидат технических наук, заведующий кафедрой конструкций и сооружений, Тверской государственный технический университет, 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: btrs@list.ru

**КУЛЯЕВ Павел Викторович** – кандидат технических наук, доцент кафедры конструкций и сооружений, Тверской государственный технический университет, 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: p.kuliaev@yandex.ru

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА**

Белов В.В., Баркая Т.Р., Куляев П.В. Ползучесть мелкозернистого карбонатного бетона при различных уровнях напряжений // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2022. № 4 (16). С. 5–12.

**CREEP FINE CARBONATE CONCRETE AT DIFFERENT STRESS LEVELS**

**V.V. Belov, T.R. Barkaya, P.V. Kulyaev**  
*Tver State Technical University (Tver)*

**Abstract.** The paper presents the results of study of instant and short-term creep of fine-grained carbonate concrete under different stress levels, as compared to those of ordinary concretes. The article reveals creep strain values alteration as regards applied load values and days of exposure and depending on limestone powder and superplasticizer content. The comparison of test figures of the basic concrete composition and fine-grained carbonate concrete composition also have been presented.

**Keywords:** fine carbonate concrete, deformation properties, creep, loading levels.

**REFERENCES**

1. Schutter G.De. Effect of limestone filler as mineral addition in self compacting concrete. *36th Conference on Our World in Concrete & Structures: «Recent Advances in the Technology of Fresh Concrete»*, Proceedings. Ghent: Ghent University, Department of Structural Engineering. 2011, pp. 14–16.
2. Belov V.V., Subbotin S.L., Kulyaev P.V. Strength and deformation properties of concrete with carbonate microfillers. *Stroitel'nye materialy*. 2015. No. 7. P. 25. (In Russian).
3. Chaid R., Jauberthie R., Boukhaled A. Effect de l'ajout calcairesur la durabilite des betons. *Lebanese Science Journal*. 2010. No. 1. P. 11.
4. Desnerck P., Schutter G.De., Taerwe L. Stress-strain behavior of self-compacting concretes containing limestone fillers. *Structural concrete*. 2012. No. 2 (13), pp. 95–101.
5. Methodological recommendations for assessing the stress state of reinforced concrete elements of transport structures, taking into account creep and shrinkage of concrete. Moscow: TSNIIS. 2011. 253 p.
6. Berdov G.I., Il'ina L.V., Zyryanova V.N., Nikonenko N.I., Mel'nikov A.V. Improving the properties of composite building materials by introducing mineral micro-fillers. *Strojprofil': stroitel'nye tekhnologii i betony*. 2012. No. 2, pp. 25–27. (In Russian).
7. Belov V.V., Smirnov M.A. New principles for determining the composition of high-quality concrete. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2008. No. 13, pp. 341–346. (In Russian).

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**BELOV Vladimir Vladimirovich** – Adviser of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Building Materials and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

**BARAYA Temur Raufovich** – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: btrs@list.ru

**KULIAEV Pavel Victorovich** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: p.kuliaev@yandex.ru

**CITATION FOR AN ARTICLE**

Belov V.V., Barkaya T.R., Kulyaev P.V. Creep fine carbonate concrete at different stress levels // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2022. No. 4 (16), pp. 5–12.

**УДК 699.844**

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТЕКЛОБОЯ КАК ВТОРИЧНОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ  
В СОСТАВЕ ЦЕМЕНТНОГО БЕТОНА**

*Е.А. Зеленов, В.В. Белов*

*Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Зеленов Е.А., Белов В.В., 2022

**Аннотация.** Рассмотрены возможности разработки ресурсосберегающей технологии производства бетонных смесей с использованием стеклобоя в качестве крупного заполнителя для изготовления монолитных полов. Изучены способы применения стеклобоя в качестве материала для строительства, перспективы его использования в качестве заполнителя для бетонов. Показано, что стекольный бой, плотность которого ниже плотности традиционных заполнителей, может служить отличным сырьем и выступать в качестве заполнителя бетона, а также способствовать сокращению затрат на добычу природных ресурсов и уменьшению энергии для их переработки.

**Ключевые слова:** стекло, стеклобетон, отходы стекла, заполнитель, свойства.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2022-4-12-20**

В настоящее время одним из перспективных направлений является разработка энергоресурсосберегающих технологий, в которых вместо первичных применяются вторичные сырьевые материалы. Это позволяет уменьшить объемы отходов в окружающей среде и вовлечь их в ресурсный цикл, сократив при этом объемы использования первичных природных ресурсов.

Стекланные отходы – одни из основных. Они представляют собой трудноутилизируемый материал, имеющий различный дисперсный состав, который практически не используется повторно.

В строительстве бетон может применяться как в любых конструкциях, несущих и самонесущих, так и в изделиях декоративных и отделочных. В настоящее время товарооборот бетона сокращается из-за кризиса, пандемии и нехватки ресурсов. Встает вопрос о внедрении новых энергоресурсосберегающих технологий, которые позволят увеличить объемы производства и снизить потребность в первичных природных ресурсах.

Стеклобой может быть использован не только при производстве стеклотары, но и в сфере производства строительных материалов, в том числе теплоизоляционных (стеклокерамзита, стеклоблоков, пеностекла, ячеистого бетона) [1–3].