

УДК 691.32

**ЗАВИСИМОСТЬ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ КАРБОНАТНОГО БЕТОНА  
ОТ СКОРОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ*****В.В. Белов, П.В. Куляев, Т.Р. Баркая****Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*© Белов В.В., Куляев П.В.,  
Баркая Т.Р., 2024

**Аннотация.** Отмечено, что динамические характеристики (ударная вязкость и динамическая прочность) не только связаны с прочностью материала, но и зависят от уровня деформации и скорости деформирования в момент нагружения материала. Рассмотрено использование комплексной добавки, включающей известняковый микронаполнитель и суперпластификатор, которые повышают уровень энергии, поглощаемой при деформировании и разрушении образца. Скорость этого поглощения оценена через сравнение ударной вязкости и динамической прочности для трех составов образцов: двух с известняковым микронаполнителем и одного базового (без включения в состав известняка). Выявлено, что известняковый полуинертный и тонкодисперсный наполнитель повышает ударную вязкость и динамическую прочность, что делает мелкозернистый известняковый бетон материалом, хорошо воспринимающим ударные нагрузки. По результатам исследования также сделан вывод, что ударная вязкость и свойства поглощения энергии трещинообразования и разрушения карбонатных бетонов чувствительны к скорости деформации и зависят от процентного содержания минерального карбонатного компонента в матрице бетона. Показано, что динамическая прочность карбонатных бетонов при сжатии повышается с ростом скорости деформации, а количество поглощенной энергии увеличивается со средней скоростью изменения кинетической энергии нагружения.

**Ключевые слова:** динамические нагрузки, скорость деформации, динамическая прочность, ударная вязкость.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2024-2-19-25*****ВВЕДЕНИЕ***

При динамических испытаниях и анализе ударной вязкости влияние скорости нагружения на процесс деформирования и разрушения бетона становится важным параметром, который необходимо учитывать для оценки динамических характеристик. Экспериментальные исследования, посвященные изучению механизма поглощения энергии в карбонатном бетоне с учетом скорости нагружения, весьма немногочисленны [1]. При этом разрушение бетонных образцов рассматривается по уровню микротрещинообразования в упругой области [2, 3]. Воздействие скорости деформации на динамическую прочность и вязкость бетона может быть проанализировано с двух точек зрения: при построении картины напряженного состояния во взаимосвязи с процессом распространения трещин и в свете анализа перераспределения (поглощения и рассеивания) внутренней энергии [4]. При оценке напряженного состояния эффект упрочнения бетона с повышением скорости деформирования можно считать упругопластической реакцией

матрицы композита при изменении одноосного напряженно-деформированного состояния [5]. Из-за краткосрочности приложения нагрузки боковая деформация образца лимитирована инерционным действием материалов. Ограничивающий эффект возрастает с увеличением скорости воздействия, при этом повышается динамическая прочность бетона. В соответствии с характером распространения микротрещин и распределения энергии причинами микроразрывов внутренней структуры композита являются все виды внутренних микродефектов и дислокаций бетона [6, 7].

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В Тверском государственном техническом университете было проведено исследование зависимости ударной вязкости и динамической прочности карбонатного бетона от скорости деформирования [8]. Тонкодисперсный карбонатный наполнитель получали путем помола продукта дробления известняка. В качестве заполнителя были взяты зерна известняка размером от 5 до 0,05 мм. Девять бетонных балочек-призм с размерами  $10 \times 10 \times 40$  см испытали на поперечный удар. У трех призм был базовый состав бетонной смеси без известнякового наполнителя. Шесть призм содержали известняковый наполнитель. Для оценки динамических свойств карбонатного бетона при изготовлении опытных образцов применяли несколько составов смеси (табл. 1).

Таблица 1

Опытные составы, кг/м<sup>3</sup> смеси

Компонент смеси	Базовый состав	Номер состава карбонатного бетона	
		1	2
Цемент	650	480	340
Заполнитель	1490	1530	1530
Вода	260	290	330
Водоцементное отношение	0,4	0,42	0,5
Известняковый наполнитель	–	200	340
Суперпластификатор СП-1	–	5	2,52

Динамическая прочность определяется как максимальное (пиковое) напряжение при испытании на поперечное ударное воздействие. Она служит одним из основных показателей, отражающих динамические свойства бетона; находят ее по формуле

$$R_d = R \cdot K_d, \quad (1)$$

где  $R$  – прочность бетона при сжатии, МПа;  $K_d$  – коэффициент динамичности.

Коэффициент динамичности рассчитывался по стандартной методике с учетом размеров и массы ударного наконечника и упругих характеристик материала опытных образцов.

Ударная вязкость  $a_k$ , являющаяся мерой сопротивления материала балочек удару, определяется как отношение работы, затрачиваемой на разрушение образца, к площади поперечного сечения образца:

$$a_k = A / A_{обр}, \quad (2)$$

где  $A$  – работа, затрачиваемая на разрушение призмы-балочки, кН · м;  $A_{обр}$  – площадь поперечного сечения образца.

Работа определялась как произведение массы груза на разницу между высотой подъема наконечника и высотой его отскока в миллиметрах (аналог подъема груза маятникового копра после разрушения образца). Ударную вязкость находили в зависимости от времени приложения нагрузки косвенно (как функцию массы наконечника и скорости его воздействия на балку).

Образцы испытывались на специальном устройстве рамного типа, общий вид которого изображен на рис. 1. Данное устройство имитирует ударный копер стандартных методик, используемый для определения ударной вязкости, но с приложением нагрузки не в горизонтальной плоскости, а в вертикальной. Высота подъема наконечника составляет 10–50 см, масса груза в наконечнике варьируется от 5 до 25 кг.



Рис. 1. Общий вид ударной установки с положением образца-призмы для испытания на поперечный удар

### ***РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ***

Обобщенные результаты испытаний серий опытных образцов-балочек на динамическое нагружение с указанием свойств бетона приведены в табл. 2 и 3.

*Таблица 2*

Коэффициенты динамичности и динамическая прочность

Показатель	Состав бетона		
	Базовый	Опытный № 1	Опытный № 2
Коэффициент динамичности	1,26	1,28	1,31
Динамическая прочность, МПа	42,34	43,52	33,67

Таблица 3

Ударная вязкость,  $\text{кН} \cdot \text{м}/\text{см}^2$ 

Время приложения нагрузки, м/с	Состав бетона		
	Базовый	Опытный № 1	Опытный № 2
15	0,11	0,13	0,125
20	0,21	0,26	0,24
30	0,314	0,52	0,48

Скол опытного образца после разрушения представлен на рис. 2.



Рис. 2. Образец после разрушения

Зависимость ударной вязкости от времени приложения нагрузки приведена на рис. 3.

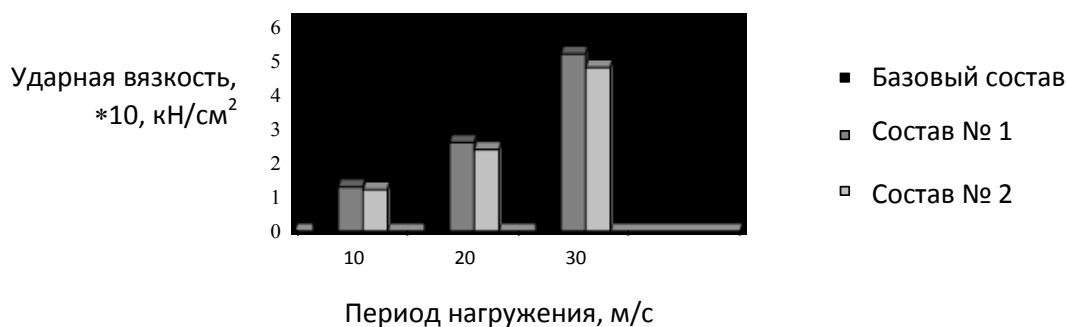


Рис. 3. Зависимость ударной вязкости,  $\text{кН} \cdot \text{м}/\text{см}^2$ , от времени приложения нагрузки

Чем больше доля карбонатного наполнителя в бетоне, тем выше ударная вязкость и динамическая прочность бетона. Значения ударной вязкости и прочности для образцов-балочек, включающих известняковый наполнитель, больше, чем для образцов без него. Комплексная добавка из наполнителя и суперпластификатора способствует формированию пластических зон в матрице композита, тем самым повышая свойства поглощения (демпфирования) ударной нагрузки.

Значения ударной вязкости как меры материала воспринимать удар указывают на лучшую деформационную способность образцов на карбонатной основе по сравнению с образцами базового состава. Известняковый микронаполнитель, очевидно, повышает скорость поглощения общей (кинетической и потенциальной) энергии удара бетона образцов-призм, тем самым увеличивая долговечность известнякового мелкозернистого бетона.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Скорость приложения ударной нагрузки значительно влияет на динамические характеристики бетонных образцов. С повышением скорости удара значения динамических характеристик для образцов с содержанием добавки карбонатного микронаполнителя и суперпластификатора растут пропорционально этому проценту до определенного значения, после чего начинают плавно снижаться. Это говорит о существовании верхнего предела содержания карбонатного компонента в составе бетона, соответствующего оптимальному проценту (порядка 30 %); для этого предела значения мер динамического сопротивления удару (ударной вязкости и динамической прочности) достигают в совокупности своего максимума. Оба вида бетона (базовый и карбонатный) являются материалами, чувствительными к скорости нагружения и деформации. Динамические свойства, включая динамическую прочность, предельную динамическую деформацию и ударную вязкость, изменяются со скоростью деформации неоднозначно. При ударной нагрузке общее энергопоглощение бетона возрастает с увеличением скорости изменения энергии удара и содержанием демпфирующей добавки из микронаполнителя и суперпластификатора. По сравнению с обычным бетоном карбонатный композит с добавкой из известнякового наполнителя и суперпластификатора в оптимальных количествах (до 30 %) обладает более высокими показателями динамической прочности, деформации, ударной вязкости и энергии, и это преимущество становится еще более очевидным при возрастании скорости деформации. Следовательно, карбонатный мелкозернистый бетон имеет более широкие перспективы применения в инженерных системах, работающих в условиях обычных и интенсивных ударных воздействий.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Alam S.Y., Loukili A. The transition from energy dissipation processes to dislocation disturbances during concrete destruction. URL: [https://www.researchgate.net/publication/303514585\\_Transition\\_from\\_energy\\_dissipative\\_processes\\_to\\_displacement\\_discontinuities\\_during\\_concrete\\_failure](https://www.researchgate.net/publication/303514585_Transition_from_energy_dissipative_processes_to_displacement_discontinuities_during_concrete_failure) (дата обращения: 28.07.2024).
2. Moser B., Pfeifer S. Microstructure and durability of ultra-high performance concrete. *Proceedings of the Second International Symposium on Heavy-duty Concrete*. 2008, pp. 417–425. URL: <https://books.google.ru/books?id=OMsdSJ-LUBQC&printsec=frontcover&hl=ru#v=onepage&q&f=false> (дата обращения: 28.07.2024).
3. Desnerk P., Schutter De G., Tervey L. Stress-strain behavior of self-compacting concretes containing limestone fillers. URL: [https://www.researchgate.net/publication/259383708\\_Stress-strain\\_behaviour\\_of\\_self-compacting\\_concretes\\_containing\\_limestone\\_fillers](https://www.researchgate.net/publication/259383708_Stress-strain_behaviour_of_self-compacting_concretes_containing_limestone_fillers) (дата обращения: 28.07.2024).
4. Dear J. Dynamic and impact response of materials and structures // *The International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences*. 2011. № 17 (2), pp. 37–38.

5. Luo X., Xu Y., Bai E., Li W. Mechanical properties of ceramics–cement based porous material under impact loading. URL: [https://www.researchgate.net/publication/277485311\\_Mechanical\\_properties\\_of\\_ceramics-cement\\_based\\_porous\\_material\\_under\\_impact\\_loading](https://www.researchgate.net/publication/277485311_Mechanical_properties_of_ceramics-cement_based_porous_material_under_impact_loading) (дата обращения: 28.07.2024).
6. Alshaarba I.A.S., Mouwainea E.M., Said A.M.I. Numerical analysis of reinforced concrete beams subjected to impact loads // *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*. 2023. № 32 (1). URL: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/jmbm-2022-0232/html> (дата обращения: 28.07.2024).
7. Ragueneau F., Gatuingt F. Inelastic behavior modeling of concrete in low and high strain rate dynamics. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092664102300069> (дата обращения: 28.07.2024).
8. Liu Z., Luo Y., Bai H., Zhang Q., Fu Q. A significant increase in the impact strength and heat resistance of poly (L-lactide) / thermoplastic polyurethane mixtures due to the creation of stereocomplex crystallites in the matrix. URL: <https://www.sci-hub.ru/10.1021/acssuschemeng.5b00816> (дата обращения: 28.07.2024).

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

*БЕЛОВ Владимир Владимирович* – советник РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: [vladim-bel@yandex.ru](mailto:vladim-bel@yandex.ru)

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

*БАРКАЯ Темура Рауфович* – кандидат технических наук, зав. кафедрой конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: [btrs@list.ru](mailto:btrs@list.ru)

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Белов В.В., Куляев П.В., Баркая Т.Р. Зависимость динамической прочности карбонатного бетона от скорости деформирования // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2024. № 2 (22). С. 19–25.

---

## DEPENDENCE OF THE IMPACT STRENGTH OF CARBONATE CONCRETE ON THE STRAIN RATE

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

**Abstract.** It is noted that the dynamic characteristics (toughness and dynamic strength) are related not only to the strength of the material, but also depend on the level of deformation and the rate of deformation at the time of loading of the material. The use of a complex additive, including a limestone microfiller and a superplasticizer, which increase the level of energy absorbed during deformation and destruction of the sample, is considered. The rate of this absorption was estimated by comparing the impact strength and dynamic strength for three sample compositions: two with limestone microfillers and one base (without inclusion in the

composition of limestone). It has been revealed that limestone semi-inert and finely dispersed filler increases the impact strength and dynamic strength, which makes fine-grained limestone concrete a material that well accepts shock loads. According to the results of the study, it was also concluded that the impact strength and energy absorption properties of cracking and destruction of carbonate concretes are sensitive to the rate of deformation and depend on the percentage of the mineral carbonate component in the concrete matrix. It is shown that the dynamic strength of carbonate concretes under compression increases with an increase in the rate of deformation, and the amount of absorbed energy increases with the average rate of change in the kinetic energy of loading.

**Keywords:** dynamic loads, strain rate, dynamic strength, impact toughness.

#### 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

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

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

#### CITATION FOR AN ARTICLE

Belov V.V., Kulyaev P.V., Barkaya T.R. Dependence of the impact strength of carbonate concrete on the strain rate // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 2 (22), pp. 19–25.

УДК 691.32

### ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КАРБОНАТНОГО БЕТОНА В УСЛОВИЯХ СЛАБОИНТЕНСИВНОГО УДАРНОГО СЖАТИЯ

*П.В. Куляев, Ю.В. Сизов*

*Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Куляев П.В., Сизов Ю.В., 2024

**Аннотация.** Изучены динамические и статические свойства карбонатного бетона на основе комплексной добавки из тонкодисперсного известнякового порошка и суперпластификатора с использованием слабоинтенсивного ударного сжатия образцов кубов в осевом направлении. Отмечено, что разработка составов ударопрочного бетона служит основой для освоения и применения местных минерально-сырьевых ресурсов. Указано, что соблюдение принципа использования местных материалов при изготовлении