

# РАЗДЕЛ III

## СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 620.17:666.972

### ПРОЧНОСТЬ БЕТОНА КАК СОПРОТИВЛЕНИЕ РАЗРУШЕНИЮ

Ю.В. Краснощёков, Р.А. Галузина  
ФГБОУ ВПО «СибАДИ», Россия, г. Омск.

**Аннотация.** Существуют определенные противоречия между теориями разрушения и прочности бетона, обусловленные специфическими свойствами этого материала и их влияния на процесс разрушения при любых напряженных состояниях. В статье анализируется противоречие между теориями разрушения и прочности бетона, заключающееся в разной оценке значимости сопротивлений сжатию и растяжению. Для уточнения соотношений между сопротивлениями бетона сжатию и растяжению авторы обращаются к методу компьютерного моделирования. Приведены результаты исследования напряженно-деформированного состояния опытных образцов.

**Ключевые слова:** прочность бетона, сопротивление разрушению, напряженное состояние, теории и критерии прочности.

#### Введение

Считается, что существуют два типа разрушения: путем отрыва и путем сдвига. Разрушение путем отрыва связывают с действием растягивающих напряжений или деформаций, а разрушение путем сдвига – с действием касательных напряжений. Возможность разрушения материалов путем отрыва, неоднократно подтвержденная опытами, до сих пор не подвергалась каким-либо сомнениям. Наоборот, в последнее время многие ученые были склонны приписывать отрыву вообще все случаи разрушения материалов, особенно хрупких [1]. В каменных материалах, в том числе и бетоне, оба типа разрушения происходят, как правило, хрупко и внезапно.

Любое разрушение бетона начинается с образования трещин, в том числе в результате действия сжимающих. Например, при сжатии бетонных призм разрушение начинается с появления трещин, параллельных направлению усилия и перпендикулярных к направлению растяжения и завершается отделением частиц материала друг от друга. Причиной такого разрушения (путем отрыва) являются *растягивающие нормальные напряжения или деформации удлинения*. Иногда разрушение сжимаемого бетона носит более сложный характер. При сжатии кубов разрушение может происходить по площадкам, наклоненным к направлению сжимающей нагрузки, и причиной его являются одновременно нормальные и касательные напряжения, разви-

вающиеся на наклонных площадках вследствие влияния сил трения между бетоном и плитами пресса. Чрезвычайная опасность хрупкого разрушения, связанного с образованием трещин требует более точной оценки прочностных свойств в виде сопротивлений *растяжению или сдвигу*.

Несмотря на то, что прочность материала характеризует его способность сопротивляться разрушению, т.е. действию растягивающих усилий, основным показателем прочности бетона в железобетонных конструкциях является осевая прочность на *сжатие*.

Таким образом, в логической цепочке «прочность – сопротивление разрушению – разрушение отрывом – преодоление сопротивления растяжению – показатель прочности на сжатие» явно выпадает последнее звено. В этом и заключается противоречие теорий разрушения и прочности бетона. На практике это противоречие обычно не проявляется, поскольку существуют простые методы определения прочностных свойств бетона и апробированы эмпирические зависимости между сопротивлениями на сжатие и растяжение. Но теории должны быть свободны от каких-либо несоответствий и чтобы их устранить, следует ответить на вопрос – может ли быть сопротивление растяжению главным показателем прочности бетона в конструкциях зданий и сооружений.

Необходимость устранения несоответствий теорий разрушения и прочности важна не

только для правильной оценки прочности бетонных, но и железобетонных конструкций с арматурой, ориентированной по направлению сжимающего усилия. Так как разрушение бетона сжатых зон элементов происходит от действия растягивающих напряжений в поперечном направлении, усиление бетона продольной арматурой может быть неэффективным.

Определенный шаг по решению поставленной проблемы сделали авторы новых норм проектирования железобетонных конструкций. Они отмечали, что главная цель усовершенствования методов расчета и конструирования железобетонных конструкций заключается в том, чтобы эти методы основывались на расчетных моделях, освобожденных от излишнего эмпиризма и учитывающих физический характер работы элементов [2]. Для достижения этой цели удалось упростить и уточнить многие модели, но физический характер разрушения бетона, подтвержденный экспериментально, в расчетных моделях учитывается не всегда.

Цель данного исследования – выявление возможности оценки сопротивления растяжению (разрушению) при сжатии опытных образцов.

**Прочность бетона как сопротивление разрушению**

Процесс разрушения бетона зависит от силового воздействия нагрузки и характера напряженного состояния. Зачастую характер напряженного состояния весьма сложный, но во всех случаях прочность бетона оценивается и нормируется значениями сопротивлений, полученными при одноосном сжатии или растяжении. Чтобы обеспечить надежность конструкций в таких условиях, в нормы проектирования приходится вводить многочисленные коэффициенты условия работы, физический смысл которых не всегда очевиден. В таблице 1 приведены примерные значения коэффициентов условия работы  $\gamma_d$  при некоторых силовых воздействиях в зависимости от сопротивления сжатию  $R$  стандартных кубиков [3] (в скобках указаны значения переходных коэффициентов  $K$ , рекомендуемые ГОСТ [4]).

Таблица 1 – Примерные значения коэффициентов условия работы

Вид напряженного состояния	$\gamma_d (K)$
сжатие кубов	1 (1)
сжатие призм	0,7 – 0,8
сжатие цилиндров	0,8 – 0,9
сжатие при изгибе	0,9 - 1
осевое растяжение	0,05 – 0,1 (0,07)
растяжение при раскалывании	(0,08)
растяжение при изгибе	0,1 – 0,18 (0,12)
чистый срез	0,15 – 0,3
скалывание	0,1 – 0,2

Как видно из таблицы, показатели прочности бетона, особенно на сжатие, отличаются большим разнообразием и по сравнению с прочностью на растяжение диапазон значений показателей сжатия значительно больше. Известно, что прочность на сжатие зависит от многочисленных факторов, и единого подхода к назначению этого показателя для расчета железобетонных конструкций нет [5]. Кроме этого имеются серьезные расхождения по методам оценки этого параметра в нормах разных стран [6]. Следует отметить, что показатель «растяжение при раскалывании» введен только в 1990 г. Ранее в литературе упоминался показатель «скалывание», характеризовавший в большей степени прочность на срез при сложном напряженном состоянии [7].

Обобщенные характеристики прочности материалов принято представлять в виде предельных поверхностей разрушения, для построения которых требуется проведение

большого количества сложных экспериментов. Из-за разнообразия видов бетонов и большой неоднородности этого материала в настоящее время ощущается серьезный недостаток опытных данных. Поэтому на практике используют критерии прочности – упрощенные гипотезы разрушения при сложном напряженном состоянии. Согласно критериям прочности любое сложное напряженное состояние сводится к эквивалентному одноосному напряжению. Такой подход не только объясняет логику нормирования сопротивлений бетона, но и требует тщательного анализа напряженно-деформированного состояния опытных образцов с проверкой соответствия различных теорий прочности результатам испытаний по оценке сопротивлений. Детальная оценка напряженно-деформированного состояния при испытании натуральных образцов практически невозможна, ввиду сложности установления величины напряжений в каждой

точке пространственного элемента, поэтому для решения этой задачи использованы компьютерные (численные) модели образцов.

Форму, размеры, вид, методы их испытания и расчета регламентирует ГОСТ 10180-2012 [4]. Для компьютерных моделей приняты стандартные размеры бетонных кубов 150×150×150 мм и призм 150×150×400 мм. При моделировании применены универсальные пространственные восьмиузловые изопараметрические конечные элементы КЭ-36 в ПК «Лира». Приняты характеристики бетона с начальным модулем упругости  $E_b = 30000$  МПа и коэффициентом Пуассона  $\nu = 0,2$ . Загружение образцов выполнялось равномерно распределенной нагрузкой, соответствующей кубиковой  $R$  и призмной  $R_b$  прочности бетона. Равномерность деформирования сжатия обеспечивалась стальной пластиной толщиной 5 см в уровне верхних узлов образцов. Влияние трения по плоскостям кон-

такта бетона с плитами прессы учитывали закреплением верхних и нижних узлов в горизонтальном направлении.

В работе [1] показано, что опасное состояние материалов лежит на границе применения закона Гука (с известным, достаточным для практики приближением). Это позволяет рассматривать условия прочности в упругой стадии деформирования. При анализе результатов моделирования основное внимание обращено на величину напряжений  $\sigma_e$ , эквивалентных одноосному растягивающему напряжению в конечных элементах. Предполагается, что если во всех элементах продольных сечений образца  $\sigma_e \geq R_{bt}$ , то образуются трещины, которые могут привести к разрушению. На рисунке 1 показаны характерные изображения изополей эквивалентных напряжений  $\sigma_e$  опытного образца куба по различным теориям прочности

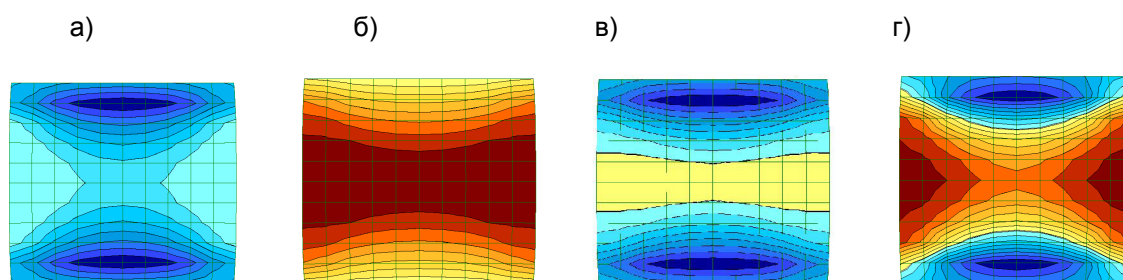


Рис. 1. Изополя эквивалентных напряжений  $\sigma_e$  опытного образца куба по теориям прочности: а) наибольших главных напряжений; б) Писаренко-Лебедева; в) Гениева; г) Мора

В таблице 2 приведены максимальные относительные значения напряжений, эквивалентных осевому растяжению  $\sigma_e$ , в массиве

бетона опытных образцов по различным теориям прочности, предусмотренных в среде ПК «Лира».

Таблица 2 – Результаты анализа напряженно-деформированного состояния моделей опытных образцов

Теория прочности	$\sigma_e/R$ в опытных образцах	
	Куб	Призма
Наибольших главных напряжений	< 0,01	< 0,01
Наибольших главных деформаций	0,2	0,16
Наибольших касательных напряжений	1,04	0,84
Энергетическая Губера-Хенки-Мизеса	1,04	0,84
Мора	0,08	0,07
Друккера-Прагера	0,08	0,07
Писаренко-Лебедева	0,38	0,32
Гениева (для железобетона)	0,06	-

В результате анализа напряженно-деформированного состояния бетона образца установлено:

- по теориям главных наибольших напряжений и деформаций разрушение опытных образцов происходит в результате действия наибольших сжимающих напряжений; в рабо-

те [1] отмечено, что обе эти теории являются теориями отрыва, но ни одна из них не является универсальной, т.е. пригодной во всех случаях разрушения отрывом;

- по теории наибольших касательных напряжений, энергетической теории Губера-Хенки-Мизеса и теории Писаренко-Лебедева в

образцах действуют растягивающее напряжение, относительные значения которых существенно превышают отмеченные в таблице 1;

- по теориям Мора и Друккера-Прагера относительные значения  $\sigma_e/R$  соизмеримы с отмеченными в таблице 1, причем напряжения, при котором возможно образование трещин в кубе, соответствуют растяжению при раскалывании, а в призме осевому растяжению.

Таким образом, расчеты показали, что наиболее предпочтительна для моделируемых образцов является теория Мора, хотя существует мнение о неприменимости к бетону классических теорий прочности [8].

На основе теории Мора выполнен анализ напряженно-деформированного состояния железобетонной призмы, армированной в углах продольными стержнями 4Ø20. В ПК «Лира» арматура моделировалась стержневыми конечными элементами.

При модуле упругости  $E_b = 30000$  МПа и сжимающих напряжениях в бетоне, соответствующих призмочной прочности, отношение  $\sigma_e/R = 0,08$ , как и для бетонной призмы. Однако напряжения в арматуре составили всего 56 МПа, что значительно меньше сопротивления стали.

При уменьшении  $E_b$  до значений, соответствующих предельным деформациям кратковременно нагруженного бетона, отношение  $\sigma_e/R$  незначительно увеличивается (до 10%), а напряжения в арматуре увеличиваются в обратном пропорциональной зависимости от  $E_b$ .

### Заключение

Разные темпы развития теорий разрушения и прочности бетона привели к определенным противоречиям в отношении значимости и соотношений сопротивлений разрушению, сжатию и растяжению. Компьютерное моделирование опытных образцов позволяет оценить соотношение сопротивлений сжатию и растяжению (разрушению). Результаты исследования могут быть полезными при совершенствовании теорий прочности бетона и железобетона.

### Библиографический список

1. Беляев, Н.М. Сопротивление материалов / Н.М. Беляев. – М.: Наука, 1976. – 856 с.
2. Звездов, А.И. О новых нормах проектирования железобетонных и бетонных конструкций / А.И. Звездов, А.С. Залесов, Т.А. Мухамедиев, Е.А. Чистяков // Бетон и железобетон. – 2002. – №2. – С. 2-6.
3. Краснощеков, Ю.В. Прочность бетона при различных напряженных состояниях / Ю.В. Красно-

щеков, Р.А. Галузина. – М.: Стройиздат, 1972. – 600 с.

4. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. – М.: Стандартиформ, 2013. – 30 с.

5. Краснощеков, Ю.В. Прочность бетона сжатых зон изгибаемых и внецентренно-загруженных железобетонных элементов / Ю.В. Краснощеков // Вестник СибАДИ. – 2006. – №4. – С. 130-133.

6. Колмогоров, А.Г. Расчет железобетонных конструкций по российским и зарубежным нормам / А.Г. Колмогоров В.С. Плевков. – Томск: Изд-во «Печатная мануфактура», 2009. – 496 с.

7. Байков, В.Н. Железобетонные конструкции. Общий курс / В.Н. Байков, Э.Е. Сигалов. – М.: Стройиздат, 1976. – 783 с.

8. Карпенко, Н.И. К построению общих критериев деформирования и разрушения железобетонных элементов / Н.И. Карпенко // Бетон и железобетон. – 2012. – №5. – 19-24.

### STRENGTH OF CONCRETE AS FRACTURE RESISTANCE

Yu.V. Krasnoschekov, R.A. Galuzina

**Abstract.** There are certain contradictions between theories of destruction and durability of concrete caused by specific properties of this material and their influence on process of destruction at any intense states. The article examines the contradiction between theory and fracture strength of the concrete, which consists in evaluating the significance of different compression and tension resistance. To clarify the relationship between the resistance of the concrete compression and tension-races authors refer to the method of computer simulation. We present results of a re-investigation of the stress-strain state of the prototypes.

**Keywords:** concrete strength, fracture resistance, stress, consisting of theory and strength criteria.

### Reference

1. Beljaev N.M. *Soprotivlenie materialov* [Strength of materials]. Moscow, Nauka, 1976. 856 p.
2. Zvezdov A.I., Zalesov A.S., Muhamediev T.A., Chistjakov E.A. O novyh normah proektirovaniya zhelezobetonnyh i betonnyh konstrukcij [About the new design standards jelly zobetonnyh and concrete structures]. *Beton i zhelezobeton*, 2002, no 2. pp. 2-6.
3. Krasnoschekov Ju.V., Galuzina R.A. Prochnost' betona pri razlichnyh naprjazhennyh sostojanijah []. Moscow, Strojizdat, 1972. 600 p.
4. GOST 10180-2012. *Betony. Metody opredelenija prochnosti po kontrol'nym obrazcam* [State standard 10180-2012. Concrete. Methods for determining the strength of the reference samples] Moscow, Standartinform, 2013. 30 p.
5. Krasnoschekov Ju.V. Prochnost' betona szhatyh zon izgibaemyh i vnecentrenno-zagruzhennyh zhelezobetonnyh jelementov [The strength of the concrete compression zone and bent eccentrically-loaded reinforced concrete elements]. *Vestnik SibADI*, 2006, no 4. pp. 130-133.

6. Kolmogorov A.G. Plevkov V.S. *Raschet zhelezobetonnyh konstrukcij po rossijskim i zarubezhnym normam* [Calculation of reinforced concrete structures on the Russian and international standards]. Tomsk: Izd-vo «Pechatnaja manufaktura», 2009. 496 p.

7. Bajkov V.N., Sigalov Je.E. *Zhelezobetonnye konstrukcii. Obshhij kurs* [Reinforced concrete structures. General Course]. Moscow, Strojizdat, 1976. 783 p.

8. Karpenko N.I. K postroeniju obshhix krite-riev deformirovanija i razrushenija zhelezobetonnyh jelementov [Construction of the general criteria of deformation and fracture of concrete elements]. *Beton i zhelezobeton*, 2012, no 5. pp. 19-24.

*Краснощевков Юрий Васильевич (Россия, г. Омск) – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Строительные конструкции»,*

*ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: uv1942@mail.ru).*

*Галузина Роксана Александровна (Россия, г. Омск) – магистрант, ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: galuzinaroksana@mail.ru).*

*Krasnoshchekov Yury Vasilyevich (Russian Federation, Omsk) – doctor of technical sciences, the associate professor, professor of Construction Designs chair, The Siberian automobile and highway academy (SIBADI) (644080, Omsk, Mira Ave., 5, e-mail: uv1942@mail.ru).*

*Galuzina Roxana Aleksandrovna (Russian Federation, Omsk) – the undergraduate, The Siberian automobile and highway academy (SIBADI) (644080, Omsk, Mira Ave., 5, e-mail: galuzinaroksana@mail.ru).*

УДК 691.33

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ ПОВЫШЕННОЙ НЕПРОНИЦАЕМОСТИ

В.С. Лесовик<sup>1</sup>, Р.С. Федюк<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, г. Белгород;

<sup>2</sup>Дальневосточный федеральный университет, Россия, г. Владивосток.

**Аннотация.** В работе рассматриваются вопросы разработки композиционных вяжущих для получения бетона с повышенными характеристиками газо-, водо- и паропроницаемости. Исследованы процессы формирования композиционных материалов в порядке уменьшения масштабных уровней от макро- до наноструктурного. Предложены критерии для оптимизации количества дисперсной добавки в бетон. Теоретически изучены технологические особенности формирования гидратной структуры цементного камня. Спрогнозировано положительное влияние нанодисперсных добавок на структуру и физико-механические характеристики цементных композиционных материалов.

**Ключевые слова:** цементный камень, композиционное вяжущее, нанодисперсная добавка, непроницаемость, пористость.

#### Введение

Важнейшей задачей современности являются снижение энергоемкости получения эффективных строительных композитов, улучшение экологической обстановки, оптимизация системы «человек-материал-среда обитания». Эти проблемы характерны и для Дальневосточного региона Российской Федерации, приоритетное развитие которого является важнейшей государственной задачей.

Промышленность строительных материалов широко использует в качестве конструкционного материала бетон на цементном вяжущем и природных заполнителях; в то же время в Дальневосточном регионе в результате деятельности предприятий горнодобывающей промышленности и топливно-

энергетического комплекса образуются крупнотоннажные отходы золы и отсевов дробления на щебень горных пород различного состава.

Представляется необходимым оптимизация процессов структурообразования бетонных смесей за счет использования промышленных отходов, что позволит повысить прочностные характеристики и значительно снизить проницаемость композитов, применяемых в зданиях и сооружениях, где предъявляются повышенные требования к прочности (например в несущих железобетонных конструкциях зданий повышенной этажности) или при защите от сильно агрессивных сред (например, в инженерных подземных сооружениях, где необходима пониженная газо-, и