

УДК [UDK] 539.4

DOI 10.17816/transsyst2018041058-067

© Ю.А. Беленцов, Л.Ф. Казанская

Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I

Санкт-Петербург, Россия

НЕРАЗРУШАЮЩИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА КАК ФАКТОР НАДЕЖНОСТИ БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЯХ

Цель: Развитие теории и практики строительной науки позволяет совершенствовать основы проектирования, строительства и эксплуатации бетонных и железобетонных конструкций. Однако есть опасность разрушения конструкций на разных этапах жизненного цикла. Необходимо повышать качество и надежность возводимых зданий и сооружений.

Методы: В данной работе использованы методы вероятностного прогнозирования.

Результаты: Развитие методов контроля качества строительных материалов, в частности бетона и железобетона, постепенно переходит к неразрушающим методам контроля. Для оценки изменения доверительной вероятности и надежности проектируемых конструкций обоснован переход на вероятностное нормирование прочностных свойств бетонных и железобетонных конструкций с использованием классов и предложен переход на неразрушающие методы контроля. Однако неразрушающие методы контроля имеют ряд недостатков, основной из которых – снижение доверительной вероятности при построении градуировочной кривой, что кардинально влияет на результаты контроля качества. Решить эту проблему можно за счет создания комплекса контрольных испытаний, включающих как разрушающие, так и неразрушающие методы контроля качества. Это позволит организовать сбор испытательной информации повышенной точности.

Ключевые слова: доверительный интервал, методы контроля качества, бетон, железобетон, коэффициент запаса, надежность.

© Yu.A. Belentsov, L.F. Kazanskaya

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

St. Petersburg, Russia

NON-DESTRUCTIVE METHODS OF CONCRETE QUALITY CONTROL AS FACTOR IN RELIABILITY OF CONCRETE AND REINFORCED CONCRETE STRUCTURES IN TRANSPORT FACILITIES

Aim: The development of theory and practice of construction science leads to a need to enhance the basics of design, construction and operation of concrete and reinforced concrete structures. Despite significant progress, there is risk of collapse of different structures at various stages of their lifecycle. Current state of construction industry leads to a need to increase the quality and reliability of buildings and structures under construction.

Methods: The authors have used methods of probabilistic forecasting in this work

Results: The development of methods of construction materials control, particularly concrete and reinforced concrete, leads to a gradual implementation of non-destructive control methods. To assess the change of confidence and reliability coefficients of designed structures, the authors have substantiated the transition to probabilistic rationing of strength properties of concrete and reinforced concrete structures using classes. Also, the authors suggest implementation of non-destructive control methods. However, non-destructive control methods have a number of drawbacks, the key among these being the decrease of confidence coefficient while preparing a calibration curve, which drastically affects the results of quality control. It is possible to solve the problem by creating a set of control tests including both destructive and non-destructive quality control methods. This will provide systems for collecting testing information of high accuracy.

Keywords: confidence interval, quality control methods, concrete, reinforced concrete, safety factor, reliability.

Развитие теории и практики строительной науки позволяет совершенствовать основы проектирования, строительства и эксплуатации бетонных и железобетонных конструкций. Однако есть опасность разрушения конструкций на разных этапах жизненного цикла. Анализ литературных источников показывает, что бетонные и железобетонные конструкции разрушаются в процессе эксплуатации (рис. 1) [1].

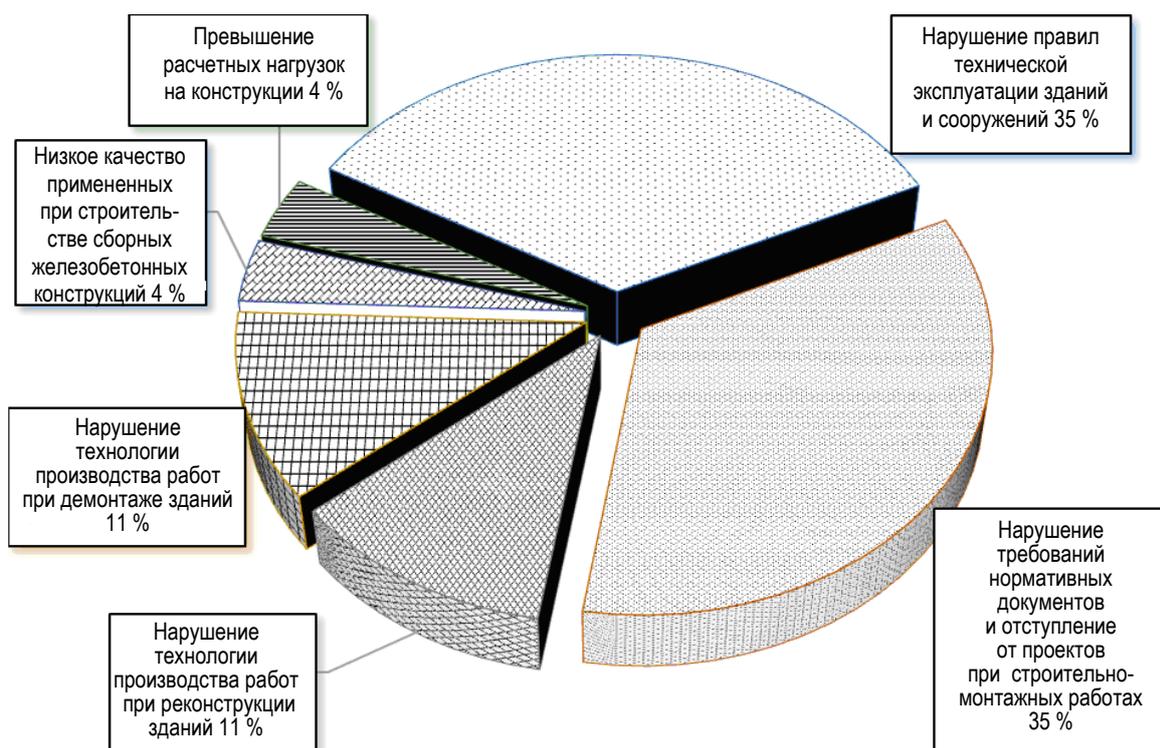


Рис. 1. Причины разрушения основных видов конструкций

Основные причины разрушения – ошибки строительства, отступление от нормативных документов и низкое качество сборных железобетонных элементов, что связано с несовершенством контроля качества, поскольку при правильной организации контроля качества ошибки должны своевременно устраняться. Принципиальная схема формирования триады качества возводимых конструкций представлена на рис. 2 [2].



Рис. 2. Принципиальная схема триады надежности возводимых бетонных и железобетонных конструкций

Постановка задачи

Для решения этой задачи необходимо учитывать совместное действие процессов деформирования и трещинообразования строительных материалов, которые приводят к разрушению (рис. 3), а также реальную структуру материалов, физико-механические показатели и их вариативность [3].

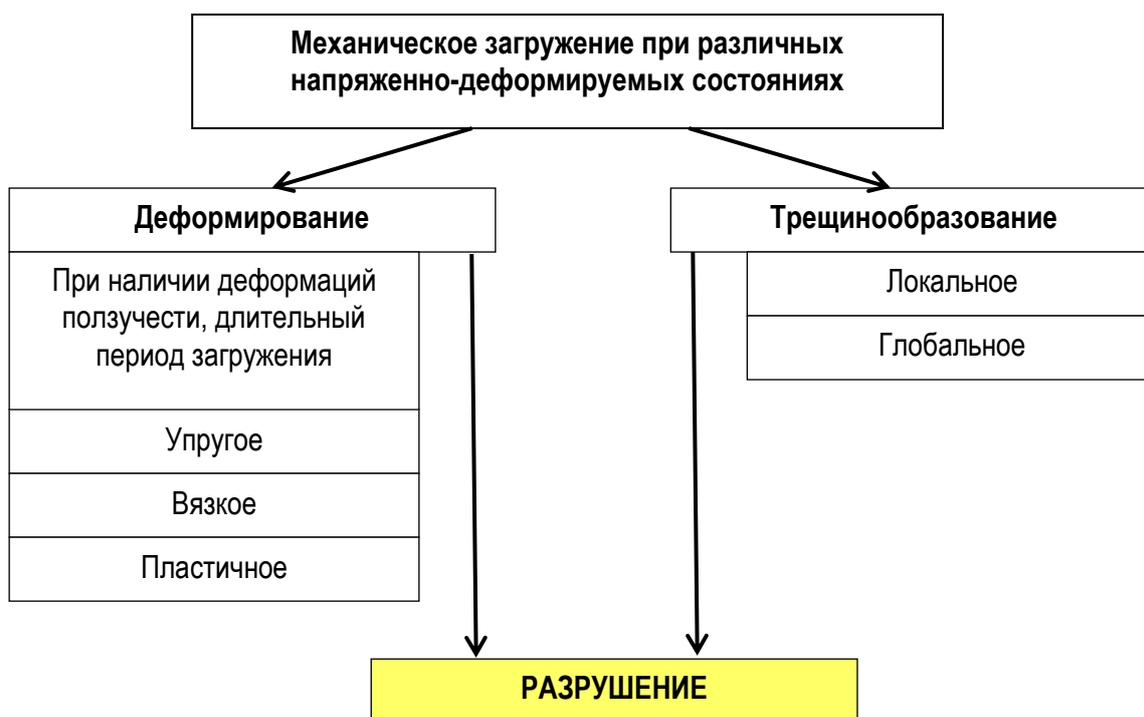


Рис. 3. Схема связи характера деформирования и трещинообразования в композиционных материалах

Принятые допущения

Материалы разрушаются вследствие внешних воздействий, связанных с подводом избытка энергии: механических нагрузок, циклического замораживания-оттаивания, химических реакций, физических процессов и т. п. После приложения критического количества энергии разрушаются внутренние связи структурных элементов материала.

Надежность включает в себя показатели безотказности, долговечности, ремонтпригодности, сохраняемости. Одним из определяющих факторов повышения надежности является принцип контроля механических величин.

Материалы и методы исследования

Повысить надежность конструкций можно двумя путями:

- изучением структуры и свойств материалов для улучшения стабильности свойств с использованием вероятностных методов и применением их в проектных работах и методах приемочных испытаний материалов;
- повышением качества осмотров и ремонтов на основании характера и скорости продвижения трещин в материале при фактическом уровне нагрузки [4].

Для этого необходимо совершенствовать методы контроля качества как важной части обеспечения надежности конструкций возводимых зданий и сооружений, прежде всего, с точки зрения оценки механических свойств [5–7]. При развитии строительных методов испытания и контроля целесообразно заменять традиционные выборочные разрушающие методы контроля прочностных и деформативных свойств бетона сплошным неразрушающим контролем. Переход на неразрушающие методы дает существенный эффект с точки зрения качества и трудоемкости контроля:

- позволяет использовать сплошной контроль, выявляя бракованные конструкции и элементы, которые нельзя определить выборочным контролем разрушающими методами (например, из-за нарушений технологии, неправильной транспортировки бетонной смеси, гравитационного расслоения);
- сокращает время испытаний и затраты на контроль, но при этом сплошной неразрушающий контроль должен влиять на достоверность получаемой измерительной информации.

Рассмотрим влияние перехода на сплошной неразрушающий контроль при возведении бетонных и железобетонных конструкций на достоверность получаемой измерительной информации и на надежность зданий и сооружений.

Результаты

Авторы изучили влияние изменения достоверности получаемой измерительной информации на надежность на примере оценки класса бетона, который формирует значительную долю коэффициента запаса возводимых конструкций из бетона и железобетона. При этом считалось, что количество испытаний значительное и подчиняется нормальному закону распределения. Причиной этому является большая вариативность механических свойств бетона, прежде всего, прочности. Показатель прочности нормируется при определении класса бетона:

$$D = \bar{R}(1 - vt).$$

Для стандартных и разрушающих методов картина распределения результатов испытаний представлена на рис. 4 (достоверность $P = 0,95$, так как допустимый коэффициент вариаций бетона 13,5 % при одностороннем диапазоне коэффициент Стьюдента $t = 1,64$) [8, 9].

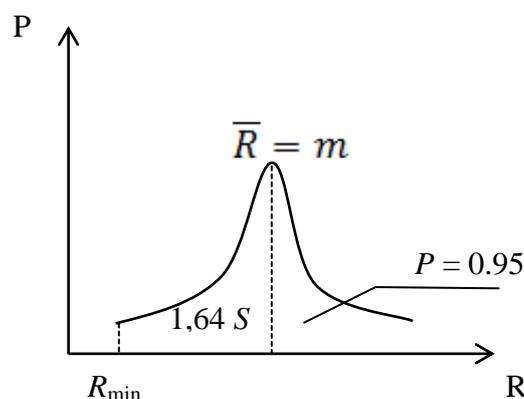


Рис. 4. Связь основных показателей при оценке прочностных свойств бетона

Покажем пример использования бетона класса В30 ($\bar{R} = \frac{30}{1 - 1,64 \cdot 0,135} = 36,8$ МПа). Для серии из значимого количества образцов для бетона класса В30 минимальный допустимый показатель прочности с учетом максимально допустимого коэффициента вариации 13,5 % должен быть не менее:

$$R_{\min} = \bar{R} - 1,64S = \bar{R} - 1,64\bar{R}v = 36,8(1 - 1,64 \cdot 0,135) = 30 \text{ МПа.}$$

Размах составит 6,8 Мпа, при этом отклонение в минимальную сторону опасно для конструкции, поскольку снижает уровень надежности. При снижении прочности в допустимых пределах уменьшается коэффициент запаса бетонных конструкций. Фактически на примере бетона В30 расчетный предел прочности по первой группе предельных состояний составит 17 МПа [8–11].

В нормальных условиях расчетный коэффициент запаса $K_{\text{зап}} = 36,8 / 17 = 2,13$. Значит, в среднем конструкции при проектировании закладываются с запасом, обеспечивающим требуемый уровень надежности и безотказности. При этом надежность характеризуется индексом надежности и вероятностью безотказной работы [12]:

$$\beta = \frac{\bar{R} - \bar{Q}}{\sqrt{S_R^2 + S_Q^2}},$$

где \bar{R}, \bar{Q} – значение прочности и нагрузочного эффекта, соответственно;
 S_R, S_Q – среднеквадратическое отклонение прочностных свойств материала и нагрузок, соответственно.

Вероятность отказа определяется по формуле [9, 10]

$$P_f = \frac{1}{2} - \Phi(\beta) = \frac{1}{2} - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\beta \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx.$$

Асимптотическая формула вероятности отказа [9]

$$P_f = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{\beta^2 - 1}{\beta^3} \exp\left(-\frac{\beta^2}{2}\right),$$

где $\beta = \frac{K_{\text{зап}} - 1}{\sqrt{(v_R^2 K_{\text{зап}}^2 + v_Q^2)}}$;

v_R, v_Q – коэффициенты вариации прочностных свойств материала и нагрузок, соответственно.

Обсуждение результатов

Переход на неразрушающие методы контроля должен изменить ситуацию в лучшую сторону за счет увеличения контрольных точек и перехода на сплошной контроль. В соответствии с нормативными документами при построении градуировочной кривой допускают среднее квадратическое отклонение (СКО) $S_{\text{нм}} = 12\%$, кроме метода отрыва [13]. Для метода отрыва со скалыванием допускается увеличение СКО $S = 4\%$ для анкера длиной 48 мм и $S_{\text{нм}} = 7\%$ – для анкера длиной 20 мм [14]. Авторы рассмотрели, как дополнительная погрешность неразрушающего метода влияет на результирующую достоверность контроля, а значит, на надежность возводимых конструкций с данным уровнем контроля.

Увеличение СКО приводит к снижению достоверности получаемой информации, что в свою очередь увеличивает разброс получаемых результатов испытаний механических свойств.

Чтобы обеспечить соответствующий доверительный интервал, необходимо изменить коэффициент Стьюдента, а значит, снизить достоверность испытаний. Для сохранения средней прочности бетона, соответствующей классу бетона В30, надо снизить коэффициент Стьюдента, это приведет к снижению доверительной вероятности:

$$tS = t'(S + S_{\text{HM}}),$$

где t и t' – коэффициент Стьюдента при данной доверительной вероятности (при стандартном испытании $P = 0,95$);

S , S_{HM} – среднеквадратическое отклонение СКО стандартного испытания при построении градуировочной кривой неразрушающим методом.

Тогда результаты расчетов показывают, что соответствующий коэффициент с учетом изменения СКО составит $t' = 1,46$. Для сохранения показателей прочности с доверительным интервалом, соответствующим классу бетона, достоверность испытаний составляет $P = 0,92$, что противоречит требованиям нормативных документов [15].

Заключение

Исследования показывают, что переход только на неразрушающие методы должен изменить подход к определению допустимых величин механических характеристик с учетом их гарантированной прочности. Существующий подход закладывает снижение достоверности, получаемой в результате испытаний с показателя достоверности $P = 0,92$ до $0,95$, что в свою очередь снижает коэффициенты запаса, а значит, и показатели надежности возводимых конструкций. Отсюда следует, что необходимо более требовательно подходить к выбору выходного контроля строительного процесса. Решить эту проблему можно за счет создания комплекса контрольных испытаний, включающих как разрушающие, так и неразрушающие методы. Такой подход позволит создать систему сбора испытательной информации повышенной точности.

Библиографический список

1. Аварии зданий и сооружений на территории Российской Федерации в 2003 году. – М.: Центр качества строительства, 2004. – 67с.
2. Ефремов И.В., Рахимова Н.Н. Надежность технических систем и техногенный риск. – Оренбург: ОГУ, 2013. – 163 с.
3. Беленцов Ю.А., Ильинская Г.Г., Лесовик В.С. Повышение надежности конструкций управлением параметрами композиционного материала // Строит. материалы. – 2011. – № 3. – С. 90–92.
4. Плювинаж Г. Механика упругопластического разрушения. – М.: Мир, 1993. – 448 с.

References

1. Accidents of buildings and constructions in the territory of the Russian Federation in 2003. Moscow; 2004. 67 p. (In Russ.)
2. Efremov IV, Rahimova N. Reliability of Technical Systems and Technogenic Risk. Orenburg; 2013. 163 p. (In Russ.)
3. Belencov YuA, Il'inskaya GG, Lesovik VS. *Stroitel'nye materialy*. 2011;3: 90–92. (In Russ.)
4. Plyuvinazh G. Mechanics of elastic-plastic fracture. Moscow: Mir; 1993. 448p. (In Russ.)

5. Штенгель В.Г. О корректном применении НК в обследованиях железобетонных конструкций длительно эксплуатирующихся сооружений // В мире неразрушающего контроля. – 2009. – № 3. – С. 56–62.
5. Shtengel' VG. *V mire nerazrushayushchego kontrolya*. 2009;3:56–62. (In Russ.)
6. Улыбин А.В. О выборе методов контроля прочности бетона построенных сооружений // Инженерно-строительный журнал. – 2011. – № 4 (22). – С. 10–15.
6. Ulybin AV. *Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal*. 2011;4(22):10–15. (In Russ.)
7. Улыбин А.В., Федотов С.Д., Тарасова Д.С. Определение прочности бетона при обследовании зданий и сооружений // Мир строительства и недвижимости. – 2012. – № 45. – С. 2–5.
7. Ulybin AV, Fedotov SD, Tarasova DS. *Mir stroitel'stva i nedvizhimosti*. 2012;45:2–5. (In Russ.)
8. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции: нормы проектирования (введ. 01.01.2013). – М.: Изд-во стандартов, 2015. – 147 с.
8. SP 63.13330.2012. Concrete and Reinforced Concrete Construction Design Standards. Moscow; 2015. 147 p. (In Russ.)
9. Ржаницын А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. – М.: Стройиздат, 1978. – 239 с.
9. Rzhanicyan AR. *The Theory of Calculation of Building Structures on the Reliability*. Moscow: Sroyizdat; 1978. 239 p. (In Russ.)
10. Райзер В.Д. Теория надежности сооружений. – М.: АСВ, 2010. – 384 с.
10. Rajzer VD. *The Theory of Reliability of Construction*. Moscow: ACB; 2010. 384 p. (In Russ.)
11. Райзер В.Д. Оптимизация надежности конструкций и безопасности человека // Актуальные проблемы исследований по теории сооружений: сб. науч. ст. конф., Москва. Т. 1. – М.: ЦНИИСК им. Кучеренко, 2009. – С. 22–31.
11. Rajzer VD. *Optimization of structural reliability and safety. (Conf.) "Actualnie problemmi issledovaniy po teorii soorugeniyy"*. Vol. 1. Moscow; 2009. P. 22–31. (In Russ.)
12. Казанская Л.Ф., Григорьев Д.С., Макаров Ю.В. Микромеханические свойства контактной зоны в бетонах на основе техногенного сырья // Естественные и технические науки. – 2014. – № 2 (70). – С. 292–295.
12. Kazanskaya LF, Grigor'ev DS, Makarov YuV. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2014;2(70):292–295. (In Russ.)
13. ГОСТ 22690-2015. Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля (введ. 04.01.2016). – М.: Стандартинформ, 2016. – 20 с.
13. GOST 22690-88. *Concretes. Determination of Strength by Mechanical Methods of Nondestructive Testing*. Moscow; 2016. 20 p. (In Russ.)
14. ГОСТ 18105-2010. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности (введ.
14. GOST 18105-2010. *Concretes. Rules for Strength Monitoring*. Moscow; 2013. 16 p.

09.01.2012). – М.: Стандартинформ, 2013. (In Russ.)
– 16 с.

15. ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения (введ. 07.01.2015). – М.: Стандартинформ, 2015. – 16 с.

15. GOST 27751-2014. Reliability of Building Structures and Foundations. Fundamentals. Moscow; 2015. 16 p. (In Russ.)

Сведения об авторах:

Беленцов Юрий Алексеевич, доктор технических наук, профессор,
eLibrary SPIN: 271986; ORCID 0000-0001-7492-2161;
E-mail: belents@mail.ru

Казанская Лилия Фаатовна, доктор технических наук, профессор,
eLibrary SPIN: 6073-9446; ORCID 0000-0002-8734-1064;
E-mail: yalifa@inbox.ru

Information about authors:

Yuri A. Belentsov, Doctor of Engineering Sciences, Professor,
eLibrary SPIN: 271986; ORCID 0000-0001-7492-2161;
E-mail: belents@mail.ru

Liliya F. Kazanskaya, Doctor of Engineering Sciences, Professor
eLibrary SPIN: 6073-9446; ORCID 0000-0002-8734-1064;
E-mail: yalifa@inbox.ru

Цитировать:

Беленцов Ю.А., Казанская Л.Ф. Неразрушающие методы контроля качества как фактор надежности бетонных и железобетонных конструкций в транспортных сооружениях // Транспортные системы и технологии. – 2018. – Т. 4, № 1. – С. 58-67. DOI: 10.17816/transsyst2018041058-067.

To cite this article:

Belentsov YuA, Kazanskaya LF. Non-Destructive Methods of Concrete Quality Control as Factor in Reliability of Concrete and Reinforced Concrete Structures in Transport Facilities. *Transportation Systems and Technology*. 2018;4(1):58-67. DOI: 10.17816/transsyst2018041058-067.