

Восстановление защитного слоя бетона поврежденных изгибаемых конструкций

О.А. Симаков, П.С. Лосев

Московский Государственный Строительный Университет, г. Москва

Аннотация: В статье приведен анализ влияния повреждения защитного слоя бетона зоны максимальных изгибающих моментов однопролетных балок на несущую способность конструкции и возможность восстановления начальной несущей способности. Исследование базируется на проведенных лабораторных исследованиях и численном эксперименте, а также анализе ранее проведенных испытаний и накопленном опыте восстановления конструкций. В результате сделаны выводы о влиянии разрушения защитного слоя бетона на несущую способность изгибаемых конструкций, а также даны рекомендации по дальнейшим исследованиям вопроса расчета и проектирования данных систем.

Ключевые слова: повреждение защитного слоя бетона, коррозия арматуры, восстановление, усиление.

Введение

Железобетонные конструкции в ходе эксплуатации получают различной степени повреждения, вызванные как ошибками проектирования, внешними внесистемными факторами, так и некачественной эксплуатацией конструкций [1, 2]. Одним из таких характерных повреждений является разрушение защитного слоя бетона железобетонных конструкций, в результате коррозии арматуры.

Данное повреждение достаточно часто можно наблюдать для балок и плит покрытия, когда происходят протечки через разрушенный гидроизоляционный кровельный ковер (рис. 1).

Данное повреждение в особенности касается элементов покрытия: плит и балок покрытия. При регулярных замочаниях стальная арматура корродирует и с учетом увеличения сечения происходит разрушение защитного слоя бетона (так называемый отстрел). Кроме этого, похожую картину можно наблюдать после огневого воздействия и повышенных температур: различный коэффициент линейного расширения компонентов бетона приводит к разрушению поверхностного слоя и оголению арматуры.

В качестве основного решения по восстановлению бетона конструкций как правило рассматривают вопросы наращивания в обобщенной постановке метода [3, 4], так и в частном решение посредством применения специальных ремонтных составов ручного нанесения [5-7]. В месте с тем в последнее время с целью повышения надежности итоговой восстановленной конструкции как правило рассматривают применение композитов для повышения несущей способности: дисперсное поверхностное армирование [8, 9], применением внешнего армирования на основе волокон [10, 11].



Рис. 1. Разрушение защитного слоя бетона конструкций

Восстановление защитного слоя цементно-песчаным раствором не позволяет рассматривать итоговую конструкцию с эквивалентной для начальной несущей способностью – как правило для железобетонных конструкций используются бетоны выше В25 и цементно-песчаный раствор реальной марки до М150 не позволит полностью восстановить несущую способность. В настоящее время для этих целей используют специальные ремонтные составы с повышенной адгезией и прочностью, при этом отсутствуют базовые требования к физико-механическим характеристикам таких составов.

Таким образом решения вопроса восстановления защитного слоя бетона является актуальной задачей, требующей детального решения в том числе в части оценки несущей способности восстановленного сечения.

Анализ характерных повреждений

Проводя анализ данного вида повреждений можно выделить следующие характерные особенности:

1. Этапы разрушения:

- замокание конструкции, начало процессов коррозии;
- появление продольных трещин (продольных по отношению к основному рабочему армированию);
- разрушение защитного слоя бетона конструкции, оголение не более 50% окружности стальной арматуры;
- разрушение бетона в зоне сопряжения с арматурой (Рисунок 2).



Рис. 2. Разрушение бетона в зоне сопряжения с арматурой

2. Степень влияния на несущую способность.

Снижение сечения армирования при толщине слоя коррозии можно оценить по диаграмме на рис. 3. При этом фактическое сечение не следует

рассматривать при толщине слоя коррозии больше 3,0 мм ввиду практически полной потери сцепления с бетоном.

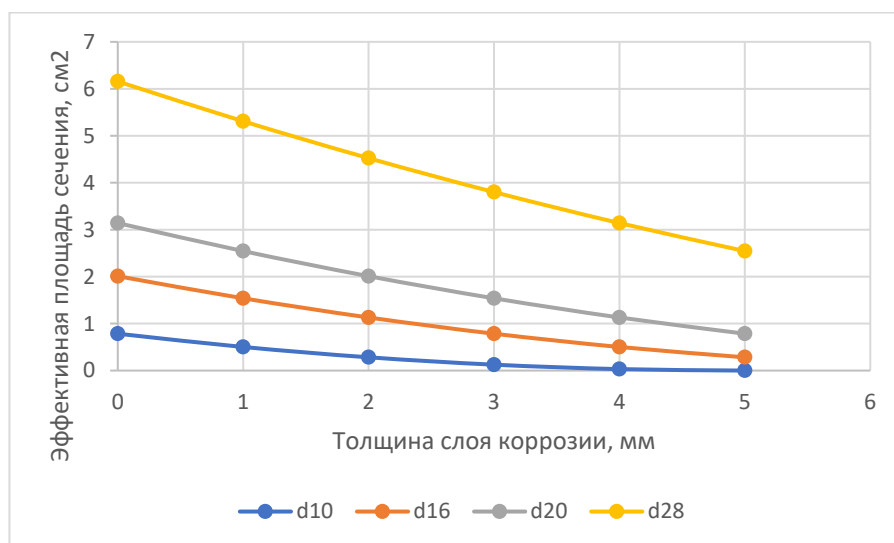


Рис. 3. Снижение расчетной площади сечения в зависимости от толщины слоя коррозии для диаметров исходной арматуры 10, 16, 20 и 28 мм

Влияние на несущую способность можно оценить на характерной конструкции – однопролетной балке. При этом исходное сечение подобрано с целью исключения ограничения по относительной высоте сжатой зоны (рис. 4)

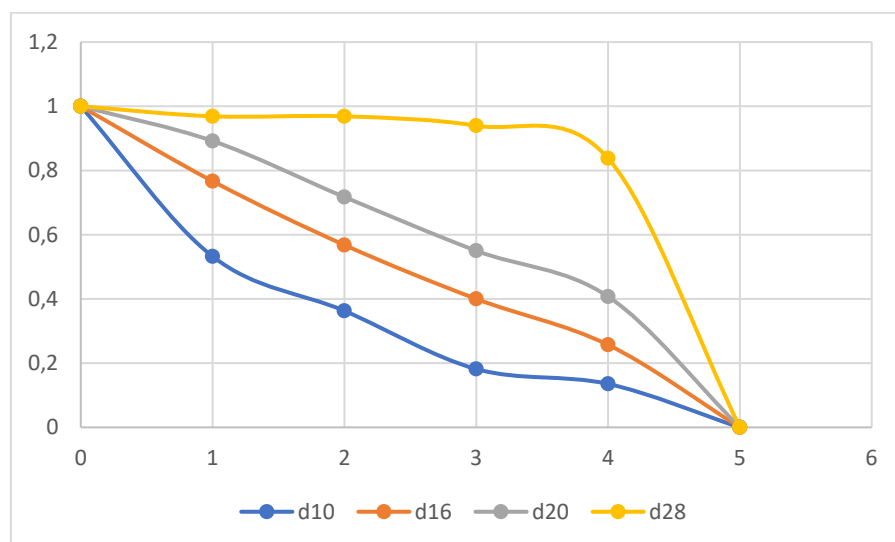


Рис. 4. Снижение несущей способности однопролетной балки в зависимости от толщины слоя коррозии для диаметров исходной арматуры 10, 16, 20 и 28 мм

Как видно по графику рисунка 4 несущая способность сечения связана нелинейно с диаметром армирования (снижением сечения). Данный факт объясняется значительным количеством проверок по действующим нормативным документам:

- Прочность по предельному моменту сечения;
- Деформации в сжатом бетоне;
- Деформации в растянутой арматуре.

Экспериментальные исследования

С целью исследования работы конструкции с разрушенным защитным слоем были проведены испытания образцов – балок по схеме (рис. 5)

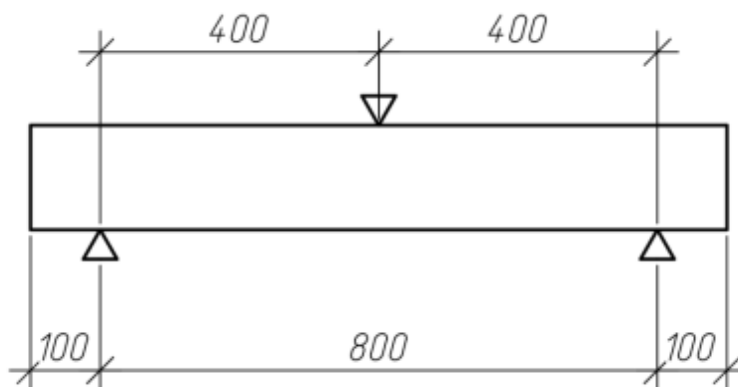


Рис. 5. Схема испытания балок

В качестве образцов приняты балки сечением 100x150 мм длиной 1000 мм следующего сечения (рис. 6, 7):

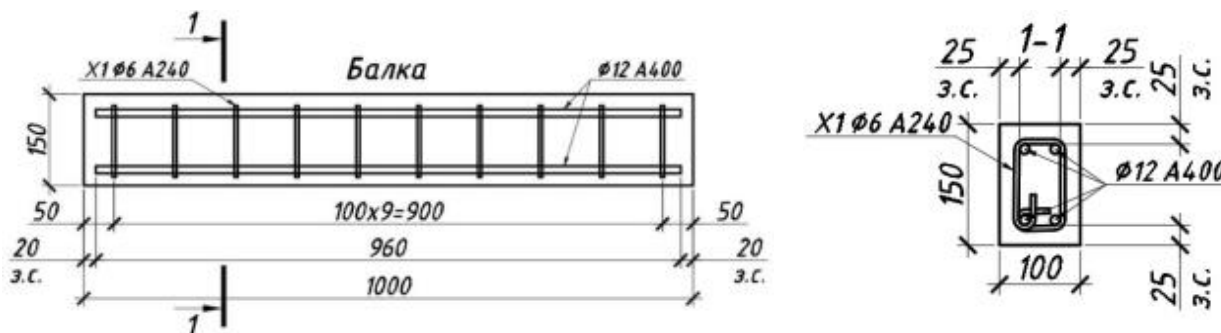


Рис. 6. Армирование экспериментальной балки

Контрольные балки были без повреждения защитного слоя, для остальных балок были выполнены «тарированные» повреждения – разрушение защитного слоя бетона с полным оголением рабочей арматуры в пролетной зоне (рис. 8).



Рис. 7. Арматурные каркасы



Рис. 8. - Балки с «тарированными» дефектами

Восстановление защитного слоя бетона балок проводилось с использованием высокопрочного ремонтного состава CarbonWrap Repair ST (рисунок 9-10), предназначенного для структурного усиления и восстановления несущей способности конструкций.



Рис. 9. Состав для восстановления защитного слоя бетона



Рис. 10. – Балки с восстановленным защитным слоем бетона

Испытания проводились в лаборатории кафедры железобетонных и каменных конструкций НИУ МГСУ на универсальном прессе (рис. 11-12). Фиксация результатов проводилась посредством специального

автоматического регистрирующего оборудования с фиксацией результатов и построении графиков в ходе эксперимента.



Рис. 11. – Разрушение балок с невосстановленным защитным слоем



Рис. 12. – Разрушение балок с восстановленным защитным слоем

Таблица 1.

Результаты испытания образцов-балок

№ Образца	Балка	Макс. нагрузка (кН)	Характер разрушения
1	Без повреждений	90.230	Нормальные и наклонных
2		78.538	
3	С «тарированным» повреждением, без восстановления	68.256	Наклонных от точки прил. сил к опорам
4		50.818	
5	Восстановленная ремонтным составом	83.528	Наклонных от точки прил. сил к опорам
6		83.806	

По результатам испытаний получены данные о характере деформирования (рис. 13) и общие результаты несущей способности (табл. 1).

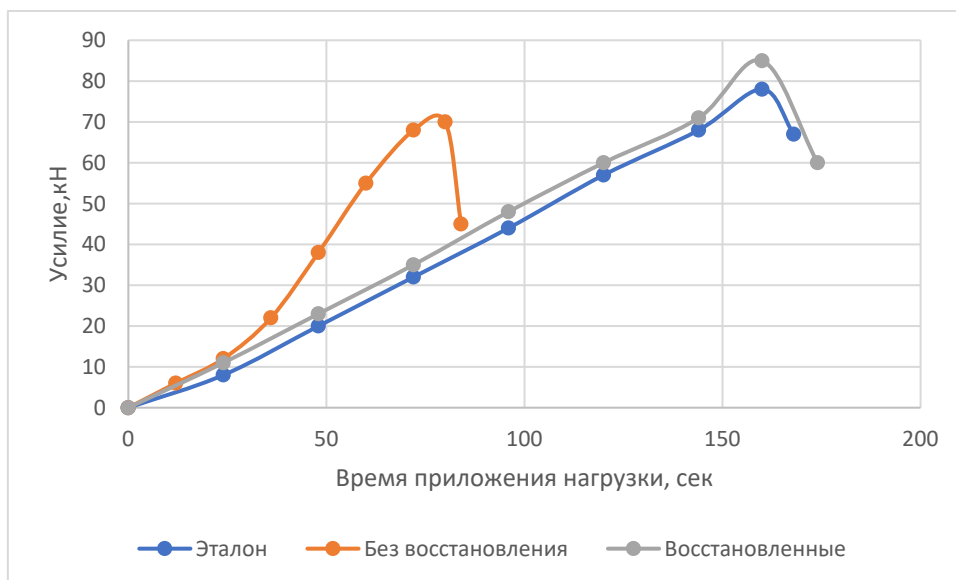


Рис. 13. Характер деформирования образцов при испытании

Численный эксперимент

Численный эксперимент был поставлен в среде SCad office, путем нелинейного моделирования работы балки без повреждений (условно восстановленную) и с повреждениями (рис. 14). При этом учтен опыт и результаты ранее проведенных лабораторных исследований [12-14].

Моделирование балок выполнено как в плоской постановке (контрольные решения), так и с применением объемных конечных элементов. Особое внимание было уделено качеству разбиения элементов с выравниванием местных осей и направления выдачи усилий в едином направлении. Также проведено моделирование физически нелинейной работы железобетона путем задания диаграммы снижения жесткости на основе двухлинейной диаграммы деформирования бетона. Деформации «проскальзывания» в зоне анкеровки стержней не учитывались, работа арматурных стержней принята линейной с начальным модулем упругости.

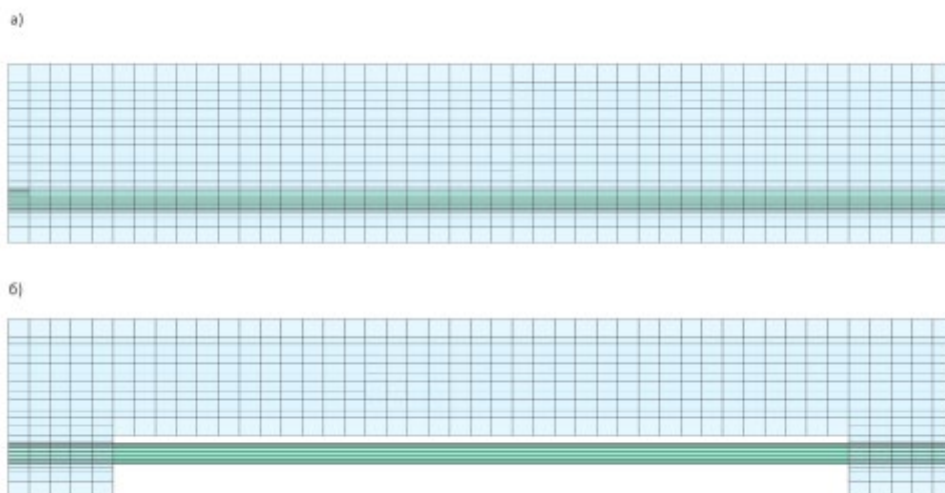


Рис. 14. Модели балок. а) без повреждений (восстановленная), б) с повреждениями

Характер деформирования балок (рис. 15) наглядно демонстрирует механизм работы конструкции и полученные в ходе лабораторных исследований результаты:

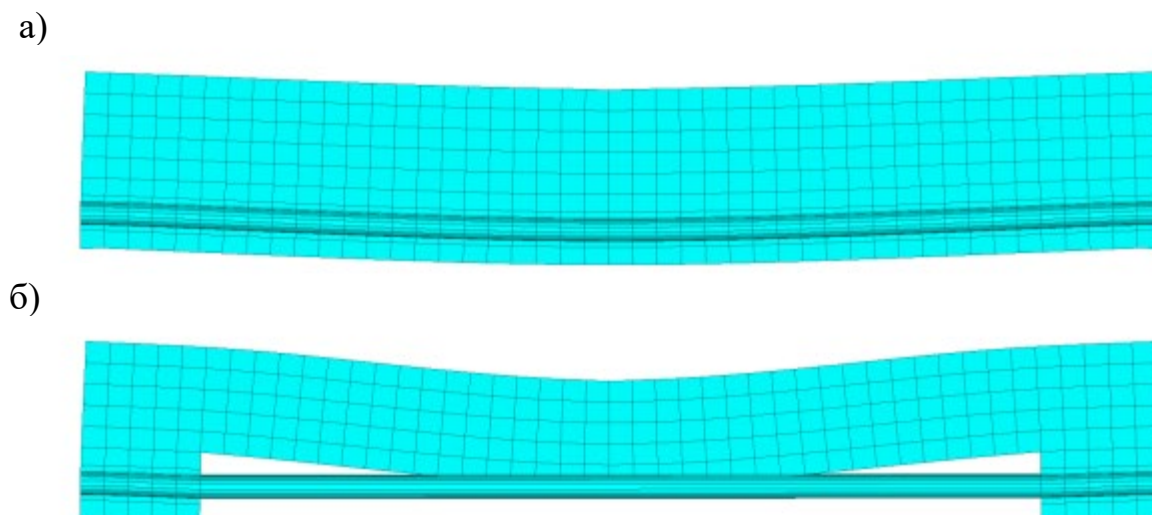


Рисунок 15. Качественные деформации балок. а) без повреждений (восстановленная), б) с повреждениями

Распределение напряжений в бетонных элементах показывают незначительное повышение напряжений в конструкции с повреждениями (рис. 16-17).



Рис. 16. Напряжения в бетонных элементах а) без повреждений (восстановленная), б) с повреждениями

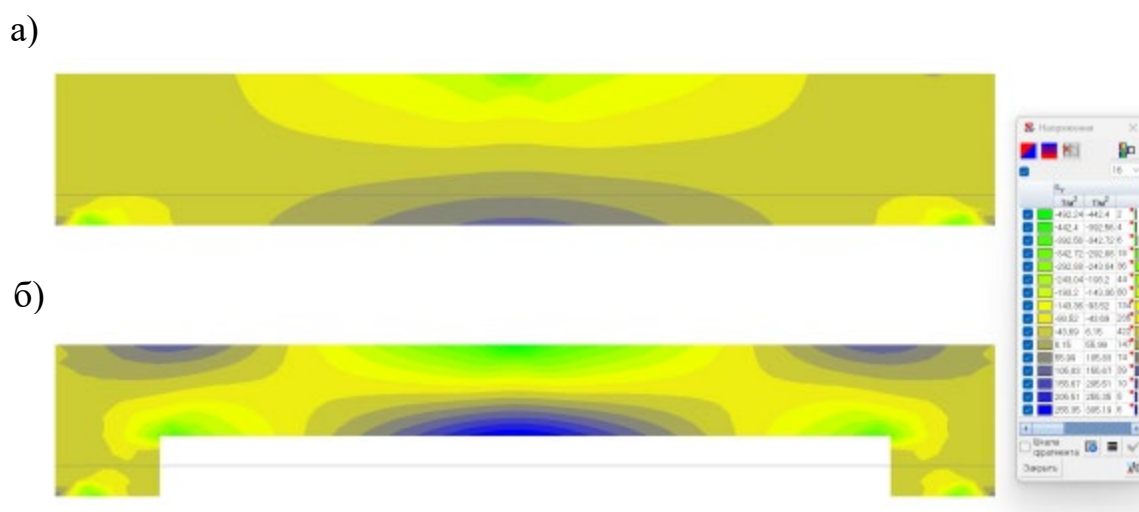


Рис. 17. Напряжения в бетонных элементах а) без повреждений (восстановленная), б) с повреждениями

В целом можно отметить повышение напряжений до 20% в элементах балки без восстановления. При этом в нижней зоне балки для конструкций восстановления характерны усилия сжатия, формирующиеся между растянутой арматурой и сжатой зоной бетона.

Заключение

По результатам проведенных численного и лабораторного эксперимента, а также на основе накопленного опыта можно сделать следующие выводы:

1. Разрушение защитного слоя бетона изгибаемых конструкций при котором «оголяется» арматура центральной зоны ведет к снижению несущей способности, в том числе без уменьшения сечения арматуры за счет коррозии.
2. Снижение несущей способности изгибаемых конструкций за счет разрушения бетона защитного слоя можно оценить в районе 5-40% от начальной, расчетное значение снижается до 5% (не рассматриваются случаи повреждения бетона в зоне анкеровки стальных стержней).
3. Применение специализированных составов для восстановления бетона позволяет полностью восстановить несущую способность конструкции при корректном применении. Введение каких-либо коэффициентов к несущей способности восстановленных конструкций при условии обеспечения анкеровки растянутой арматуры не требуется.
4. Дальнейшие исследования целесообразно проводить в направлении оценки несущей способности поврежденных внецентренно-сжатых конструкций и восстановлении анкеровки рабочей арматуры.

Литература

1. Симаков О.А. Анализ факторов, вызывающих необходимость усиления железобетонных конструкций. Строительство и реконструкция. 2019. №1. С. 76-84.
 2. Гроздов В. Т. Признаки аварийного состояния несущих конструкций зданий и сооружений. СПб. Издательский Дом KN+, 2000. 48 с.
-

3. Мальганов А.И. Восстановление и усиление строительных конструкций аварийных и реконструируемых зданий. Атлас чертежей. Томск, 1990г.
4. Тонких Г. П., Плевков В. С., Мальганов А. И., Кабанцев О. В. Оценка технического состояния строительных конструкций зданий и сооружений: Пособие / под ред. В. С. Плевкова и Г. П. Тонких. Томск: Печатная мануфактура, 2009. 205 с.
5. Шилин А. А., Зайцев М. В., Пшеничный В. А., Картузов Д. В. Ремонт и усиление железобетонных конструкций: методическое пособие. Москва: Стройиздат, 2007. 181 с.
6. Лесовик В.С., Загороднюк Л.Х., Беликов Д.А., Щекина А.Ю., Куприна А.А. Эффективные сухие смеси для ремонтных и восстановительных работ. Строительные материалы. 2014. №7. С. 82-85.
7. Лесовик В.С., Загороднюк Л.Х., Чулкова И.Л. Закон сродства структур в материаловедении. Фундаментальные исследования. 2014. №3-2. С. 267-271.
8. H.K. Lee, L.R. Hausmann, Structural repair and strengthening of damaged RC beams with sprayed FRP, Compos. Struct. 2004. 63 (2). Pp. 201–209.
9. Wonchang Choi, Hyun-Do Yun, Sun-Woo Kim. Flexural performance of reinforced recycled aggregate concrete beams. Magazine of Concrete Research. 2012 Vol. 64, Iss: 9, pp 837-8.
10. Бокарев С.А., Смердов Д.Н. Нелинейный анализ железобетонных изгибаемых конструкций, усиленных композитными материалами // Вестник Томского государственного архитектурно -строительного университета. 2010. № 2. С. 113-125.
11. Маилян Д.Р., Михуб А., Польской П.П. Вопросы исследования изгибаемых железобетонных элементов, усиленных различными видами

композитных материалов // Инженерный вестник Дона. 2013. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1674.

12. Рекомендации по обеспечению надежности и долговечности железобетонных конструкций промышленных зданий и сооружений при их реконструкции и восстановлении /Харьковский Промстройиниипроект. - М.: Стройиздат, 1990. - 176 с.

13. Isaac M. Daniel, Ori Ishai, Engineering Mechanics of Composite Materials, Oxford University Press, 2006, 411 p.

14. Алжнде Г., Топилин А.Н. Нелинейный анализ поврежденных железобетонных колонн, восстановленных оболочкой из углепластика с помощью Abaqus // Строительство и застройка: жизненный цикл - 2020: материалы V Междунар. (XI Всерос.) конф. - Чебоксары, 2020. С. 64-76.

References

1. Simakov O.A. Stroitel'stvo i rekonstrukcija. 2019. №1, Pp. 76-84.
2. Grozdov V. T. Priznaki avarijnogo sostoyaniya nesushchih konstrukcij zdaniy i sooruzhenij [Signs of emergency conditions in load-bearing structures of buildings and structures]. SPb, Izdatel'skij Dom KN+. 2000. 48 p.
3. Malganov A.I. Vosstanovlenie i usilenie stroitelnyh konstrukcij avarijnyh irekonstruiruemyh zdaniy. Atlas chertezhej [Restoration and reinforcement of building structures in emergency and reconstructed buildings. Atlas of drawings]. Tomsk, 1990.
4. Tonkih G. P., Plevkov V. S., Malganov A. I., Kabancev O. V. Ocenka tekhnicheskogo sostoyaniya stroitelnyh konstrukcij zdaniy i sooruzhenij: Posobie. pod red. V. S. Plevkova i G. P. Tonkih [Assessment of the technical condition of building structures and structures: Manual]. Tomsk: Pечатnaya manufaktura, 2009, 205 p.

5. Shilin A. A., Zajcev M. V., Pshenichnyj V. A., Kartuzov D. V. Remont i usilenie zhelezobetonnyh konstrukcij: metodicheskoe posobie [Repair and reinforcement of reinforced concrete structures: methodological guide]. Moskva: Strojizdat, 2007. 181 p.
6. Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.H., Belikov D.A., Shchekina A.Yu., Kuprina A.A. Stroitelnye materialy. 2014. №7. Pp. 82-85.
7. Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.H., Chulkova I.L. Fundamentalnye issledovaniya. 2014. №3-2. Pp. 267-271.
8. H.K. Lee, L.R. Hausmann, Structural repair and strengthening of damaged RC beams with sprayed FRP, Compos. Struct. 2004. 63 (2). Pp. 201–209.
9. Wonchang Choi, Hyun-Do Yun, Sun-Woo Kim. Flexural performance of reinforced recycled aggregate concrete beams. Magazine of Concrete Research. 2012 Vol. 64, Iss: 9, pp 837-8.
10. Bokarev S.A., Smerdov D.N. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno -stroitelnogo universiteta. 2010. № 2. Pp. 113-125.
11. Mailyan D.R., Mihub A., Polskoj P.P. Inzhenernyj vestnik Dona. 2013. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1674.
12. Rekomendacii po obespecheniyu nadezhnosti i dolgovechnosti zhelezobetonnyh konstrukcij promyshlennyh zdaniy i sooruzhenij pri ih rekonstrukcii i vosstanovlenii. Harkovskij Promstrojniiproekt [Recommendations for ensuring the reliability and durability of reinforced concrete structures in industrial buildings and structures during their reconstruction and restoration]. M.: Strojizdat, 1990. – pp. 176.
13. Isaac M. Daniel, Ori Ishai, Engineering Mechanics of Composite Materials, Oxford University Press, 2006, 411 p.



14. Alzhnde G., Topilin A.N. Stroitel'stvo i zastrojka: zhiznennyj cikl - 2020: materialy V Mezhdunar. (XI Vseros.) konf. Cheboksary, 2020. Pp. 64-76.

Дата поступления: 19.05.2025

Дата публикации: 25.07.2025