Academia. Архитектура и строительство, № 4, стр. 130–137.
Academia. Architecture and Construction, no. 4, pp. 130–137.

Исследования и теория
Научная статья
УДК 691:328.1
doi: 10.22337/2077-9038-2022-4-130-137

Тамразян Ашот Георгиевич (Москва). Доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РААСН. Кафедра железобетонных и каменных конструкций Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26. НИУ МГСУ). Эл. почта: tamrazian@mail.ru.

Tamrazyan Ashot G. (Moscow). Doctor of Sciences in Engineering, Professor, Corresponding Member of RAACS. The Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures of the National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavskoye Shosse, Moscow, Russia, 129337. NRU MGSU). E-mail: tamrazian@mail.ru.

Несущая способность коррозионно-поврежденных изгибаемых железобетонных элементов, подвергнутых огневому воздействию

Аннотация. Одной из основных причин ремонта и восстановления жилых домов и сооружений является коррозия железобетонных конструкции. В статье приводятся результаты экспериментальных исследований по огнестойкости корродированного высокопрочного железобетона. Для этого были изготовлены железобетонные балки различной прочности и бетонные призмы для испытания на сжатие (ГОСТ 10180-2012).

После набора прочности все балки подвергались коррозии в два этапа с применением электрического тока, затем производилась оценка трещин от коррозии, после чего 50% образцов подвергались воздействию огня, следуя кривой времени-температуры по ГОСТ 30247.0-94 (ИСО 834-75).

Повреждения от огня были оценены и сравнены между образцами с использованием метода ультразвуковой импульсной диагностики (УИД). Все образцы были проверены по прочности на изгиб с использованием ГОСТ 10180-2012. Влияние огневых воздействий на корродированные балки анализировалось по уровню коррозии. Потери несущей способности изгибаемых корродированных балок составляли от 78 % до 84% в зависимости от целостности корродированной балки после воздействия огня, которая имела прочность на сжатие 70МПа и средний уровень коррозии 9,3%. Такая большая потеря несущей способности результат сильного растрескивания бетона из-за совместного действия коррозии и огневого воздействия. Кроме того, образцы с трещинами в целом демонстрируют линейную зависимость от уровня коррозии стальной арматуры, связанной с потерей массы.

Ключевые слова: железобетонная балка, изгиб, коррозия, огневое воздействие, несущая способность, скорость ультразвука, потери массы

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования (проект «Теоретико-экспериментальное конструирование новых композитных материалов для обеспечения безопасности при эксплуатации зданий и сооружений в условиях техногенных и биогенных угроз», номер проекта № FSWG-2020-0007).

Bearing Capacity of Corrosion-Damaged Bending Reinforced Concrete Elements Exposed to Fire

Abstract. One of the main reasons for the repair and restoration of residential buildings is the corrosion of reinforced concrete structures. This study aims to provide experimental data on the fire resistance of corroded high-strength reinforced concrete. For this, 18 samples of reinforced concrete beams were prepared from three different concrete mixtures (of different strengths) together with concrete prisms for compressive strength tests (GOST 10180-2012).

After curing, all beams were corroded in two stages using electric current, then corrosion cracks were evaluated, after which 50% of the samples were exposed to fire, following the time-temperature curve GOST 30247.0-94 (ISO 834-75) using a gas furnace.

Fire damage was assessed and compared between samples using the Ultrasonic Pulse Diagnosis (UPD) method. All samples were tested for bending strength using GOST 10180-2012. The effect of fire exposure on corroded beams was analyzed by the level of corrosion. The bearing capacity loss of the bent corroded beams ranged from 78% to 84% depending on the integrity of the corroded beam after

© Тамразян А.Г., 2022.

exposure to fire, which had a compressive strength of 70MPa and an average corrosion rate of 9.3%. Such a large loss of bearing capacity is the result of severe cracking of concrete due to the combined action of corrosion and fire exposure. In addition, cracked specimens generally show a linear relationship with the level of corrosion of steel reinforcement associated with mass loss.

Keywords: reinforced concrete beam, bending, corrosion, fire impact, load bearing capacity, ultrasonic velocity, mass loss

Funding. This work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project "Theoretical and experimental design of new composite materials to ensure safety during the operation of buildings and structures in conditions of man-made and biogenic threats" No. FSWG-2020-0007).

Введение

У морского побережья бетонные и железобетонные строения, такие как жилые здания, гостиницы, мосты, платформы, эстакады и опоры, подвергаются воздействию морской и прибрежной среды. Эти воздействия увеличивают подверженность к коррозии арматурной стали.

Воздействие огня может усугубить повреждения в уже корродированных конструкциях. Безопасность конструкций, в частности, пожарная, является одной из основных проблем в высотных зданиях и мостах, где часто используются бетонные элементы из-за присущей им огнестойкости. Конструктивные элементы реагируют на высокие температуры при пожаре в комбинации следующих вредных эффектов:

1) потеря механической прочности, жёсткости и долговечности;

2) неоднородные температуры и распределения напряжений по сечениям;

3) индуцированные механические напряжения из-за температурного расширения и теплового градиента;

4) возможный откол бетона, который изменяет распределение температуры в бетоне и арматуре.

Исследование, положенное в основу статьи, рассматривало комбинированное воздействие коррозии и огня, которые могут иметь разрушительные последствия для устойчивости железобетонных зданий и сооружений.

1. Коррозия железобетона

Бетон обеспечивает естественную защиту арматурной стали от коррозии благодаря своей внутренней щелочной среде (pH от 12 до 13). При высоком pH вокруг стальной арматуры образуется тонкий оксидный слой, препятствующий растворению атомов металла и снижающий скорость коррозии до незначительного уровня, который известен как скорость пассивной коррозии и обычно составляет 0,1 мкм в год.

Разрушение тонкого оксидного слоя увеличивает скорость коррозии как минимум в тысячу раз по сравнению со скоростью пассивной коррозии из-за присутствия кислорода и влаги на поверхности границы раздела «сталь–бетон». Пассивный слой может разрушаться или распадаться при снижении щёлочности бетона или при увеличении концентрации хлоридов в бетоне выше определённого порогового уровня.

Процесс коррозии включает в себе постепенное удаление атомов железа (Fe) из корродируемой стали в результате электрохимической реакции и растворения в окружающем водном растворе в виде ионов двухвалентного железа (Fe^{2+}). Для арматурной стали это растворение происходит в ограниченном объёме водного раствора, присутствующего в порах бетона, окружающего сталь. В результате этого процесса растворения сталь теряет массу, что приводит к уменьшению площади поперечного сечения.

Электрохимический процесс, управляющий коррозией стали в бетоне, включает в себя электрические и химические процессы. Две электрохимические реакции, известные как «анодная» и «катодная», происходят одновременно вдоль поверхности стальной арматуры.

Типы коррозии в железобетоне можно классифицировать по различным критериям, которые включают механизмы коррозии, внешний вид окончательных повреждений, среды, вызывающие коррозию, и т.д. Хотя классификация типов коррозии не является абсолютной, она даёт возможность оценить ущерб, что необходимо для проведения ремонта и восстановления. Типы коррозии, наблюдаемые в этом эксперименте, включают:

а) равномерную коррозию: в некоторых случаях расстояние между анодной и катодной областями слишком мало, чтобы их можно было отделить друг от друга. Поэтому анодные и катодные процессы будут протекать практически равномерно по поверхности стали, и в результате растворение стали происходит равномерно вдоль арматурного стержня;

б) локальную коррозию: при локальной, точечной или щелевой коррозии анодная область намного меньше катодной, но скорость проникновения коррозии в анодную область намного выше, чем в катодную. Таким образом, коррозионная ячейка состоит из небольшой быстро корродирующей анодной области и большой катодной области, окружающей анодную область. Эта особенность высокого соотношения катодной и анодной площадей делает локальную коррозию очень опасной для стали в бетоне.

2. Влияние огневых воздействий на прочность бетона и железобетонных элементов

Железобетонные конструкции с какой-то вероятностью могут подвергаться воздействию повышенных температур в течение срока службы из-за техногенных и иных катастрофических пожаров. При этом механические свойства бетона, такие как прочность, модуль упругости и объём, значительно снижаются.

При воздействии огня существенно изменяются химический состав и физическая структура бетона. Дегидратация, такая как высвобождение химически связанной воды из гидрата силиката кальция (CSH), становится значительной при температуре выше примерно 110 °С.

Дегидратация гидратированного силиката кальция и тепловое расширение заполнителя увеличивают внутренние напряжения, а при температуры от 300 °С и выше в материале появляются микротрещины. Гидроксид кальция, важный компонент цементной пасты, диссоциирует при температуре около 530 °С, что приводит к усадке бетона.

Установлено, что относительная прочность бетона снижается с повышением температуры огневого воздействия.

При оценке воздействия огня на железобетонную конструкцию исходят из трёх основных факторов[1]:

1) снижение прочности бетона;

2) возможная пластическая деформация арматуры в бетоне;

3) потеря сцепления между арматурой и бетоном.

Последнее ставит под угрозу главным образом конструктивную целостность железобетонных балок, так как передача растягивающего напряжения от бетона к арматуре значительно уменьшается.

Наличие арматуры в бетонных элементах может распределить степень повреждения при высоких температурах, но может создавать остаточные напряжения после охлаждения, которые, наряду с возможными потерями сцепления арматурной стали и бетона, могут привести К потере целостности при эксплуатационных нагрузках.

Потеря прочности сцепления может достигать 60%, когда железобетон подвергается температуре выше 500 °С.

Кроме того, стальная арматура в железобетонных конструкциях изготавливается из горячекатаного проката. Предел текучести стали имеет тенденцию к увеличению по мере повышения её температуры примерно до 250 °С, после чего фактический предел текучести будет быстро падать, поскольку температура продолжает расти [2], что негативно скажется на надёжности, несущей способности изгибаемого железобетонного элемента и вызовет его ранний выход из строя [3–7].

3. Ультразвуковая импульсная диагностика

Для количественной оценки остаточной прочности бетона на сжатие при повышенных температурах использована технология ультразвуковой импульсной диагностики (УИД) [8]. Это определялось как отношение скорости ультразвука в бетонном образце при огневом воздействии (пожаре) к скорости без воздействия огня. Скорость ультразвука считается показателем термического повреждения образца, обусловленного её чувствительностью к изменению модуля упругости бетона. На самом деле изменение модуля упругости из-за нагрева является прогрессивным, с квазилинейным уменьшением, возникающим в результате разложения в результате разложения портландита и дегидратации CSH-геля, а также из-за термической несовместимости между заполнителями (которые расширяются) и цементной пастой (которая сначала подвергается усадке, а затем расширяется) [9].

Кроме того, хорошо известно, что скорость ультразвука в бетоне сильно зависит от его влагосодержания. В процессе нагрева влага постепенно выводится из материала. Порядок, в котором вода удаляется из нагретого бетона, зависит от энергии, которая связывает воду и твёрдую фракцию. Таким образом, сначала испаряется свободная вода, затем капиллярная вода, физически связанная вода и химически связанная вода. Процесс удаления химически связанной воды (то есть части гидратов цемента) является последним. В целом вытеснение воды из-за обезвоживания и нагревания сильно влияет на скорость ультразвука, уменьшая её по сравнению со скоростью в образце без нагрева [9].

Для оценки остаточной прочности на сжатие предложено уравнение соотношения между коэффициентом остаточной прочности и коэффициентом остаточной скорости ультразвука:

$$y = 1{,}03 \cdot X_{уид} - 0{,}06,$$

где Y – коэффициент остаточной прочности и $X_{уид}$ – коэффициент остаточной скорости ультразвука (в процентах).

4. Подготовка образцов и испытание

Для всех образцов был использован высокопрочный бетон.

Были подготовлены два набора образцов балок (по три для каждого набора) и один набор образцов призм (три образца).

Расчётное В/Ц = 0,38, осадка конуса бетонной смеси – 24,1 см.

Размеры образцов балок 150×150×530 мм. Для армирования были использованы два арматурных стержня Ø14 А400, как показано на рисунке 1.

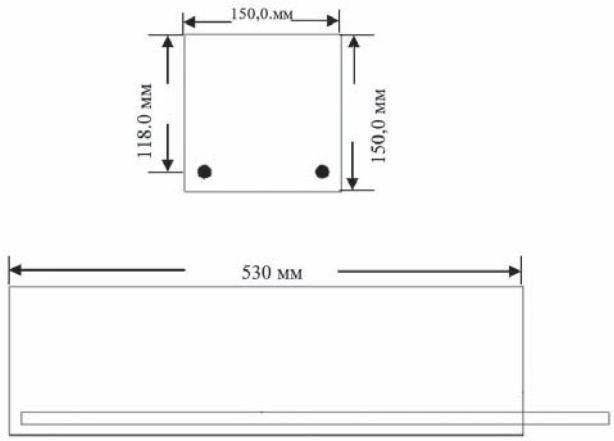

Рис. 1. Поперечное сечение балки

4.1 Ускоренная коррозия

Для коррозионных испытаний был использован ускоренный электрохимический метод. Химическое воздействие моделировалось погружением испытуемых образцов в физиологический раствор хлористого натрия (3% NaCl) и подсоединением стальной арматуры к положительному выводу источника тока постоянного напряжения при подключении металлической сетки, окружающей образцы балок (но не касающейся их), к отрицательному концу. Стальные арматурные стержни действовали как анод, а металлическая сетка – как катод. Поэтому хлорид-ионы (отрицательные) притягивались к аноду (стальной арматуре), и порог концентрации хлорид-иона в бетоне был достигнут в ускоренном режиме, чтобы вызвать коррозию. Ток от источника постоянного напряжения в каждом арматурном стержне периодически контролировался с помощью токоизмерительных клещей. Увеличение трещин больше, чем на 1 мм, при внезапном увеличении силы тока, свидетельствовало о коррозии [10–12].

4.2 Огневые испытания

Три образца подвергались воздействию повышенных температур в соответствии с температурной кривой по ISO-834[1] с учётом снижения времени для малых образцов.

[1] ГОСТ 30247.0-94 (ИСО 834-75) «Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования» (https://docs.cntd.ru/document/9055248).

Таблица 1. Температура внутри газовой печи для образцов

Время (мин)	Температура (°C)	Время (мин)	Температура (°C)
0	27	8	673
1	582	9	689
2	571	10	697
3	653	11	699
4	666	12	704
5	662	13	715
6	668	14	726
7	692	15	747

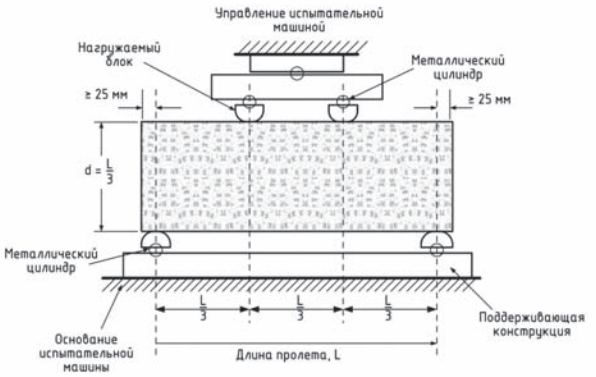

Рис. 2. Схема испытаний образцов на изгиб

Для огневых испытаний всех образцов использовалась газовая печь с верхней загрузкой с пятью горелками с максимальной температурой 1290 °C. Внутренние размеры печи: ширина – 72 см, высота – 68 см. Температура в печи контролировалась с помощью термопар и пяти горелок, а также давления газа пропана.

4.3 Испытания на изгиб

Схема испытаний показана на рисунке 2.

Скорость нагружения задавалась как половина от указанной в ГОСТ 10180-2012[2] из-за полученных больших повреждений балок после коррозии и огневых воздействий. Для определения предварительной скорости нагружения было использовано следующее уравнение

$$r = \frac{sbd^2}{L} \qquad (2)$$

где: r – скорость нагружения, (Н/мин); S – скорость увеличения максимального напряжения по растянутой грани, МПа/мин; b – средняя ширина образца, мм; d – средняя толщина образца, мм; L – длина пролёта, мм.

Скорость нагружения r = 5730 Н/мин была рассчитана с учётом S = 0,9 МПа, как рекомендовано в ГОСТ 10180-2012[3], b = 150 мм, d = 150 мм и L = 530 мм. Фактически использованная скорость нагружения составляла половину расчётной скорости, или 2865 Н/мин.

Максимальную нагрузку для изгибаемых образцов, подвергнутых отдельно коррозии и воздействию огня, а также коррозии с последующим воздействием огня, определяли двухточечным нагружением на прессе.

Потери массы образцов арматурных стержней были измерены и сопоставлены с количеством трещин соответствующих балок, как показано в таблице 2.

Как видно на таблицы 2, некоторые образцы, по сравнению с другими, подвергшимися такой же коррозии, получили высокие уровни коррозии, измеренные по потере массы. Это произошло из-за локальной коррозии в этих образцах, вызвавшей скалывание бетона, что привело к значительной потере площади поперечного сечения арматуры из-за прямого воздействия коррозионной среды на стальную арматуру.

Большинство образцов испытали коррозионную потерю массы менее 7%, и только два образца показали коррозионную потерю массы более 10% из-за локальной коррозии арматурных стержней.

5. Оценка повреждённости балок при огневом воздействии

Для сравнения повреждений образцов от огня на всех балках были проведены ультразвуковые испытания. В таблице 3 показаны скорости ультразвуковых импульсов,

[2] ГОСТ 10180-2012. Межгосударственный стандарт «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам (https://docs.cntd.ru/document/1200100908).

[3] Там же.

полученные для образцов, подвергшихся коррозии, но не подвергавшихся воздействию огня. Кроме того, в таблице 4 показаны скорости ультразвуковых импульсов, измеренных для образцов, подвергшихся коррозии и подвергавшихся воздействию огня.

Соотношение средних скоростей ультразвука для корродированных образцов, подвергавшихся и не подвергавшихся воздействию огня, составляет 0,779.

Определяли максимальную нагрузку при изгибе, которую могли выдержать корродированные и подвергнутые воздействию огня, а также корродированные и не подвергнутые воздействию огня образцы.

В таблице 5 приведены максимальные моменты, действующие в образцах.

На рисунке 3 показаны кривые зависимости «нагрузка –прогиб» для образца.

Прогиб образца № 1 при максимальной нагрузке составил 7,51 мм.

Для образцов № 2 – 6,65 мм, № 3 – 11,92 мм, № 4 – 3,26 мм № 5 –5,41 мм.

Таблица 2. Потеря массы корродированной арматуры

Номер образца	Арматура	Начальная масса, г	Окончательная масса, г	Потери, %	Средние потери, %
1	Наиболее корродированная	588	520	11,56	6,97
	Наименее корродированная	588	574	2,38	
2	Наиболее корродированная	588	478	18,71	13,10
	Наименее корродированная	588	544	7,48	
3	Наиболее корродированная	588	566	3,74	4,08
	Наименее корродированная	588	562	4,42	
4	Наиболее корродированная	588	400	31,97	17,35
	Наименее корродированная	588	572	2,72	
5	Наиболее корродированная	588	558	5,10	4,93
	Наименее корродированная	588	560	4,76	
6	Наиболее корродированная	588	555	5,61	4,17
	Наименее корродированная	588	572	2,72	

Таблица 3. Испытание UPV на образцах, не подвергавшихся воздействию огня

Номер образца	Скорость ультразвука, м/с
1	3990
2	3801
3	3791
Среднее	3860

Таблица 4. Испытание UPV на образцах, подвергавшихся воздействию огня

Номер образца	Скорость ультразвука, м/с
1	3073
2	2791
3	3153
Среднее	3006

Таблица 5. Максимальные моменты, полученные в образцах

№№ образца	Огневое воздействие	Средний уровень коррозии, %	Максимальная нагрузка, кН	Максимальный момент, кНм	Примечание
1	Без огня	7	13,3	2,000	–
2	Без огня	13	17,5	2,670	–
3	Без огня	4	11,3	1,730	–
4	Огонь	17	3,1	0,476	Оба арматурных стержня сохранили сцепление с бетоном
5	Огонь	5	2,2	0,334	Один арматурный стержень сохранил сцепление с бетоном
6	Огонь	4	0,156	0,024	Оба арматурных стержня не сохранили сцепление с бетоном

Кривую «нагрузка–прогиб» образца № 6 невозможно было получить, потому что неармированный образец был разрушен при нагрузке 385 Н из-за того, что нагрузочная машина не успела передать эту нагрузку на пресс.

6. Анализ результатов

Влияние огня на несущую способность образцов изгибаемых балок показано в таблице 6.

При средней степени коррозии 9,3% для всех образцов потеря изгибающего момента очень значительная – от 78% до 85%. Высокая потеря прочности на изгиб, в частности, связана со значительным отколом бетона на образцах не только в поперечном сечении, но и по бокам, что значительно уменьшило поперечное сечение и, следовательно, несущую способность по моменту. Теоретический максимальный момент, рассчитанный для некорродированной и не подвергнутой воздействию огня балки с использованием бетона прочностью на сжатие 70 МПа, составил 9,05 кНм.

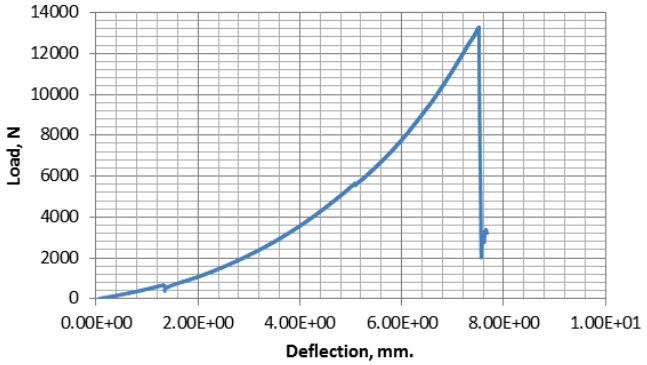

Рис. 3. Кривая «нагрузка – прогиб» образца 1

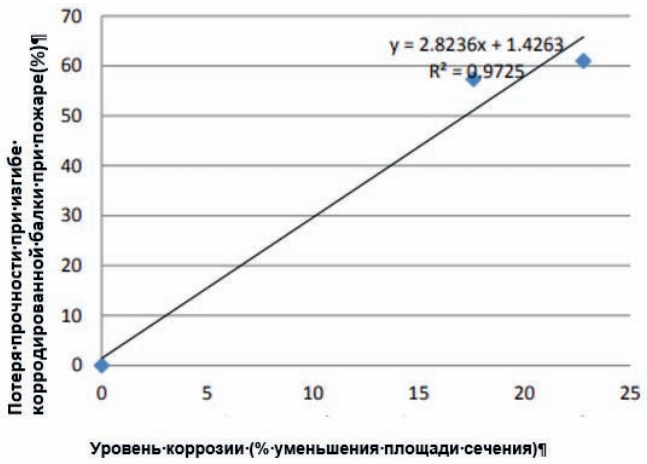

Рис. 4. Влияние огня на прочность при изгибе корродированных образцов

Принимая значение этого момента в качестве контрольного для некорродирующей балки, был рассчитан процент потери прочности на изгиб (76,3%) при коррозии среднего уровня (9,3%), и потери (94,7%) при коррозии и огневом воздействии для образца, который сохранил связь с обоими стержнями после воздействия огня.

На рисунке 4 показан график зависимости потери прочности на изгиб корродированных балок при огневом воздействии от среднего уровня коррозии для образцов.

7. Заключение

Проводились ускоренные испытания корродирования образцов. Образцы показали более низкие уровни потери массы, но более частое нарушение сцепления арматуры из-за прямого воздействия на арматуру коррозионной среды вследствие сильного выкалывания бетона. В целом было установлено, что чем больше образование трещин, тем выше соответствующая потеря массы, если не происходит частичное нарушение сцепления арматуры[4]. Площадь трещин была в линейной зависимости от соответствующей степени коррозии (потери массы) образцов.

Наиболее негативным последствием воздействия огня и коррозии до испытания на изгиб было преждевременное нарушение сцепления арматуры с бетоном. После огневого воздействия в одном из образцов произошло полное нарушение сцепления арматуры, в другом образце только один арматурный стержень потерял сцепление, и только один образец сохранил свою целостность, причём оба арматурных стержня были связаны с бетоном после воздействия огня.

[4] ГОСТ 30247.0-94 (ИСО 834-75) «Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования» (https://docs.cntd.ru/document/9055248).

Таблица 6. Потери изгибающего момента для образцов изгибаемых балок

Образцы	Средний максимальный момент, Н·м	Потери изгибающего момента, %	Примечание
При огневом воздействии сцепление арматуры с бетоном сохраняется (образец 4)	476	78	Оба арматурных стержня сохранили сцепление с бетоном
При огневом воздействии происходит нарушение сцепления арматуры (образец 5)	334	85	Один арматурный стержень сохранил сцепление с бетоном

Для образцов со средним уровнем коррозии 9,3%:

– остаточный изгибающий момент для корродированной балки, подвергшейся огневому воздействию, при сохранении сцепления двух арматурных стержней с бетоном, показал значительную потерю, – примерно 78% по сравнению со средним изгибающим моментом для корродированных балок, не подверженных воздействию огня;

– для корродированной балки, подвергшейся воздействию огня, в которой сохранилось сцепление только одного арматурного стержня с бетоном, потеря изгибающего момента составила примерно 84% по сравнению со средним изгибающим моментом для корродированной балки, не подвергающейся воздействию огня.

Список источников

1. *Haddad, R.H.* Effect of elevated temperature on bond between steel reinforcement and fiber reinforced concrete / R.H. Haddad, , R.J. Al-Saleh, , N.M. Al-Akhras. – Текст: непосредственный // Fire Safety Journal. – 2008. – Том 43, № 5. – P. 334–343.

2. *Xiao, J.* Study on Concrete at High Temperature in China – An Overview / J. Xiao and G. Konig. – Текст: непосредственный // Fire Safety Journal. – 2004. – Том 39, № 1. – P. 89–103.

3. *Тамразян, А.Г.* Расчёт внецентренно сжатых железобетонных элементов при динамическом нагружении в условиях огневых воздействий / А.Г. Тамразян. – Текст: непосредственный // Промышленное и гражданское строительство. – 2015. – № 3. – С. 29–35.

4. *Тамразян, А.Г.* К оценке надёжности изгибаемых железобетонных плит при огневых воздействиях / А.Г. Тамразян, Ю.Н. Звонов. – Текст: непосредственный // Научное обозрение. – 2015. – № 14. – С. 130–133.

5. *Tamrazyan A.* Reduce the impact of dynamic strength of concrete under fire conditions on bearing capacity of reinforced concrete columns / A. Tamrazyan. – Текст: непосредственный // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Т. 475–476. – С. 1563–1566.

6. *Тамразян, А.Г.* Огнеударостойкость несущих железобетонных конструкций высотных зданий / А.Г. Тамразян. – Текст: непосредственный // Жилищное строительство. – 2005. – № 1. – С. 7.

7. *Тамразян, А.Г.* Анализ надёжности железобетонной плиты с корродированной арматурой / А.Г. Тамразян, Т.А. Мацеевич. – Текст: непосредственный // Строительство и реконструкция. – 2022. – № 1 (99). – С. 89–98.

8. *Young, J.* (2006). Effect of Elevated Temperature and Fire on Structural Elements Retrofitted by Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites / J. Young. – Boca Raton : Florida Atlantic University, 2006.

9. *Hager, I.* Damage Assessment of Concrete subjected to High Temperature by means of the Ultrasonic Pulse Velocity – UPV Method / I. Hager, H. Carré and K. Krzemień. – Текст: непосредственный // Studies and Researches. – 2013. – Том 32, № 1. – P. 197–211.

10. *Тамразян, А.Г.* Напряжённо-деформированное состояние коррозионно-повреждённых железобетонных элементов при динамическом нагружении / Тамразян А.Г., Попов Д.С. – Текст: непосредственный // Промышленное и гражданское строительство. – 2019. – № 2. – С. 19–26.

11. *Song, G.* (1998). Corrosion of Steel in Concrete: Causes, Detection and Prediction / G. Song and A. Shayan. – Текст: непосредственный. – Victoria, Australia : ARRB Transport Research Ltd., 1998.

12. *Tamrazyan A., Popov D.* Reduce of bearing strength of the bent reinforced concrete elements on a sloping section with the corrosive damage of transversal armature / Tamrazyan A., Popov D. – Текст: электронный // MATEC Web of Conferences. – 2017. – С. 00162. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=31111353&pff=1 (дата обращения 16.11.2022).

13. *Bingöl, A.F.* Residual Bond Strength between Steel Bars and Concrete after Elevated Temperatures / A.F. Bingöl and R. Gül. – Текст: непосредственный // Fire Safety Journal. – 2009. – № 44 (6). – P. 854–859.

References

1. Haddad R.H., Al-Saleh R.J., Al-Akhras N.M. Effect of elevated temperature on bond between steel reinforcement and fiber reinforced concrete. In: *Fire Safety Journal*, 2008, Vol. 43, no. 5, pp. 334–343. (In Engl.)

2. Xiao, J. and Konig G. Study on Concrete at High Temperature in China – An Overview. In: *Fire Safety Journal,* 2004, Vol. 39, no. 1, pp. 89–103. (In Engl.)

3. Tamrazyan A.G. Raschet vnetsentrenno szhatykh zhelezobetonnykh elementov pri dinamicheskom nagruzhenii v usloviyakh ognevykh vozdeystviy [Calculation of Eccentrically Compressed Reinforced Concrete Elements Under Dynamic loading Under Fire Conditions]. In: *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [*Industrial and Civil Engineering*], 2015, no. 3, pp. 29–35. (In Russ., abstr. in Engl.)

4. Tamrazyan A.G., Zvonov Yu.N. K otsenke nadezhnosti izgibayemykh zhelezobetonnykh plit pri ognevykh vozdeystviyakh [On Assessing the Reliability of Bendable Ferroconcrete Plates under Fire Impact]. In: *Nauchnoe obozreniye* [*Scientific review*], 2015, no. 14, pp. 130–133. (In Russ.)

5. Tamrazyan A. Reduce the impact of dynamic strength of concrete under fire conditions on bearing capacity of reinforced concrete columns. In: *Applied Mechanics and Materials*, 2014, Vol. 475–476, pp. 1563–1566. (In Engl.)

6. Tamrazyan A.G. Ogneudarostoykost' nesushchikh zhelezobetonnykh konstruktsiy vysotnykh zdaniy [Fire and Shock Resistance of Load-Bearing Reinforced Concrete Structures of High-Rise Buildings] In: *Zhilishchnoe stroitel'stvo* [*Housing construction*], 2005, no. 1, p. 7. (In Russ.)

7. Tamrazyan A.G., Matseyevich T.A. Analiz nadezhnosti zhelezobetonnoy plity s korrodirovannoy armaturoy [Reliability Analysis of Reinforced Concrete Slabs with Corroded Reinforcements] In: *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya* [*Building and reconstruction*], 2022, no. 1 (99), pp. 89–98. (In Russ., abstr. in Engl.)

8. Young J. Effect of Elevated Temperature and Fire on Structural Elements Retrofitted by Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites. Boca Raton, Florida Atlantic University, 2006. (In Engl.)

9. Hager I., Carré H. and Krzemień K. (2013). Damage Assessment of Concrete subjected to High Temperature by means of the Ultrasonic Pulse Velocity – UPV Method. In: *Studies and Researches*, 2013, Vol. 32, no. 1, pp. 197–211. (In Engl.)

10. Tamrazyan A.G., Popov D.S. Napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye korrozionno-povrezhdennykh zhelezobetonnykh elementov pri dinamicheskom nagruzhenii [Stress-Strain State of Corrosion-Damaged Reinforced Concrete Elements under Dynamic Loading] In: *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [*Industrial and Civil Engineering*], 2019, no. 2, pp. 19–26. (In Russ., abstr. in Engl.)

11. Song G. and Shayan A. Corrosion of Steel in Concrete: Causes, Detection and Prediction. Victoria, Australia, 1998, ARRB Transport Research Ltd. (In Engl.)

12. Tamrazyan A., Popov D. Reduce of bearing strength of the bent reinforced concrete elements on a sloping section with the corrosive damage of transversal armature. In: *MATEC Web of Conferences*, 2017, p. 00162. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=31111353&pff=1 (Accessed 11/16/2022). (In Engl.)

13. Bingöl A.F. and Gül R. Residual Bond Strength between Steel Bars and Concrete after Elevated Temperatures. In: *Fire Safety Journal*, 2009, Vol. 44, no. 6, pp. 854–859. (In Engl.)