

И.А. ТЕРЕХОВ¹¹ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», г. Москва, Россия

КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ ПРИ КОРРОЗИИ АРМАТУРЫ

Аннотация. Для предупреждения преждевременного износа и снижения несущей способности железобетонных плит необходимо своевременно проводить обследование их технического состояния с определением причин возникновения дефектов с последующей их ликвидацией. В настоящее время в ГОСТ 31937, регулирующего правила обследования, отсутствуют количественные значения критериев технического состояния, по которым можно назначить категорию технического состояния конструкций, в том числе в рамках визуального обследования. Для выявления частоты появления дефектов, связанных с коррозией арматуры в железобетонных плитах зданий и сооружений, а также определения причин их возникновения были рассмотрены 738 архивных отчетов АО «ЦНИИПромзданий» по обследованию.

Анализ проведенных ранее обследований показал, что дефекты, вызванные с коррозией арматуры, являются одними из наиболее распространенных и требуют более детальных указаний по назначению категории технического состояния конструкций. Для разработки критериев технического состояния железобетонных плит с дефектами, полученными в результате коррозии арматуры, был выполнен расчетный анализ влияния коррозии арматуры на несущую способность, рассмотрено влияние продуктов коррозии на образование продольных и поперечных трещин, данных экспериментальных исследований, а также требований нормативных документов.

Ключевые слова: сборный железобетон, многопустотные плиты, ребристые плиты, коррозия арматуры, дефект, критерий технического состояния.

I.A. TEREKHOV¹¹Russian University of Transport, Moscow, Russia

CRITERIA FOR ASSESSING THE TECHNICAL CONDITION OF REINFORCED CONCRETE SLABS DURING REINFORCEMENT CORROSION

Abstract. To prevent premature wear and reduce the bearing capacity of reinforced concrete slabs, it is necessary to conduct a timely examination of their technical condition with the determination of the causes of defects with their subsequent elimination. At present, GOST 31937, which regulates the inspection rules, does not contain quantitative values of the technical condition criteria, according to which it is possible to assign a category of the technical condition of structures, including within the framework of a visual inspection. To identify the frequency of occurrence of defects associated with corrosion of reinforcement in reinforced concrete slabs of buildings and structures, as well as to determine the causes of their occurrence, 738 archival survey reports of TsNIIPromzdaniy JSC were considered.

An analysis of previous surveys showed that defects caused by corrosion of reinforcement are among the most common and require more detailed instructions on the designation of the category of technical condition of structures. To develop criteria for the technical condition of reinforced concrete slabs with defects resulting from reinforcement corrosion, a calculation analysis of the effect of reinforcement corrosion on the bearing capacity was performed, the effect of corrosion products on the formation of longitudinal and transverse cracks, experimental data, and the requirements of regulatory documents were considered.

Keywords: precast concrete, hollow-core slabs, ribbed slabs, reinforcement corrosion, defect, technical condition criterion.

Введение

В период эксплуатации зданий возникает снижение их несущей способности, рост деформаций и кренов в результате воздействия внешних и внутренних процессов деградации материалов строительных конструкций.

Для предупреждения преждевременного износа [1-3] и снижения несущей способности железобетонных плит необходимо своевременно проводить обследование их технического состояния с определением причин возникновения дефектов с последующей их ликвидацией.

Согласно ГОСТ 31937-2011 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния» предварительное (визуальное) обследование проводится с целью определения начальной оценки технического состояния строительных конструкций и инженерного оборудования по внешним признакам. На этом этапе обследования выполняется выявление и фиксация дефектов, а также определяется необходимость в проведении детального (инструментального) обследования и уточнения программы работ. В случае, если установленные дефекты строительных конструкций позволяют однозначно определить причины их появления и способы их устранения, то этого может быть достаточно для оценки технического состояния конструкций.

Однако, в ГОСТ 31937 отсутствуют количественные значения критериев технического состояния, по которым можно назначить категорию технического состояния конструкций, в том числе при коррозии арматуры.

Модели и методы

База данных. Для выявления частоты появления дефектов, связанных с коррозией арматуры в железобетонных плитах зданий и сооружений, а также определения причин их возникновения были рассмотрены архивные материалы АО «ЦНИИПромзданий» по обследованию (рисунок 1). Здания и сооружения располагались в различных климатических зонах и различались интенсивностью нагрузок и воздействий, влияющих на образование и развитие дефектов.

База данных включает сведения о результатах обследований 738 эксплуатируемых зданий и сооружений с железобетонными конструкциями.

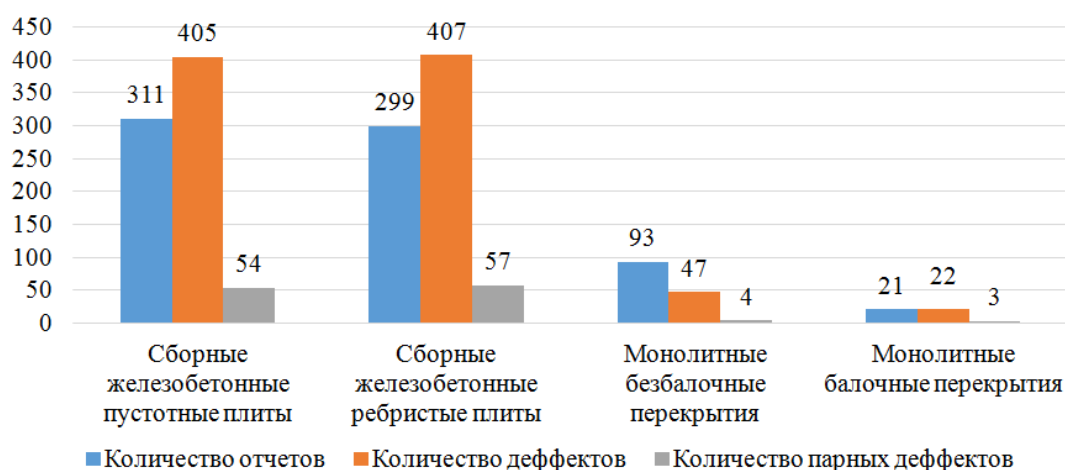


Рисунок 1 – База данных проведенных ранее обследований

Под парным дефектом на рисунке 1 понимается обнаружение на ограниченном участке конструкции двух различных дефектов, влияющих на несущую способность.

Причины, вызвавшие дефекты, проявлялись на всех этапах жизненного цикла объекта – проектирование, возведение, эксплуатация. Дефекты по времени возникновения можно разделить на группы:

- ошибки, допущенные при проектировании;
- несоблюдение нормативных требований при возведении;
- запроектные нагрузки и воздействия;
- деградиционные процессы в бетоне и арматуре (коррозия), ускоряемые климатическими условиями или нарушением эксплуатационных требований;
- нарушение правил эксплуатации.

Характерные дефекты конструкций приведены в таблице 1 по результатам рассмотрения архивных материалов только для сборных железобетонных многопустотных и ребристых плит, учитывая значительно больший объем их применения.

Трещины и отслоения бетона вдоль арматуры железобетонных элементов в абсолютном большинстве случаев являются следствием коррозионного повреждения арматуры. При этом наблюдается нарушение сцепления продольной и поперечной арматуры с бетоном.

Следует отметить, что в отчетах ряд дефектов (замачивание плит, шелушение защитного слоя, трещины в швах), как правило, встречается в области, которая включает несколько плит. Такие дефекты являются массовыми, но при этом они незначительно влияют на несущую способность плит.

В свою очередь, такие дефекты как продольные и поперечные трещины, сколы, разрушение участка бетона и другие, приводятся в отчетах на одну плиту с указанием конкретного дефекта и оказывают прямое влияние на несущую способность конструкций.

С учетом этого суммарный процент дефектов, связанных с коррозией арматуры составил:

- в многопустотных плитах 17 % от всех выявленных дефектов и 48 % от дефектов, оказывающих влияние на несущую способность;
- ребристых плитах 22 % и 44 % соответственно.

Механизм появления коррозии. Скорость развития коррозии в металлической арматуре напрямую зависит от защитных свойств бетона, обеспечивающих сохранность арматуры и долговечность всей железобетонной конструкции, а также от степени агрессивности среды.

Плотность защитного слоя бетона значительно влияет на способность бетона сопротивляться проникновению паров воды и углекислого газа. На защитные свойства бетона также оказывают влияние вид вяжущего, примененные добавки, режим твердения, наличие и ширина раскрытия поперечных трещин.

В процессе карбонизации защитного слоя бетона происходит снижение защитных свойств бетона. Если глубина карбонизации бетонного слоя достигает уровня расположения поверхности арматуры, то это свидетельствует о протекании активных коррозионных процессов в арматуре.

Коррозия арматуры, в зависимости от характера разрушения поверхности и структуры металла, классифицируется по следующим типам (рисунок 2) [4]:

- а) общая или равномерно распределенная по всей поверхности арматуры коррозия;
- б) местная или локальная (пятнами) коррозия, расположенная на отдельных участках поверхности металла;
- в) точечная коррозия (питтинг), сосредоточенная на очень малых участках поверхности с глубоким прониканием;
- г) коррозионное растрескивание в результате разрушения связей между кристаллами.

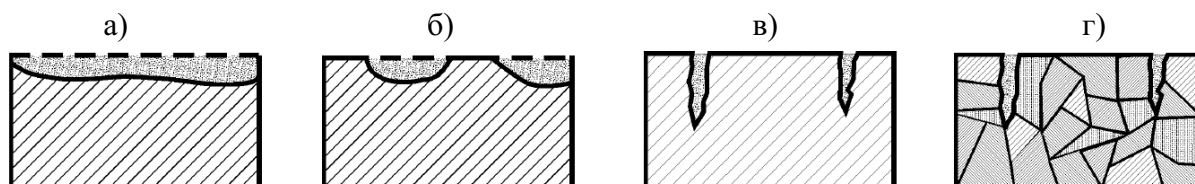


Рисунок 2 – Виды коррозионных повреждений арматурной стали:

а) равномерная коррозия; б) то же местная; в) то же точечная; г) коррозионное растрескивание

Таблица 1 – Характерные дефекты плит

Наименование конструкции	Характерный дефект	Количество выявленных дефектов
Сборные железобетонные пустотные плиты	1. Замачивание плит	126
	2. Трещины в швах или разрушение швов	99
	3. Разрушение бетона защитного слоя	14
	4. Поперечные трещины	23
	5. Трещины, расположенные вдоль рабочей арматуры	13
	6. Шелушение и повреждение облицовочного слоя	36
	7. Скол бетона на глубину, не превышающую защитный слой	6
	8. Разрушение защитного слоя бетона с оголением арматуры	27
	9. Коррозия арматуры	15
	10. Перерезание рабочей арматуры	6
	11. Разрушение участка плиты, отверстие	21
	12. Прочие дефекты	19
Сборные железобетонные ребристые плиты	1. Замачивание плит	125
	2. Трещины в швах или разрушение швов	39
	3. Разрушение бетона защитного слоя	20
	4. Трещины в полках	11
	5. Трещины в ребрах вдоль рабочей арматуры	15
	6. Шелушение и повреждение облицовочного слоя	40
	7. Скол бетона на глубину, не превышающую защитный слой	28
	8. Разрушение защитного слоя бетона с оголением арматуры	52
	9. Коррозия арматуры	22
	10. Перерезание рабочей арматуры	5
	11. Разрушение участка плиты, отверстие	15
	12. Поперечные трещины в ребрах	18
	13. Прогиб плиты превышает допустимый	3
	14. Прочие дефекты	14

Коррозия арматуры сопровождается растрескиванием и/или откалыванием защитного слоя бетона от давления, возникающего в связи с увеличением в 2-2,5 раза объема проржавевшей арматуры.

К дефектам, способствующим развитию коррозионных процессов, относят водопроницаемость бетона, недостаточную толщину защитного слоя бетона и его разрушение, дефекты на бетонной поверхности, повреждение в результате воздействия агрессивных сред, поперечные трещины, оголение арматуры и т.д. Указанные дефекты могут появляться на всех этапах жизненного цикла здания или сооружения. Коррозия может

свидетельствовать об исчерпании несущей способности конструкции и привести к ее обрушению.

Механизм протекания коррозионного процесса во времени можно условно разделить на два этапа (рисунок 3):

1. Начальный период. На данном этапе коррозия стальной арматуры может развиваться незначительно. Продолжительность данного этапа определяется временем карбонизации защитного слоя бетона.

2. Коррозионный период. Этап начинается с момента резкого увеличения скорости коррозии, вплоть до потери конструкцией несущей способности.

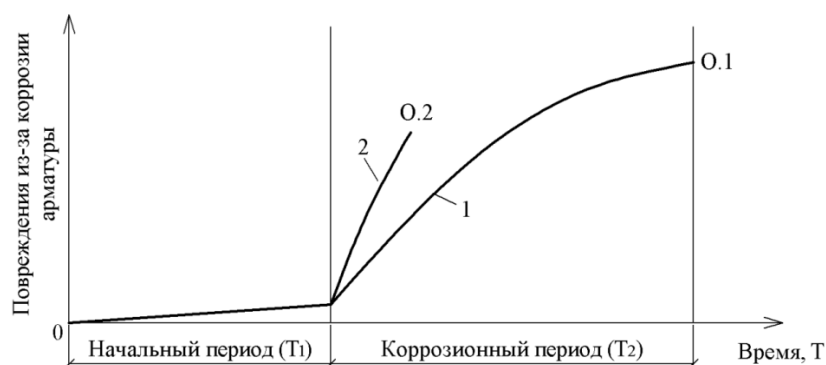


Рисунок 3 – Развитие коррозионных повреждений во времени арматуры с физическим (1) и условным (2) пределом текучести; 0.1 и 0.2 – отказы арматуры

Предпосылки к проведению расчета. Экспериментальных данных о работе железобетонных конструкций на стадии близкой к границе несущей способности первого и второго предельных состояний и за их пределами в настоящее время достаточно мало. Исследователи в проводимых экспериментах на железобетонных конструкциях – изгибаемых и внецентренно-сжатых в большинстве случаев изучали восходящий участок силового сопротивления конструкции. Это оправдано для установления критериев проектирования зданий и сооружений на эксплуатационные нагрузки. В связи со случайным характером значений физико-механических характеристик материалов, действующих нагрузок, условий эксплуатации и т.д. эти параметры для проектирования принимаются с учетом вероятностного разброса и требуемой обеспеченности. Поэтому фактическая несущая способность конструкций, в абсолютном большинстве случаев, выше их расчетного значения.

Сравнение экспериментальных данных, учитывающих работу конструкций в особом предельном состоянии, с теоретическими, полученными на базе расчетов, выполненных по нормативным документам, показали, что в железобетонных конструкциях имеются резервы по прочности до 30%, а по деформативности до 50 % [5-8].

Расчетное обоснование критериев оценки технического состояния строительных конструкций основано на исследовании влияния дефекта на процесс снижения несущей способности. В результате расчетов можно получить зависимость коэффициента снижения несущей способности от параметра дефекта.

Под «параметром дефекта» подразумевается величина, характеризующая размер дефекта, которая:

- может быть выражена численно;
- свидетельствует о размере дефекта;
- измеряется при визуальном обследовании.

Например: ширина раскрытия трещины (в мм); потеря сечения арматуры вследствие коррозии (в %).

В соответствии с СП 63.13330 условием обеспечения прочности железобетонных конструкций является отсутствие превышений усилий и деформаций в рассматриваемом сечении соответствующих нормируемым значениям от внешнего воздействия. При этом условие прочности для нормальных сечений можно записать в виде (1)

$$\varepsilon \leq \varepsilon_{ult}, \quad (1)$$

а условие прочности наклонных и пространственных сечений (2) –

$$F \leq F_{ult}, \quad (2)$$

где ε и F – относительная деформация сжатого бетона или растянутой арматуры и усилие, возникающие в рассматриваемом сечении от внешней нагрузки; ε_{ult} и F_{ult} – предельное значение относительной деформации сжатого бетона или растянутой арматуры и усилия в том же сечении.

В общем случае задача состоит в определении усилий или деформаций от внешних воздействий и их предельных значений, допускаемых в рассматриваемом сечении, которая решается путём комплексного расчета на статические и/или динамические нагрузки, температурно-влажностные воздействия и т.п.

Основной расчетной моделью для определения деформаций и напряжений в нормальных сечениях в СП 63.13330 является нелинейная деформационная модель. Однако, для стандартных сечений допускается выполнять расчет по методу предельных усилий [9]

Проведенные сравнительные расчеты железобетонного изгибаемого элемента по нелинейной деформационной модели и по предельным усилиям [10-12] показали, что разница в несущей способности составляет, как правило, не более 5%.

В связи с этим было принято решение выполнять расчеты по методу предельных усилий. В качестве основного показателя был принят коэффициент снижения несущей способности по предельному моменту сечения (несущей способности).

Для установления границы перехода строительных конструкций с дефектами из работоспособного состояния в ограниченно-работоспособное и из ограниченно-работоспособного в аварийное с учетом закладываемых при проектировании запасов несущей способности были приняты следующие параметры для оценки технического состояний конструкций:

- коэффициент снижения несущей способности сечения по предельному моменту для ограниченно-работоспособного состояния – 0,9; по второй группе предельных состояний – 0,8.
- коэффициент снижения несущей способности сечения по предельному моменту для аварийного состояния – 0,75; по второй группе предельных состояний – 0,65.

Обоснование подобного подхода приведено в статье [13].

Результаты исследования и их анализ

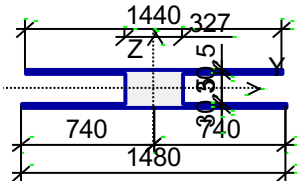
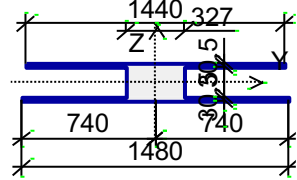
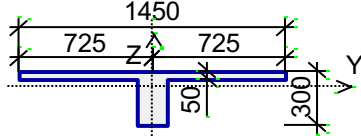
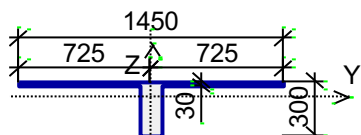
Для разработки критериев оценки технического состояния железобетонных плит в результате коррозии были выполнены расчеты с уменьшением площади сечения рабочей арматуры на 5-30%. В таблице 2 приведены расчетные схемы железобетонных плит.

Коррозия арматуры в плитах приводит к значительному снижению несущей способности. Для анализа результатов расчетов построены графические зависимости коэффициентов снижения несущей способности плит от коррозии арматуры (рисунок 4).

Анализ данных позволяет оценить влияние коррозии арматуры на несущую способность и аппроксимировать его полиномиальной функцией второго порядка, показанной на графике. Аппроксимация на значительном диапазоне коэффициентов снижения несущей способности позволяет прогнозировать зависимость на всем диапазоне возможных значений. В то же время на графиках показаны линии пересечения с коэффициентами снижения несущей способности 0,9 и 0,8. Расчетная величина критерия коррозии арматуры была принята по среднему значению коэффициента снижения несущей способности:

- для ограниченно-работоспособного состояния – 11 % коррозии;
- для аварийного состояния – 28 % коррозии.

Таблица 2 – Расчетные схемы плит

Тип конструкции	Расчетная сечения плиты, мм
Сборная многопустотная плита 3х1,5 м (арматура А400, бетон В20)	
Сборная многопустотная плита 6х1,5 м (арматура А600, бетон В20)	
Сборная ребристая плита перекрытия 5,65х1,5 м (арматура А600, бетон В20)	
Сборная ребристая плита покрытия 6х1,5 м (арматура А600, бетон В20)	

Примечание: Арматура А600 использовалась без предварительного напряжения.

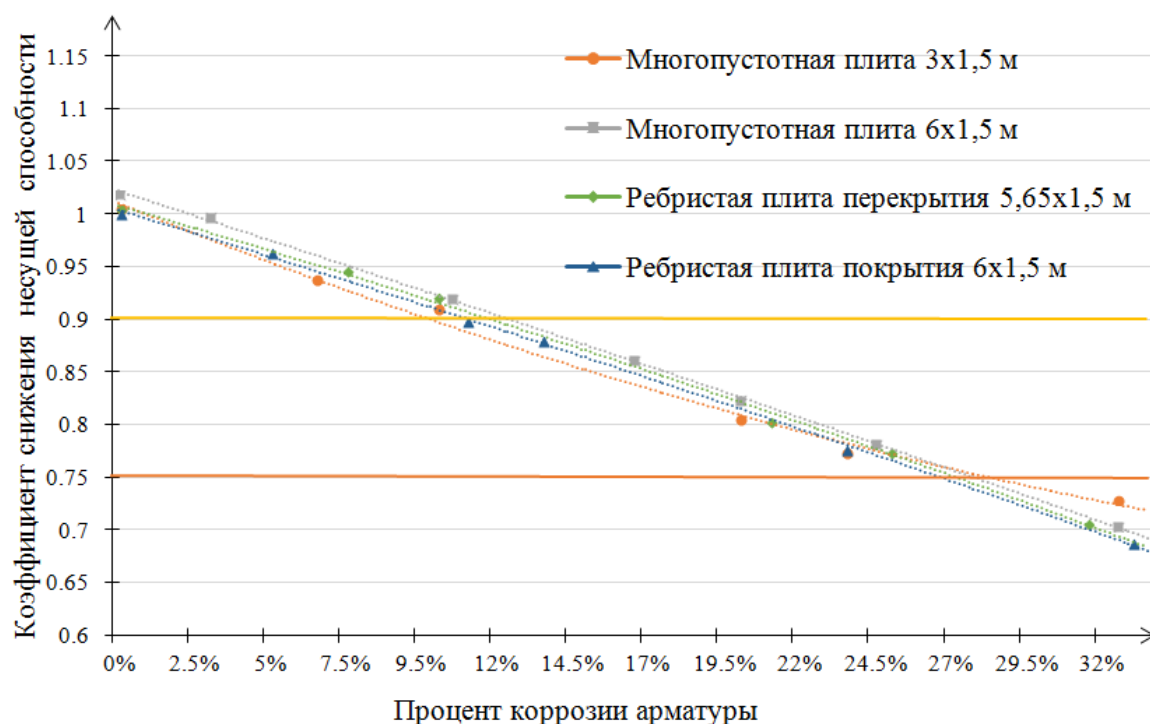


Рисунок 4 - График коэффициента снижения несущей способности

В дополнение к расчетам были проанализированы результаты экспериментальных исследований, приведенные в работе [14]. В рамках данных исследований был выполнен анализ влияния дефектов, связанных с коррозией арматуры (наличие продольных трещин и

отслоения защитного слоя бетона), на снижение прочности и увеличения деформативности в железобетонных конструкциях на примере сборных ребристых плит покрытия [15].

В рамках исследований было испытано шесть ребристых плит покрытия по серии ПК-01-106 (размеры плиты 6×1,5 м), изготовленных в 1970-х годах. Пять плит имели характерные дефекты, еще одна была контрольной – без дефектов. Плиты предварительно были демонтированы с покрытия здания. Детальное инструментальное обследование плит показало соответствие отобранных плит чертежам серии, также были определены прочностные характеристики бетона и арматуры.

Во время испытаний характер развития деформаций арматуры и бетона соответствовал обычному для изгибаемых элементов, не имеющих или имеющих частичное сцепление арматуры с бетоном. Результаты испытаний плит приведены в таблице 3.

Также в работе в результате регрессионного анализа были получены линейные зависимости, позволяющие оценить влияние дефектов, связанных с коррозией арматуры, на несущую способность по следующим показателям:

- суммарная длина продольной трещины $L_{тр}$;
- суммарная длина зоны обрушения защитного слоя $L_{обр}$.

Нарушение сцепления бетона и арматуры в плитах покрытия предлагалось учитывать введением понижающего коэффициента (3)

$$k_p = 1 - 0,0035 L_{тр} - 0,0656 L_{обр}. \quad (3)$$

При данном подходе фактическая несущая способность плиты будет определена умножением несущей способности, найденной по действующим нормативным документам с остаточным армированием (без учета нарушения сцепления) на понижающий коэффициент k_p (4):

$$P_{факт} = P \cdot k_p. \quad (4)$$

Таблица 3 - Результаты испытаний плит по данным [14]

Плита	Суммарная длина трещин с шириной раскрытия от 0,3мм, м	Суммарная длина зоны обрушения защитного слоя бетона, м	Продольные трещины доходят до опор	Разрушающая нагрузка по результатам испытаний, кН/м2	Коэффициент снижения несущей способности	Прогиб плиты при норм. нагрузке (5 этап $P_f=4,14$ кН/м2), мм	Коэффициент увеличения прогиба
П1	6,1	2,7	нет	6,94	0,90	10,89	1,80
П2	5	2,2	нет	6,63	0,86	10,30	1,70
П3	7	2,1	нет	6,84	0,88	9,77	1,61
П4	7,2	2,6	да	6,45	0,83	13,42	2,22
П5 (контрольная)	0	0	нет	7,75	1,00	6,03	1,00
П6	8,6	3	нет	5,81	0,75	13,80	2,29

Данные экспериментальных исследований подтверждают необходимость дополнительного учета нарушения сцепления бетона и арматуры, т.к. даже незначительная толщина продуктов коррозии приводит к дополнительному снижению несущей способности железобетонных конструкций.

В таблице 4 приведены в качестве сравнения критерии оценки технического состояния плит по СП 454.1325800.2019 «Здания жилые многоквартирные. Правила оценки аварийного и ограниченно-работоспособного технического состояния» и методике оценки остаточного ресурса по внешним признакам [16].

Таблица 4 - Сравнительные критерии технического состояния плит

Категория технического состояния	Критерий по СП 454.1325800.2019:		Критерий по методике оценки остаточного ресурса по внешним признакам [10]
	Отслоение защитного слоя бетона и механические повреждения в растянутой зоне, с оголением арматуры	Уменьшение из-за коррозии площади сечения арматуры при разрушении защитного бетонного слоя	
Ограниченно-работоспособное состояние	До 30 % длины растянутой зоны	До 15 % площади сечения	Продольные трещины в бетоне вдоль арматурных стержней от коррозии арматуры. Коррозия арматуры до 10-15%. Отделение защитного слоя бетона и оголение арматуры.
Аварийное состояние	Более 30 % длины растянутой зоны	Более 15 % площади сечения	Оголение всего диаметра арматуры стержня. Коррозия арматуры более 15% сечения.

На основе проведенного расчетного анализа влияния коррозии арматуры на несущую способность, оценки влияния продуктов коррозии на образование продольных трещин, экспериментальных исследований, а также данных в нормативных документах, в таблице 5 приведены предлагаемые критерии для определения категории технического состояния железобетонных плит в результате коррозии арматуры.

Таблица 5 - Предлагаемые критерии технического состояния плит

Дефект	Критерии оценки технического состояния	Категория технического состояния	
		Ограниченно-работоспособное	Аварийное
1	2	3	4
Трещины, образовавшиеся вследствие коррозии рабочей арматуры	Визуальные признаки	Продольные трещины в бетоне вдоль арматурных стержней от коррозии арматуры на участке элемента шириной раскрытия 1,5-3,0 мм. Коррозия арматуры до 12%. Отделение защитного слоя бетона и оголение части поверхности стержня	Коррозия арматуры до 25%. Продольные трещины в бетоне вдоль арматурных стержней от коррозии арматуры на участке элемента шириной раскрытия более 3,0 мм. Оголение всего диаметра стержня

Выводы

1. В ГОСТ 31937 отсутствуют количественные значения критериев дефектов, по которым можно назначить категорию технического состояния конструкций при визуальном обследовании, в том числе при коррозии арматуры.

2. С целью выявления частоты появления дефектов, связанных с коррозией арматуры в железобетонных плитах зданий и сооружений, а также определения причин их возникновения были рассмотрены 738 архивных отчетов АО «ЦНИИПромзданий» по обследованию.

3. Отмечено, что коррозия арматуры сопровождается растрескиванием и/или откалыванием защитного слоя бетона от давления, возникающего в связи с увеличением в 2-2,5 раза объема прокорродированной арматуры.

4. С целью разработки критериев для определения категории технического состояния железобетонных плит в результате коррозии были выполнены расчеты с уменьшением площади сечения рабочей арматуры на 5-30%.

5. Данные экспериментальных исследований подтверждают необходимость дополнительного учета нарушения сцепления бетона и арматуры, т.к. даже незначительная толщина продуктов коррозии приводит к дополнительному снижению несущей способности железобетонных конструкций.

6. Разработаны критерии для определения категории технического состояния железобетонных плит с дефектами, полученными в результате коррозии арматуры на основании проведенного расчетного анализа влияния коррозии арматуры на несущую способность, оценки влияния продуктов коррозии на образование продольных трещин, экспериментальных исследований, а также требований нормативных документов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карпенко Н.И., Карпенко С.Н., Ярмаковский В.Н., Ерофеев В.Т. О современных методах обеспечения долговечности железобетонных конструкций // Academia. Архитектура и строительство. 2015. № 1. С. 93-102.
2. Тамразян А.Г. Вероятностный метод расчета долговечности железобетонных конструкций, подверженных воздействию хлоридов // В сборнике трудов конференции «Актуальные проблемы строительной отрасли и образования – 2021». М.: НИУ МГСУ. С. 100-106.
3. Фаликман В.Р., Степанова В.Ф. Нормативные сроки службы бетонных и железобетонных конструкций и принципы их проектирования по параметрам долговечности // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 6. С. 13-22.
4. Чирков В.П. Прикладные методы теории надежности в расчетах строительных конструкций. М.: Маршрут, 2006. 620 с.
5. Кодыш Э.Н. Проектирование защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения с учетом возникновения особого предельного состояния // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 10. С. 95-101.
6. Трекин Н.Н., Кодыш Э.Н. Особое предельное состояние железобетонных конструкций и его нормирование // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 5. С. 4-9.
7. Trekin N.N., Kodysh E.N., Shmakov S.D., Terekhov I.A., Kudyakov K.L. Determination of the criteria of deformation in a special limiting state // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2021. Vol 1. Pp. 108-116. URL:<https://ijccse.iasv.ru/index.php/ijccse/issue/view/51/62> (eng)
8. Trekin N, Kodysh E., Bybka A., Terekhov I. Structural design taking into account the occurrence of a special limit state // Innovations technologies in science and practice. Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference. Haifa, Israel. 2022. Pp. 21-24. URL:<https://isg-konf.com/ru/innovations-technologies-in-science-and-practice-ru> (eng)
9. Гранев В.В., Кодыш Э.Н., Трекин Н.Н., Терехов И.А., Еремин К.И., Шмаков Д.С. Проектирование сборных железобетонных конструкций каркасных зданий: новый свод правил // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 4. С. 4-9.
10. Карпенко Н.И., Соколов Б.С., Райдакин О.В. К расчету прочности, жесткости и трещиностойкости внецентренно сжатых железобетонных элементов с применением нелинейной деформационной модели // Известия КГАСУ. 2013. № 4 (26). С. 113-120.
11. Opbul E., Dmitriev D., Van Phuc Ph. Practical calculation of flexible members with the use of non-linear deformation model as exemplified by typical girder RGD 4.56-90 // Architecture and Engineering. 2018. Vol. 3. No. 3. Pp. 29-41. (eng)
12. Левин В.М., Юрова В.С., Севостьянов Н.А. Сравнение результатов расчета прямоугольного сечения железобетонного элемента нелинейным деформационным методом и по предельным усилиям // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2019. № 4 (138). С. 19-22.
13. Ефремов А.М., Бойко Д.В., Сергеевцев Е.Ю., Трекин Н.Н., Кодыш Э.Н., Терехов И.А., Шмаков С.Д. Учет совместного влияния дефектов на несущую способность конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 8. С. 11-18.

14. Чаганов А.Б. Прочность и жесткость железобетонных ребристых плит с нарушением сцепления арматуры с бетоном: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Чаганов Алексей Борисович М., 2008. 24 с.
15. Рожин Д.Н., Чаганов А.Б. Влияние коррозионных повреждений на состояние железобетонных элементов реконструируемых зданий и сооружений // Сборник Всероссийской ежегодной научно-технической конференции «Наука-производство-технология-экология», том 5. Киров: ВятГУ, 2007. С. 254-256.
16. Методика оценки остаточного ресурса несущих конструкций зданий и сооружений [Электронный ресурс]. ФАУ «ФЦС», 2018. 50 с. https://www.faucc.ru/upload/methodical_materials/mp34_2018.pdf (дата обращения: 07.10.2022).

REFERENCES

1. Karpenko N.I., Karpenko S.N., Yarmakovsky V.N., Erofeev V.T. O sovremennykh metodah obespecheniya dolgovechnosti zhelezobetonnykh konstruktsiy [The modern methods of ensuring of reinforced concrete structures durability] // Academia. Arhitektura i stroitel'stvo. 2015. No. 1. Pp. 93-102. (in rus)
2. Tamrazyan A.G. Veroyatnostnyy metod rascheta dolgovechnosti zhelezobetonnykh konstruktsiy, podverzhennykh vozdeystviyu hloridov [Probabilistic method for calculating the durability of reinforced concrete structures exposed to chlorides] V sbornike trudov konferentsii «Aktual'nye problemy stroitel'noy otrasli i obrazovaniya [In the proceedings of the conference "Actual problems of the construction industry and education – 2021]. Moscow: NRU MGSU. Pp. 100-106. (in rus)
3. Falikman V.R., Stepanova V.F. Normativnye sroki sluzhby betonnykh i zhelezobetonnykh konstruktsiy i principy ih proektirovaniya po parametram dolgovechnosti [Normative service life of concrete and reinforced concrete structures and principles of their design based on durability parameters] // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2019. No. 6. Pp. 13-22. (in rus)
4. Chirkov V.P. Prikladnye metody teorii nadezhnosti v raschetakh stroitel'nykh konstruktsiy [Applied Methods of the Theory of Reliability in the Calculations of Building Structures]. Moscow: Marshrut, 2006. 620 p. (in rus)
5. Kodysh E.N. Proektirovanie zashchity zdaniy i sooruzheniy ot progressiruyushchego obrusheniya s uchedom vozniknoveniya osobogo predel'nogo sostoyaniya [Designing the protection of buildings and structures against progressive collapse in view of the emergence of a special limiting state] // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2018. No. 10. P. 95-101. (in rus)
6. Trekin N.N., Kodysh E.N. Osoboe predel'noe sostoyanie zhelezobetonnykh konstruktsiy i ego normirovanie [Special limit condition of reinforced concrete structures and its normalization] // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2020. No. 5. Pp. 4–9. (in rus)
7. Trekin N.N., Kodysh E.N., Shmakov S.D., Terekhov I.A., Kudyakov K.L. Determination of the criteria of deformation in a special limiting state // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2021. Vol 1. Pp. 108-116. URL:<https://ijccse.iasv.ru/index.php/ijccse/issue/view/51/62>
8. Trekin N., Kodysh E., Bybka A., Terekhov I. Structural design taking into account the occurrence of a special limit state // Innovations technologies in science and practice. Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference. Haifa, Israel. 2022. Pp. 21-24. URL:<https://isg-konf.com/ru/innovations-technologies-in-science-and-practice-ru>
9. Granev V.V., Kodysh E.N., Trekin N.N., Terekhov I.A., Eremin K.I., Shmakov D.S. Proektirovanie sbornykh zhelezobetonnykh konstruktsiy karkasnykh zdaniy: novyy svod pravil [Designing precast reinforced concrete structures of frame buildings: a new set of rules] // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2019. No. 4. Pp. 4-9. (in rus)
10. Karpenko N.I., Sokolov B.S., Raidakin O.V. K raschetu prochnosti, zhestkosti i treshhinostojkosti vnecentrenno szhatykh zhelezobetonnykh jelementov s primeneniem nelineynoy deformatsionnoy modeli [Calculation of strength, stiffness and crack resistance of eccentrically compressed reinforced concrete elements using non-linear deformation model] // Izvestiya KGASU. 2013. No. 4 (26). Pp. 113-120. (in rus)
11. Opbul E., Dmitriev D., Van Phuc Ph. Practical calculation of flexible members with the use of non-linear deformation model as exemplified by typical girder RGD 4.56-90 // Architecture and Engineering. 2018. Vol. 3. № 3. Pp. 29-41.
12. Levin V.M., Yurova V.S., Sevostyanov N.A. Sravnenie rezul'tatov rascheta prjamougol'nogo secheniya zhelezobetonnoy jelementa nelineynym deformatsionnym metodom i po predel'nykh usiliyam [Comparison of results of calculation of rectangular section of reinforced concrete element by nonlinear deformation method and with ultimate forces] // Bulletin of the Donbass National Academy of Construction and Architecture. 2019. No. 4 (138). Pp. 19-22. (in rus)
13. Efremov A.M., Boyko D.V., Sergeevtsev E.Yu., Trekin N.N., Kodysh E.N., Terekhov I.A., Shmakov S.D. Uchet sovместного vliyaniya defektov na nesushchuyu sposobnost' konstruktsiy [Taking into account the joint effect of defects on the bearing capacity of structures] // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2022. No. 8. Pp. 11–18. (in rus)

14. Chaganov A.B. Prochnost' i zhestkost' zhelezobetonnyh rebristyh plit s narusheniem scepleniya armatury s betonom [Strength and rigidity of reinforced concrete ribbed slabs with a violation of the adhesion of reinforcement to concrete]: author. diss. ... cand. tech. Sciences: 05.23.01 / Chaganov Aleksey Borisovich. Moscow. 2008. 24 p. (in rus)
15. Rozhin D.N., Chaganov A.B. Vliyanie korrozionnyh povrezhdenij na sostojanie zhelezobetonnyh jelementov rekonstruiemyh zdaniy i sooruzhenij [Influence of corrosion damage on the state of reinforced concrete elements of reconstructed buildings and structures] Sbornik Vserossijskoj ezhegodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Nauka-proizvodstvo-tehnologija-jekologija», tom 5 [Collection of the All-Russian annual scientific and technical conference "Science-Production-Technology-Ecology", Volume 5]. Kirov: VyatGU, 2007. Pp. 254-256. (in rus)
16. Metodika ocenki ostatocnogo resursa nesushhih konstrukcij zdaniy i sooruzhenij [Methodology for assessing the residual resource of the supporting structures of buildings and structures] [Online]. FAU "FTsS", 2018. 50 p. URL: https://www.faufcc.ru/upload/methodical_materials/mp34_2018.pdf (date of application: 07.10.2022). (in rus)

Информация об авторе:

Терехов Иван Александрович

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», г. Москва, Россия,
кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций, зданий и сооружений.
E-mail: terekhov-i@mail.ru

Information about author:

Terekhov Ivan Al.

Russian University of Transport, Moscow, Russia,
candidate of technical science, associated professor of the department of building constructures, buildings and structures.
E-mail: terekhov-i@mail.ru