

На правах рукописи



Афонин Павел Алексеевич

**РЕСУРС СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СКЛАДЧАТЫХ ПОКРЫТИЙ**

05.23.01 – Строительные конструкции,
здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Орел – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»

Научный руководитель: **Осовских Евгений Васильевич**
кандидат технических наук, доцент,
Орловский академцентр РААСН

Официальные оппоненты: **Тамразян Ашот Георгиевич**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет», профессор кафедры «Железобетонные и каменные конструкции»

Ступишин Леонид Юлианович
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет», зав. кафедрой «Городское, дорожное строительство и строительная механика»

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Брянская государственная инженерно-технологическая академия»

Защита состоится «27» декабря в 13-00 часов на заседании диссертационного Совета Д 212.182.05, созданного на базе ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК» по адресу: 302030, г. Орел, ул. Московская, 77, ауд. 426.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК» по адресу: 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, д. 29.

Автореферат разослан « 26 » ноября 2013г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета



А.И. Никулин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Решение проблемы конструктивной безопасности сооружений при их длительной эксплуатации выходит за рамки традиционных представлений о предельных состояниях первой и второй групп. Подтверждением этому является и то, что в принятом федеральном законе от 30.12.2009 N 384-ФЗ "Технический регламент о безопасности зданий и сооружений" одним из требований обеспечения безопасности зданий и сооружений при проектировании и строительстве является учет опасных процессов и явлений, создающих угрозу причинения вреда жизни или здоровью людей. А это значит, что, по существу, вводится новая критериальная оценка конструктивной безопасности – определение ресурса силового и средового сопротивления конструкций при проектных и запроектных воздействиях. Под термином «остаточный ресурс» конструкции здесь и далее понимаются сохранившиеся после длительной эксплуатации количественные значения параметров первой и второй групп (прочность, трещиностойкость, жесткость) в условиях силовых и средовых воздействий.

Для пространственных конструкций решение задач, связанных с оценкой ресурса сопротивления носит пока лишь постановочный характер. В то же время, пространственные конструкции, например, такие как железобетонные призматические складчатые покрытия (призматические складки), занимают значительные площади эксплуатируемых производственных и общественных зданий. Их объем составляет порядка 10 процентов всех покрытий производственных зданий страны, а срок службы отдельных объектов превышает 30 – 40 лет и более. Развитие исследований таких конструкций в предельных и запредельных состояниях при силовых и средовых воздействиях позволит продлевать безопасный ресурс их эксплуатации. Кроме того, для проблемы износа эксплуатируемых и новых сборных железобетонных покрытий одноэтажных производственных зданий с плитами и фермами, может быть получено решение по их реконструкции путем преобразования таких покрытий в пространственную призматическую складку.

В этой связи возникает необходимость исследования ресурса сопротивления таких конструктивных систем и развитие методики их расчета как конструкций с нелинейной работой материалов и с учетом силовых и средовых воздействий.

Цель работы – исследование ресурса силового и средового сопротивления эксплуатируемых железобетонных складчатых пространственных конструкций покрытий с учетом коррозионных повреждений, неупругого деформирования и трещинообразования.

Научную новизну работы составляют:

- методика испытаний и опытные данные о характере нелинейного деформирования коррозионно-поврежденных складок в предельных и запредельных состояниях;

- расчетная модель и методика нелинейного расчета остаточного ресурса эксплуатируемых железобетонных складчатых пространственных систем при одновременном проявлении силовых и средовых воздействий;

- алгоритм расчета и результаты численных исследований остаточного ресурса железобетонных складчатых покрытий в предельных и запредельных состояниях.

Автор защищает:

- методику испытаний и новые экспериментальные данные о деформировании и ресурсе сопротивления железобетонных призматических складчатых покрытий имеющих износ и повреждения;

- расчетную модель, методику и алгоритм нелинейного расчета железобетонных призматических складчатых систем в предельных и запредельных состояниях при одновременном проявлении силовых и средовых воздействий;

- рекомендации по оценке остаточного ресурса эксплуатируемых коррозионно поврежденных железобетонных складчатых конструкций покрытий.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов основывается на использовании базовых положений и гипотез строительной механики и механики железобетона, результатах проведенных автором экспериментальных и численных исследований эксплуатируемых коррозионно повреждаемых железобетонных призматических складчатых покрытий, а также апробацией нелинейного расчетного аппарата в практике проектирования реальных объектов.

Практическое значение и реализация результатов работы

Предложенные расчетные модели, методика и алгоритм расчёта позволяют анализировать нелинейную работу эксплуатируемых железобетонных призматических складчатых покрытий при силовых и средовых воздействиях, и оценивать их ресурс силового сопротивления при реконструкции и усилении. Реализация предложенной методики и алгоритма расчета при решении проектных задач реконструируемых сборных железобетонных конструкций покрытий производственных и общественных зданий, позволяет обосновано принимать решения по оценке их несущей способности, продлению сроков эксплуатации и защите от прогрессирующих обрушений.

Результаты проведенных исследований применены Орловским академцентром РААСН при расчете реконструируемого складчатого покрытия спортзала Юго-Западного Государственного Университета (г. Курск) и

усиления железобетонных конструкций покрытия производственного цеха ЖБИ ДООО ОЗ «Орелагропромстрой». Результаты работы внедрены также в учебный процесс Госуниверситета-УНПК (г. Орёл) и Юго-Западного Государственного Университета (г. Курск), при выполнении магистерских диссертаций по строительным специальностям.

Апробация работы и публикации

Основные положения диссертации доложены и одобрены на Международной научно-методической конференции «Железобетонные конструкции: исследования, проектирование, методика преподавания», посвященной 100-летию со дня рождения В.Н. Байкова (5 апреля, 2012 г., г. Москва, МГСУ), на Международном Научном семинаре «Перспективы развития программных комплексов для расчета несущих систем зданий и сооружений» (19 сентября 2013 г., г. Курск, ЮЗГУ), на VII Всероссийской конференции обучающихся «Национальное достояние России» - НС «Интеграция» (28 марта 2013 г., г. Москва, Управление делами Президента РФ «Непецино»)

В полном объеме работа рассмотрена и одобрена на расширенном заседании кафедры «Строительные конструкции и материалы» ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК» (г. Орел, июль 2013 г.).

По теме диссертации опубликовано 5 научных работ, из которых 4 работы опубликованы в изданиях, рекомендуемых ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения с основными выводами, списка литературы и приложений. Работа изложена на 180 страницах, включающих 134 страницы основного текста, 58 рисунков, 11 таблиц, списка литературы из 187 наименований и 3 приложения (26 стр.).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность исследований по рассматриваемой проблеме, приведены общая характеристика диссертационной работы и основные положения, которые автор выносит на защиту.

В первой главе приведен обзор и анализ современного состояния вопроса конструктивной безопасности железобетонных пространственных конструкций покрытий эксплуатируемых производственных и общественных зданий, выполнен анализ направлений развития методов расчета цилиндрических оболочек и призматических складок в отечественных и зарубежных исследованиях, а также обоснование направления и темы выбранного исследования.

Анализ аварий зданий и сооружений последних двух десятилетий свидетельствует, что, несмотря на то, что в тонкостенных пространственных

конструкциях, являющихся статически неопределимыми (степень их статической неопределимости стремится к бесконечности), опасность локального и прогрессирующего разрушения конструктивной системы, по сравнению со стержневыми и плоскостными системами, в принципе снижается, но не исключается. Пространственные конструкции, например, такие как железобетонные складчатые покрытия, и, особенно, сборные железобетонные покрытия призматического и цилиндрического очертания занимают значительные площади эксплуатируемых производственных и общественных зданий страны. В связи с этим, необходимость оценки их конструктивной безопасности, остаточного ресурса и, особенно, хрупких разрушений локальных зон тонкостенных железобетонных конструкций от проектных и запроектных воздействий, требует новых подходов к анализу их деформирования и разрушения как физически и конструктивно нелинейных систем. Все это открывает новое направление теоретических и экспериментальных исследований и, в частности, анализа остаточного ресурса сопротивления таких конструкций после запроектных воздействий.

В отечественных исследованиях в области упругого расчета пространственных конструкций можно выделить работы В.З. Власова, П.Л. Пастернака, В.В. Новожилова и др. Применительно к железобетонным конструкциям вариационный метод В.З. Власова получил последующее развитие в работах И.Е. Милейковского, В.И. Колчунова, А.В. Шевченко, Н.П. Абовского, Е.В. Осовских, Л.А. Панченко, в которых в частности рассматриваются вопросы трещинообразования в железобетонных цилиндрических оболочках и призматических складках.

Современное развитие теории расчета цилиндрических и призматических оболочек за рубежом (в США, Индии, Европейских и других странах), помимо использования компьютерных технологий расчета с помощью МКЭ, чаще всего основано на методе Винтера (G. Winter) и Пеи (M. Pei) учитывающем краевые перемещения. Основанные на теории Винтера и Пеи многочисленные корректирующие методы расчета в данной области можно классифицировать как аналитические методы и полуаналитические итерационные техники расчета призматических оболочек.

В последние годы на фоне возрастающих требований к конструктивной безопасности при проектировании, строительстве и реконструкции вводится новая критериальная оценка конструктивной безопасности – остаточный ресурс несущих конструкций сооружений при проектных и запроектных воздействиях. Для пространственных конструкций рассматриваемого типа решение задач конструктивной безопасности в таком направлении носит пока лишь постановочный характер. К одному из первых экспериментально-теоретических исследований в этом направлении, для тонкостенных конструкций в виде призматических складчатых систем из сбор-

ных железобетонных индустриальных элементов, можно отнести работы К.П. Пятикрестовского, Е.В. Осовских, В.И. Колчунова, Х.З. Баширова и др.

В заключительной части главы приведен анализ-обоснование целесообразности решения сформулированной задачи по рассматриваемой проблеме на основе комбинации вариационного метода В.З. Власова и современных физических моделей сопротивления железобетона в итерационной постановке. Показано, что такой подход не только обеспечивает снижение трудоемкости расчета физически и конструктивно нелинейных систем из железобетона, но и главное – обеспечивают обзорность и возможность инженерного анализа полученных таким образом решений.

Вторая глава диссертации посвящена построению расчетных зависимостей для оценки силового и среднего сопротивления эксплуатируемых железобетонных призматических складчатых покрытий.

В основу расчета положен вариационный метод В.З. Власова в сочетании с физическими моделями деформирования железобетона с трещинами и методом итераций для раскрытия физической нелинейности.

При разработке расчетного аппарата принята во внимание необходимость учета не только нелинейности деформирования конструкций и наличия трещин, но и влияния средовых воздействий, связанных с длительной эксплуатацией и (или) неблагоприятными условиями.

Основная система при использовании смешанного метода выбрана в виде складчатой системы с внешними непрерывными продольными связями, расположенными вдоль всех промежуточных ребер и наружных продольных ребер и цилиндрическими шарнирами, допускающими взаимное смещение смежных граней в промежуточных ребрах (рис. 1). Напряженное состояние в призматической складке средней длины характеризуется нормальными и сдвигающими осевыми силами N , N_l , S и поперечными изгибающими моментами M .

При построении расчетных зависимостей сохранена традиционная для технической теории расчета упругих оболочек гипотеза о нерастяжимости поперечного контура складки $\varepsilon_l = 0$. Гипотеза об отсутствии деформаций сдвига не вводится $\gamma \neq 0$. Внешняя равномерно распределенная нагрузка приведена к полосовой нагрузке вдоль ребер и учитывается своими составляющими в плоскостях соответствующих граней.

На всех этапах деформирования рассматривается жесткая физически нелинейная система. При этом сохраняется первоначальная геометрия складчатой квазиплоской системы, а образование трещин моделируется некоторой приведенной толщиной с использованием коэффициентов приведения ψ_R (А.Б. Голышев, Вл. И. Колчунов)

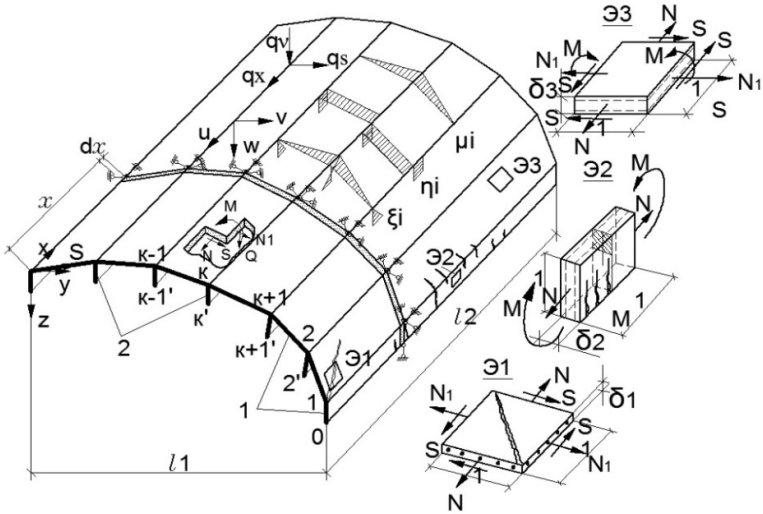


Рисунок 1 – Расчетная схема железобетонной складки с характерными трещинами: 1 – основные грани, 2 – дополнительные грани

Для учета специфики нелинейного деформирования изгибаемых и плосконапряженных железобетонных элементов с трещинами (см. рис. 1, элементы Э1 и Э2) используются деформационные зависимости теории Н.И. Карпенко. Совместное проявление силового и средового повреждения конструкций складчатой системы оценивается с помощью характерных элементов Э1* и Э2*, которые, в отличие от элементов первоначально запроектированной конструкции - Э1 и Э2, имеют коррозионные повреждения.

Расчет глубины коррозионного повреждения характерного элемента $(\delta - \delta^*)/2$ (где δ^* - приведенная толщина характерного элемента Э1* на заданном уровне нагрузки с учетом накопленных повреждений во времени) выполняется с помощью функции траектории повреждений k , предложенной в работах В.М. Бондаренко, и, соответственно, путем корректировки призмической прочности поврежденного бетона (рис. 2). При этом, в случае вертикального расположения фронта коррозии характерного элемента Э2* расположенного в ребрах складчатой системы, изменяется высота сжатой зоны бетона, которая учитывается аналогичным образом, но вместо параметра δ^* используется параметр x^* , где x^* - приведенная высота сжатой зоны бетона поврежденного коррозией ребра.

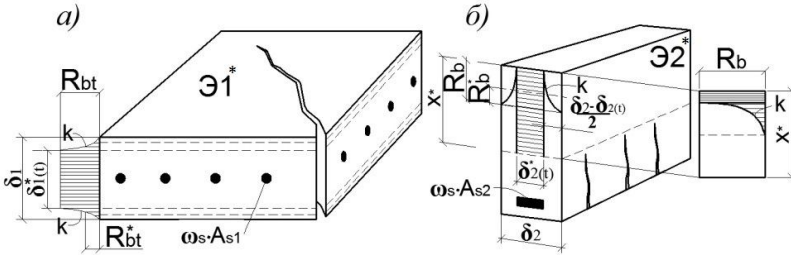


Рисунок 2 – К учету коррозионных повреждений бетона и арматуры в характерных элементах Э1* (а) и Э2* (б) граней призматической складки

Представленная физическая модель силового и среднего сопротивления элементов Э1* и Э2* используется на каждой итерации деформационного расчета и на ее основе вычисляются соответствующие коэффициенты уравнений (жесткостные характеристики элементов складчатой системы).

В соответствии с принятыми гипотезами статическая часть задачи (уравнения равновесия) на каждой итерации, для бесконечно малого элемента рассматриваемой складки, записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} \partial N_1 / \partial x + \partial S / \partial s + q_x &= 0; \\ \partial S / \partial x + \partial N / \partial s - K \partial M / \partial s + q_s &= 0; \\ KN + \partial^2 M / \partial s^2 + q_v &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где K – кривизна по координате s , $q_x = q_x(x, s)$, $q_s = q_s(x, s)$, $q_v = q_v(x, s)$ – компоненты вектора интенсивности внешней нагрузки; N , S , M – усилия и изгибающие моменты в элементах складчатой системы (см. рис. 1).

Приведение двумерной задачи расчета рассматриваемых тонкостенных систем к одномерной выполнено представлением компонент вектора перемещений $U=U(x, s)$, $V=V(x, s)$, $W=W(x, s)$ в форме разложений в следующие однарные ряды:

$$\begin{aligned} U(x, s) &= \sum_i U_i(x) \xi_i(s) + \sum_c U_c(x) \xi_c(s); \\ V(x, s) &= \sum_i V_i(x) \eta_i(s) + \sum_g V_g(x) \eta_g(s); \\ W(x, s) &= \sum_i W_i(x) f_i(s) + \sum_g W_g(x) f_g(s) + \sum_p W_p(x) f_p(s); \\ M(x, s) &= \sum_m M_m(x) \mu_m(s). \end{aligned} \quad (2)$$

В разложении (2) $U=U(x)$, $V=V(x)$, $W=W(x)$, $M=M(x)$ на заданном временном отрезке зависят только от координаты x и являются функциями обобщенных перемещений и моментов, подлежащих определению.

Единичные функции $\xi(s) \dots \mu(s)$ зависят от поперечной координаты s и выбираются предварительно. Их изменение по ширине отдельной грани и для эквивалентного приведенного сечения железобетонной складки принимается таким же, как и при расчете упругих систем - непрерывным и линейным.

В случае расчета короткой призматической складки, для которой отношение $L_2/L_1 < 1$, система (1) значительно упрощается исключением из нее компонент поперечных изгибающих моментов M и соответствующих им поперечных сил Q .

Усилия в коррозионно поврежденных характерных элементах складчатой системы определяются физическими соотношениями теории Н.И. Карпенко, откорректированными на каждом уровне нагружения в заданный промежуток времени соответствующими значениями приведенной (с учетом коррозии) прочности бетона R_b^* и R_{bt}^* и сечения арматуры $\omega_s A_s$. Так, применительно к характерным элементам коротких призматических складок выражения для этих усилий примут вид:

$$N_1 = A^*_{11} \cdot \varepsilon_1 + A^*_{13} \cdot \gamma; \quad S = A^*_{13} \cdot \varepsilon_1 + A^*_{33} \cdot \gamma, \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} A^*_{11} &= C'_{33} / (C'_{11} C'_{33} - C'^2_{13}); \\ A^*_{13} &= C'_{13} / (C'^2_{13} - C'_{11} C'_{33}); \\ A^*_{33} &= C'_{11} / (C'_{11} C'_{33} - C'^2_{13}). \end{aligned} \quad (4)$$

При этом уместно заметить, что в отличие от модели Н.И. Карпенко приведенные жесткости A^*_{ji} вычисляются с учетом не только трещин, но и коррозионных повреждений бетона и арматуры в соответствии со схемой рис. 2.

Интегральные условия равновесия элементарной поперечной полоски, выделенной двумя поперечными сечениями с координатами x и $x+dx$, и длиной, равной длине контура поперечного сечения b (см. рис. 1) составлены по известной для упругих систем схеме В.З. Власова на основе принципа возможных перемещений.

В результате форма записи разрешающих дифференциальных уравнений сохраняется такой же, как и для упругих складчатых систем. В частности, для короткой призматической складки уравнения имеют вид:

$$\begin{aligned}
& \sum_{i=0}^{j_1} a^*_{ji}(x,s)U_i(x) + \sum_{k=0}^{k_1} b^*_{jk}(x,s)\bar{V}_k(x) = P_j(x); \\
& \sum_{i=0}^{j_1} b^*_{hi}(x,s)U_i(x) + \sum_{k=0}^{k_1} r^*_{hk}(x,s)\bar{V}_k(x) = Q_h(x); \quad (5) \\
& j = 0, 1, 2, \dots, j_1; \quad h = 0, 1, 2, \dots, h_1.
\end{aligned}$$

Переменные коэффициенты этих уравнений, выражающие жесткостные характеристики коррозионно повреждаемых железобетонных элементов складчатой системы в заданный момент времени, вычисляются интегрированием соответствующих единичных функций:

$$\begin{aligned}
a^*_{ji}(x,s) &= \int_0^b A^*_{11}(x)\xi_j(s)\xi_i(s)ds, \quad a^*_{ji}(x,s) = a^*_{ij}(x,s); \\
b^*_{jk}(x,s) &= \int_0^b A^*_{13}(x)\xi_j(s)\eta_k(s)ds, \quad b^*_{jk}(x,s) = \pm b^*_{kj}(x,s); \\
b^*_{hi}(x,s) &= \int_0^b A^*_{13}(x)\eta_h(s)\xi_i(s)ds, \quad b^*_{hi}(x,s) = \pm b^*_{ih}(x,s); \\
r^*_{hk}(x,s) &= \int_0^b A^*_{33}(x)\eta_h(s)\eta_k(s)ds, \quad r^*_{hk}(x,s) = r^*_{kh}(x,s).
\end{aligned} \quad (6)$$

Алгебраизация уравнений (5) выполнена методом неопределенных коэффициентов с использованием усеченных степенных рядов. В результате система разрешающих алгебраических уравнений по определению коэффициентов с учетом симметрии разложена в степенные ряды и имеет вид:

$$\begin{aligned}
& \sum_{i=0}^{j_1} \left(a^*_{jin-2} U_{i1} + 2a^*_{jin-2} U_{i2} + 3a^*_{jin-3} U_{i3} + ma^*_{ji0} U_{im} \right) + \\
& + \sum_{k=0}^{k_1} \left(b^*_{jkn-1} \bar{V}_{k1} + 2b^*_{jkn-2} \bar{V}_{k2} + 3b^*_{jkn-3} \bar{V}_{k3} + mb^*_{jk0} \bar{V}_{km} \right) = P_{jn-1}; \\
& \sum_{i=0}^{j_1} \left(b^*_{hin-1} U_{i1} + b^*_{hin-2} U_{i2} + b^*_{hin-3} U_{i3} + mb^*_{hi0} U_{im} \right) + \\
& + \sum_{k=0}^{k_1} \left(r^*_{hkn-1} \bar{V}_{k1} + 2r^*_{hkn-2} \bar{V}_{k2} + 3r^*_{hkn-3} \bar{V}_{k3} + mr^*_{hk0} \bar{V}_{km} \right) = Q_{hn-1},
\end{aligned} \quad (7)$$

где a^*_{jin} , b^*_{jkn} , r^*_{nkn} – коэффициенты разложений жесткостных параметров в степенные ряды.

В соответствии с принятой моделью на каждой итерации в расчет вводится некоторое сплошное эквивалентное сечение граней складки с корректировкой его толщины из условия равенства жесткостей заданной и эквивалентной грани при изгибе в ее плоскости.

В третьей главе диссертации изложены методика и результаты экспериментальных исследований натурального фрагмента железобетонного складчатого покрытия и моделей железобетонных складок на проектные нагрузки и запроектные воздействия.

Целью экспериментального исследования являлось изучение особенности деформирования и разрушения опытных железобетонных конструкций складчатых пространственных покрытий и отдельных плит с учетом их износа и повреждений. В задачи исследования включены следующие:

- испытание модели сборно-монолитной призматической складки, для определения параметров деформирования и трещинообразования на различных этапах нагружения при проектных нагрузках;

- испытание модели сборно-монолитной призматической складки на запроектное воздействие, вызванное внезапным догружением крайнего ребра складки от разрыва рабочей арматуры;

- испытание натуральных коррозионно поврежденных конструкций отдельных плит и фрагмента складчатого покрытия для определения параметров деформирования и остаточного ресурса сопротивления по предельным состояниям первой и второй групп.

Для проведения экспериментальных исследований на моделях были изготовлены ребристые железобетонные плиты с габаритными размерами 1500x600x75 мм. Модели плит были запроектированы из мелкозернистого бетона класса В25 и В12,5. Рабочее армирование продольных ребер выполнено проволочной арматурой диаметром 4 мм, класса В500. Конструктивное армирование принято из стальной проволоки диаметром 1,6 мм. Опытные модели конструкций были собраны в фрагмент призматической складки на испытательном стенде.

Конструкции нагружались последовательно тарированными грузами по 0,05 кН. Каждый этап нагружения составлял 1 кН/м² равномерно распределенной нагрузки.

Запроектным воздействием при испытаниях модели фрагмента складчатого покрытия был принят внезапный разрыв рабочей арматуры крайнего нижнего ребра опытной конструкции как следствие ее глубокой коррозии. При этом моделирование коррозионного повреждения осуществлялось уменьшением площади рабочей арматуры на 50% путем ее механической обработки в фиксированном сечении планируемого обрыва.

В процессе экспериментальных исследований для отдельных плит и конструктивных систем решались следующие задачи:

- экспериментальное определение деформаций и трещинообразования элементов отдельной плиты и плит в составе фрагмента складки на различных этапах их нагружения;

- экспериментальное определение опытных картин трещинообразования и разрушения модели складки при проектной нагрузке и созданном запроектном воздействии;

- определение количественных значений ширины раскрытия трещин, прогибов и разрушающих нагрузок для исследуемых поврежденных и новых конструкций.

Для проведения испытаний натурального фрагмента складчатого покрытия был изготовлен специальный стенд с необходимой геометрией опорных устройств (рис. 3) и отобраны две ребристые железобетонные плиты, длительно эксплуатировавшиеся в производственном здании. Конструкции этих плит имели коррозионные повреждения с потерей до 5% сечения, мелкие сколы в растянутой зоне ребер, незначительные (до 0,05 – 0,1 мм) трещины в полке плиты и поперечных ребрах. Кроме того, существенным дефектом этих плит, выявленным уже в ходе испытаний, явилась недостаточная прочность сварного соединения гладкой поперечной арматуры с рабочей арматурой в приопорной зоне.



Рисунок 3 – Общий вид испытаний фрагмента железобетонного складчатого покрытия: 1 - ребристые плиты, 2 – сталебетонная опора – диафрагма, 3 – бетонные опоры

В процессе испытаний измерялись вертикальные перемещения плит в пролете, средние относительные деформации продольных ребер, поперечных ребер и полок плит, а так же ширина раскрытия трещин. Возможный всплеск перемещений в ребрах плит модели фрагмента складки в момент запроектного воздействия фиксировался записью показаний индикаторов часового типа на видеокамеру, а также оценивался по приращению ширины раскрытия трещин в неразрушенных ее элементах после запроектного воздействия. Для измерения прогибов и взаимных перемещений были использованы индикаторы часового типа с ценой деления 0,01 и 0,001 мм. Ширину раскрытия трещин контролировали при помощи микроскопа МПБ-3М.

Испытания одиночных плит для последующего сравнения результатов с испытаниями плит в составе складки, выполнялось по схеме однопролетной балки для определения параметров их деформирования, трещинообразования и несущей способности натуральных конструкций после их длительной эксплуатации с учетом накопленных дефектов и повреждений.

Анализ опытных и расчетных деформаций бетона и перемещений плит покрытия позволил отметить следующее. На всех уровнях нагружения деформации бетона сжатой и растянутой зон крайнего нижнего продольного ребра фрагмента складки носили нелинейный характер (рис. 4). Особенно резкое нарастание этих деформаций проявилось после образования нормальных трещин в нижней растянутой зоне ребер при нагрузке $q_{cr2} = 4$ кПа.

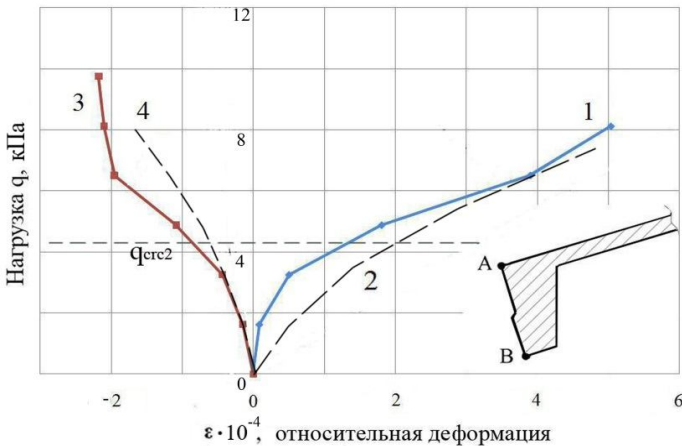


Рисунок 4 – Деформации крайнего нижнего продольного ребра фрагмента складки в точке А (1- опытные значения, 2 – расчетные значения) и в точке В (3 – опытные значения, 4 – расчетные значения)

На первом этапе испытаний (одиночные плиты) при действии контрольной нагрузки по второй группе предельных состояний (4,5 кПа) прогиб для плиты составил 7,1 мм. Максимальная ширина раскрытия нормальных трещин составила 0,05 мм и не превысила нормируемых значений. Разрушение плиты произошло по нормальному сечению при нагрузке 9,35 кПа вследствие обрыва рабочей арматуры в растянутой зоне продольных ребер в середине пролета.

По результатам предварительного расчета модели фрагмента складки с использованием предложенного варианта вариационного метода за контрольную нагрузку по второй группе предельных состояний для испытанной двугранной складки (второй этап) была принята нагрузка 5,0 кПа. На этом этапе нагружения прогиб крайнего нижнего ребра складки составил 6,25 мм, среднего ребра 5,91 мм, крайнего верхнего ребра 5,92 мм. Максимальная ширина раскрытия трещин для всех продольных ребер плит фрагмента не превысила 0,025 мм.

При нагрузке 9,23 кПа произошло разрушение по нормальному сечению нижней грани складки по рабочей арматуре на участке с заранее уменьшенным ее диаметром, это повлекло за собой разрушение всей нижней грани складки по пространственной схеме (трещина от середины крайнего продольного ребра нижней плиты развивалась к опорным участкам второго продольного ребра нижней плиты). Разрушение носило пластический характер. При этом, после разрушения нижней крайней плиты произошло изменение расчетной схемы (граничных условий) верхней плиты и последующее ее разрушение при этой же нагрузке через 2 минуты, но уже по балочной схеме. Заметного динамического догружения в элементах верхней плиты от разрушения нижней плиты не зафиксировано.

Анализ опытных и расчетных значений деформаций бетона и перемещений моделей конструкций плит позволил отметить следующее. На всех уровнях нагружения деформации бетона сжатой и растянутой зоны и прогиба крайнего нижнего продольного ребра фрагмента складки носили нелинейный характер. При контрольной нагрузке по второй группе предельных состояний опытные значения кривизн модели плиты оказались в 4 раза больше, чем для плит в составе двугранной складки (рис. 5). Из этого следует, что даже крайние, наиболее напряженные плиты в составе складки имеют значительный запас по жесткости. Это подтверждалось и характером трещинообразования и разрушения конструкций в составе складки. Если одиночная плита при испытании разрушалась по балочной схеме, то в составе фрагмента складчатого покрытия разрушение происходило по пространственной схеме.

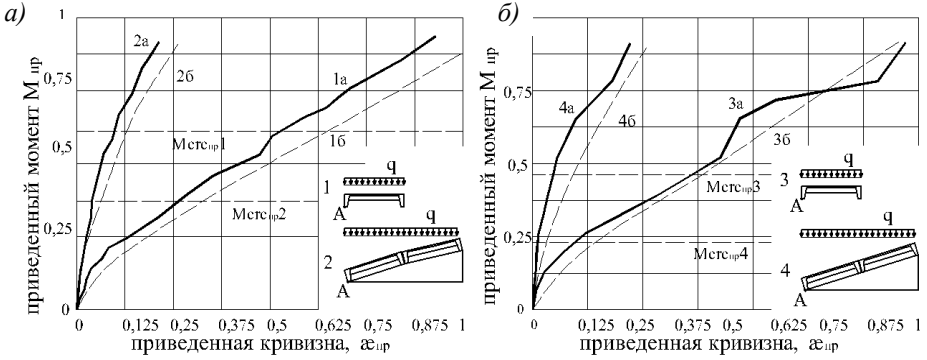


Рисунок 5 – Приведенная зависимость «момент-кривизна» для среднего поперечного сечения крайнего нижнего продольного ребра модели складки (а) и натурной складки (б); (кривые 1а, 2а, 3а, 4а – опытные значения кривизн, кривые 1б, 2б, 3б, 4б – расчетные значения кривизн)

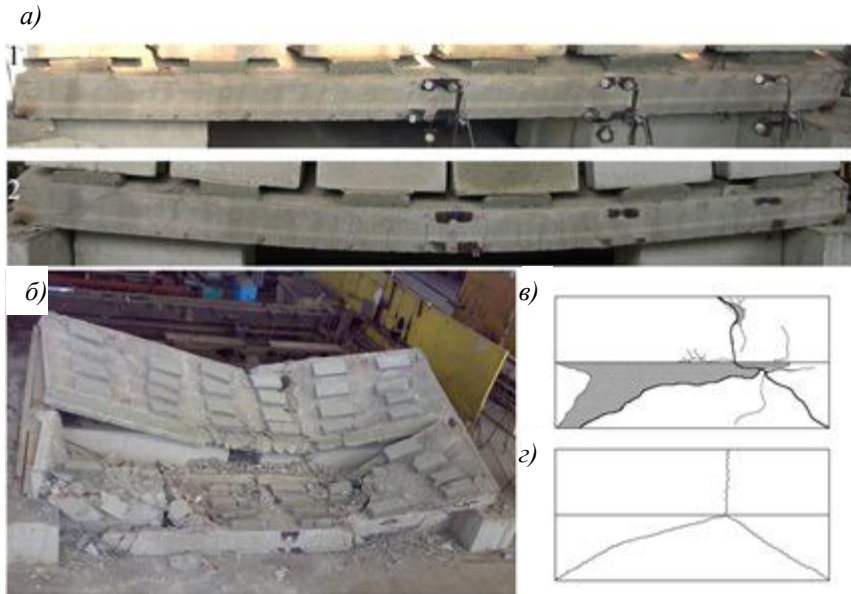


Рисунок 6 – Общий вид трещинообразования в продольном ребре нижней плиты фрагмента складчатого покрытия (а); общий вид разрушения фрагмента складчатого покрытия (б); схемы разрушения фрагмента складчатого покрытия: опытная (в) и расчетная (г)

Полученные схемы трещинообразования при испытании складчатого покрытия на моделях и на натуральных конструкциях при действии равномерно распределенной проектной нагрузки и при запроектном воздействии в виде внезапного выключения из работы крайнего нижнего продольного ребра от хрупкого разрушения приопорной зоны (при испытаниях натуральных конструкций) или в виде разрыва арматурного стержня в середине пролета (при испытаниях модели), согласуются со схемами разрушения полученными ранее при статических испытаниях рассматриваемых конструктивных систем на проектные нагрузки. Основное отличие в схемах разрушения модели фрагмента складчатого покрытия и фрагмента из натуральных плит с повреждениями после длительной эксплуатации состояло в том, что схема разрушения натурального фрагмента имела несимметричный характер, а развитие трещин в крайней нижней плите начиналось у опор нижнего ребра и переходило в полку (рис. 6).

Из этого следует, что при расчете рассматриваемого класса конструкций на запроектное воздействие могут быть использованы схемы разрушения складчатых покрытий полученные статическими испытаниями на проектные виды нагрузок и рекомендованные нормами СП 52-117-2008*.

В четвертой главе приведены алгоритм расчёта и результаты численных исследований деформирования и ресурса силового сопротивления коррозионно поврежденных железобетонных призматических складок.

Оценка ресурса сопротивления фрагмента покрытия в виде железобетонной призматической складки из двух ребристых плит выполнена при варьировании глубины коррозионного повреждения бетона и арматуры, условиями опирания плит и другими характеристиками.

Установлено, что коррозия рабочей арматуры крайнего нижнего ребра складки, составляющая 50% площади ее сечения, приводит к снижению остаточного ресурса сопротивления сечения рассматриваемого ребра складки в 1,5 -1,7 раза (рис.7).

Коррозионное повреждение бетона этого же ребра, с потерей сечения по площади в 20%, приводит к снижению остаточного ресурса сопротивления сечения рассматриваемого ребра (границы) конструкции в 1,1 раза. При снижении класса бетона конструкций с В40 до В12,5 (уменьшение расчетной прочности бетона в 2,93 раза) приводит к увеличению деформативности по параметру прогиба конструкций в 1,8 раза для наиболее напряженных элементов складчатого покрытия.

Анализ влияния изменения угла перелома граней складчатого покрытия для рассматриваемых конструкций показал, что при изменении угла перелома граней в пределах 1-3 градуса (что соответствует значениям углов перелома для сборных покрытий массового строительства из плит и

ферм) незначительно сказывается на деформативности и несущей способности покрытия. Из этого следует еще один важный вывод о том, что при усилении складчатых покрытий в виде короткой призматической складки, для создания эффекта пространственной работы покрытия конструктивно не требуется обеспечивать перелом 3-5 градусов между каждой гранью складки. Это позволяет производить усиление конструкций покрытий за-проектированных из типовых железобетонных ферм и плит массовых серий.

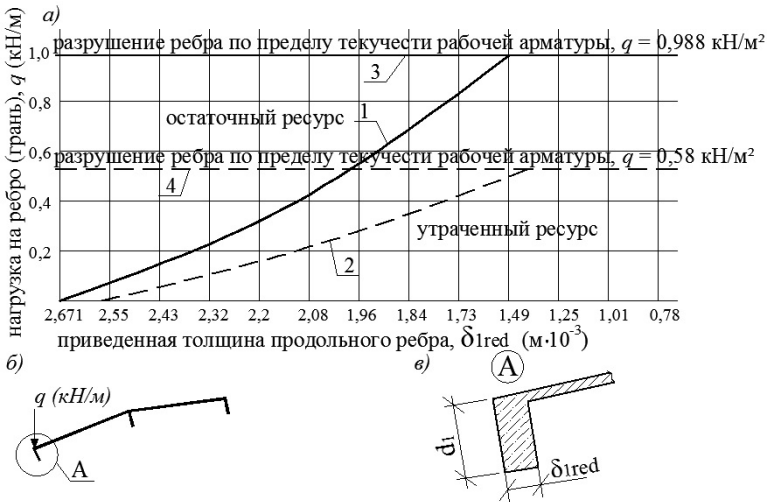


Рисунок 7 – К исследованию ресурса силового сопротивления первой (крайней) грани железобетонной призматической складки при коррозии рабочей арматуры 50% (кривая 2) и без учета коррозии (кривая 1): а – изменение ресурса сопротивления складки в зависимости от приведенной толщины крайнего ребра, б и в – схема нагружения и сечение крайнего ребра, соответственно

Выполненный по результатам расчета анализ остаточного ресурса сопротивления складчатого покрытия, при варьировании граничными условиями опирания плит складки на верхние пояса ферм, от шарнирного (вариант I) до жесткой заделки на одном (вариант II) или обоих краях плит (вариант III), показал значительное влияние условий опирания на параметры предельных состояний обеих групп (рис. 8). Следовательно, изменением условий опирания путем соответствующих конструктивных решений в эксплуатируемых покрытиях можно существенно повысить остаточный ресурс и продлить эксплуатационную пригодность таких конструкций.

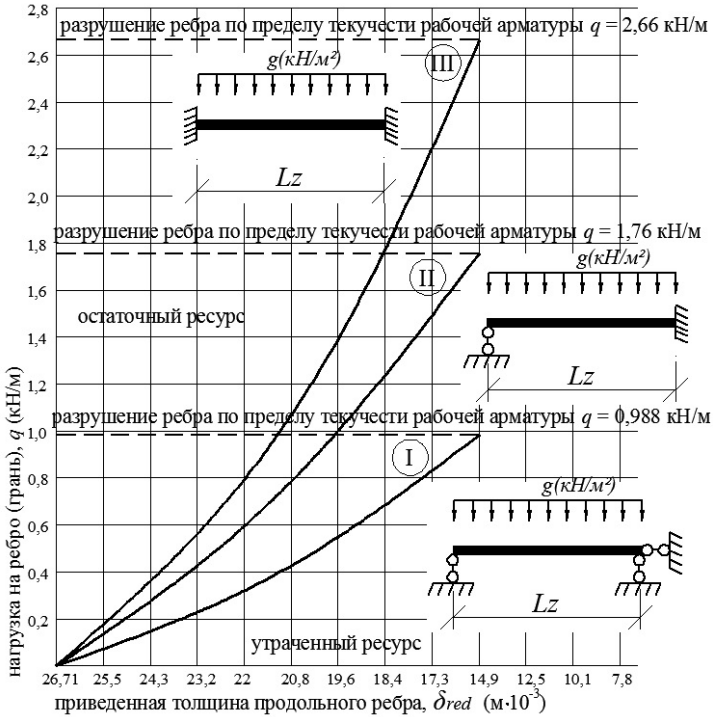


Рисунок 8 – Результаты численных исследований ресурса силового сопротивления первой грани складки по нормальным сечениям при варьировании граничными условиями конструкции.

При автоматизации расчета остаточного ресурса по разработанному алгоритму можно более обоснованно подходить к вопросам усиления эксплуатируемых конструкций складчатых покрытий, а также к вопросам проектирования новых типов конструкций с позиции конструктивной безопасности.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Выполнен комплекс экспериментально теоретических исследований по оценке ресурса сопротивления эксплуатируемых железобетонных пространственных складчатых конструкций покрытий в предельных и запредельных состояниях с учетом их износа и повреждений.

2. На основе общих положений вариационного метода В.З. Власова, в сочетании с физической моделью деформирования железобетона с трещинами и методом итераций, построены расчетные уравнения неординарного смешанного метода для анализа нелинейного деформирования и трещинообразования

железобетонных складчатых пространственных конструкций покрытий, учитывающие коррозионный износ и повреждения конструкций.

3. Экспериментальными исследованиями, по специально разработанной методике, установлены новые закономерности деформирования и трещинообразования, а также схемы разрушения коррозионно повреждаемых железобетонных складчатых конструкций покрытий при проектных и запроектных воздействиях.

4. С применением разработанной методики построен алгоритм нелинейного расчета и выполнены численные исследования деформирования, трещинообразования и остаточного ресурса железобетонных складчатых пространственных конструкций покрытий в предельных и запредельных состояниях. Численными исследованиями подтверждены экспериментально установленные закономерности нелинейного деформирования и трещинообразования и разрушения конструкций рассматриваемого типа.

5. Эффективность разработанного расчетного аппарата апробирована при разработке Орловским академцентром проекта реконструкции цеха ЖБИ ДООО ОЗ «Орелагропромстрой» г. Орел. Предложенный подход к оценке напряженно деформированного состояния и остаточного ресурса конструкций покрытий этого цеха позволил увеличить остаточный ресурс конструкций в полтора раза.

Результаты экспериментальных и теоретических исследований внедрены в учебный процесс Госуниверситета-УНПК (г. Орёл) и Юго-Западного Государственного Университета (г. Курск), при выполнении магистерских диссертаций по строительным специальностям.

**Список публикаций, отражающих результаты работы:
публикации в ведущих рецензируемых журналах и изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России:**

1. Осовских, Е.В. Исследования железобетонных складчатых покрытий в запредельных состояниях [Текст] / Е.В. Осовских, В.И. Колчунов, **П.А. Афонин** // Промышленное и гражданское строительство. - 2011. - № 4- С. 25-29.

2. Осовских, Е.В. Экспериментальные исследования деформирования и разрушения модели фрагмента железобетонного складчатого покрытия в запредельных состояниях [Текст] / Е.В. Осовских, В.И. Колчунов, **П.А. Афонин** // Строительство и реконструкция. – 2012. – № 1. – С. 22-27.

3. Осовских, Е.В. Деформирование, трещинообразование и разрушение эксплуатируемых железобетонных складчатых покрытий в предельных и запредельных состояниях [Текст] / Е.В. Осовских, В.И. Колчунов, **П.А. Афонин** // Строительство и реконструкция. – 2013. – № 1. – С. 26-32.

4. Осовских, Е.В. Деформирование эксплуатируемых железобетонных коротких призматических складок с трещинами [Текст] / Е.В. Осовских,

В.И. Колчунов, **П.А. Афонин** // Строительство и реконструкция. – 2013. – № 4. – С. 3-8.

публикации в других научных изданиях:

1. Колчунов, В.И. Особенности деформирования и разрушения железобетонных складчатых покрытий в запредельных состояниях [Текст] / Е.В. Осовских, В.И. Колчунов, **П.А. Афонин** // Железобетонные конструкции: исследования, проектирование, методика преподавания: Сборник докладов Международной научно-методической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения В.Н. Байкова. М.: МГСУ. - 2012. - С. 154 – 161.

2. **Афонин, П.А.** Повышение уровня конструктивной безопасности для несущих железобетонных конструкций покрытий одноэтажных промышленных зданий [Текст] / П.А. Афонин, Е.В. Осовских // Сборник тезисов VII Всероссийской конференции обучающихся «Национальное достояние России»; Государственная Дума ФСРФ, Минобрнауки России, Минтранс России, Минсельхоз России, РОСКОСМОС, РАЕН, РИА, РАО. – М.: НС «Интеграция» – 2013, – С. 1317-1318.

Подписано в печать 25.10.2013 г. Формат 60x84 1/16.

Печать офсетная. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,0. Тираж 110 экз. Заказ № 77

Отпечатано с готового оригинал-макета в ООО «Переплетчик»
302030, г. Орёл, ул. Пушкина, д. 20а. Тел/факс 8(4862) 55-01-54