

Исследования железобетонных складчатых покрытий в запредельных состояниях

УДК 624.074:624.04

Осовских Евгений Васильевич¹, Колчунов Виталий Иванович², Афонин Павел Алексеевич³

¹ Гл. конструктор «Орловского академического научно-творческого центра РААСН», к.т.н., доцент.

² Д.т.н., проф., академик РААСН, директор Архитектурно-строительного института Орел ГТУ, зав. кафедрой «Строительные конструкции и материалы»

³ Аспирант кафедры «Строительные конструкции и материалы»

Приведены результаты экспериментальных исследований и численного моделирования деформирования и разрушения железобетонных складчатых покрытий эксплуатируемых производственных зданий в запредельных состояниях. Предложено при разработке проектов реконструкции эксплуатируемых железобетонных складчатых покрытий производственных зданий наряду с традиционными методами поверочных расчетов по предельным состояниям проводить анализ живучести таких систем.

Ключевые слова: железобетонные складчатые покрытия, деформирование, разрушение, живучесть конструкций, конструктивная безопасность

STUDY OF FOLDED-PLATE REINFORCED CONCRETE ROOFS IN AN OUT-OF-LIMIT STATE.

Osovskih E. V., Kolchunov V. I., Afonin P. A.

The paper presents the results of experimental studies and numerical simulation of straining and failure of folded-plate reinforced concrete roof of an operating industrial building considering out-of-limit state. It is shown, that in the process of designing reconstruction of operating concrete roof structures of industrial buildings, along with traditional limit state methods it is reasonable to do survivability analysis for such systems.

Key words: folded-plate reinforced concrete roofs, straining, failure, survivability of structures, structural safety.

Статья опубликована в журнале «Промышленное и гражданское строительство» № 4, 2011 г. Стр 26-29

**Исследования железобетонных складчатых покрытий
в запредельных состояниях¹**

Е. В. Осовских, канд. техн. наук, доцент

В. И. Колчунов, д-р техн. наук, проф., академик РААСН, зав. кафедрой «Строительные конструкции и материалы»

П. А. Афонин, аспирант

В настоящее время все острее возникает вопрос, связанный с износом основных фондов страны. В связи с этим в научно-технической литературе появился термин «реконструируемый железобетон», и соответственно, возникли новые научные задачи, связанные с особенностями силового сопротивления конструкций из такого материала. Исследованиями, выполненными в последние годы в РААСН и других научных организациях, сформулировано новое научное направление и решен ряд задач, связанный с живучестью стержневых конструкций [1, 2]. Для пространственных конструкций решение этих задач носит пока лишь постановочный характер. В то же время, пространственные конструкции, например, такие как железобетонные складчатые покрытия из плит и ферм, занимают значительные площади эксплуатируемых производственных зданий. Их объем составляет более 10 процентов всех покрытий производственных зданий, а срок службы отдельных объектов достиг 30 – 40 лет.

В данной работе приведены некоторые результаты экспериментально-теоретических исследований особенностей деформирования и разрушения фрагмента эксплуатировавшегося железобетонного складчатого покрытия в запредельных состояниях, вызванных запроектным воздействием коррозионного характера. В качестве объекта исследования приняты ребристые железобетонные плиты, демонтированные из состава покрытия, эксплуатировавшегося более 25 лет (рис. 1). Степень коррозионных повреждений конструкций такова, что если исходить из требований [3], то большая часть плит покрытия подлежит усилению или замене, так как их техническое состояние оценивается как недопустимое или аварийное.

Целью проведенных экспериментальных и теоретических исследований явилось установление фактических параметров деформативности, трещиностой-

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ по проекту офи_ц 09-08-13600

кости и несущей способности поврежденных коррозией плит и оценка живучести покрытия в случае внезапных структурных изменений в его конструктивных элементах.

Испытания конструкций выполнены в два этапа. На первом этапе были испытаны одиночные плиты по схеме однопролетной балки для определения параметров деформативности, трещинообразования и несущей способности натуральных ребристых плит после их длительной эксплуатации с учетом накопленных дефектов и повреждений.

На втором этапе был испытан фрагмент в виде двух крайних плит, моделирующий участок складчатого покрытия в приопорных зонах (рис. 2). Здесь изучались особенности деформирования и разрушения ребристых плит с дефектами и повреждениями в составе складчатого покрытия.

В процессе экспериментальных исследований на первом и втором этапах решались следующие задачи:

- экспериментальное определение деформаций и трещинообразования элементов отдельных плит и плит в составе фрагмента складчатого покрытия на различных уровнях их нагружения;
- экспериментальное получение опытных картин трещинообразования и разрушения фрагмента складчатого покрытия при проектной нагрузке и запроектом воздействии, вызванном коррозионными повреждениями;
- установление сопоставимых количественных значений ширины раскрытия трещин, прогибов, разрушающих нагрузок для отдельных плит и плит в составе фрагмента складчатого покрытия при указанных видах нагрузок и воздействий.

Принятые в качестве объекта исследования плиты в свое время были запроектированы по серии ПК-01-106. Для первого этапа испытаний отобраны одна плита с ненарушенными опалубочными размерами и две укороченные плиты с разной степенью повреждений ребер и полки. В процессе демонтажа плит их опорные части были отрезаны на 300 мм с каждой стороны вместе с торцевыми поперечными ребрами, закладными деталями и рабочей арматурой. При испытаниях использована следующая маркировка плит: ПО-I-1, ПО-I-2 – для плит с фактической длиной 5400 мм, и ПО-I-3 – для плиты с длиной 5970 мм. Буквами обозначены плиты опытные, римской цифрой обозначен этап испытания, арабской цифрой – номер образца. Прочность бетона плит соответствовала классу В22,5..В25, рабочее армирование продольных ребер выполнено арматурой диаметром 20 и 22 мм класса AIII (A400). Плиты ПО-I-1, ПО-I-2 имели значительные

(более 10..15%) коррозионные повреждения рабочей и конструктивной арматуры, разрушение большей части защитного слоя бетона, а, кроме того, вследствие принятой технологии их демонтажа из состава покрытия - сквозные трещины и отверстия в полке.

Испытания плит на первом этапе проводились на заводском испытательном стенде. Стенд представлял собой металлическую конструкцию, имеющую жесткое основание. Опорные части стенда были расположены по концам изделия, одна из которых шарнирно-неподвижная, а другая шарнирно-подвижная. В связи с отсутствием торцевых ребер у укороченных плит, к выпускам арматуры с торцов приваривались арматурные стержни диаметром 12 мм из стали класса AIII (A400), соединяющие рабочую арматуру продольных ребер в опорной части и обеспечивающие недеформируемость торцевого контура плит.

Для проведения второго этапа испытаний был изготовлен специальный стенд с необходимой геометрией опорных устройств (см. рис. 2, а) и отобраны две ребристые железобетонные плиты, аналогичные плите марки ПО-I-3. 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.

Нагружение опытных конструкций на всех этапах испытаний осуществлялось железобетонными блоками ФБС9-3-6 весом по 350 кг каждый. До контрольных значений по прочности и по образованию и ширине раскрытия трещин плиты нагружались ступенями по 10% с последующей 10-минутной выдержкой, по достижении контрольной нагрузки была произведена выдержка, равная 30 минут. В процессе испытаний измерялись вертикальные перемещения плит в пролете и на опорах, средние относительные деформации на уровне рабочей арматуры продольного ребра и посередине полки плиты, а так же ширина раскрытия трещин. 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.

На первом этапе испытаний (одиночные плиты) при действии контрольных нагрузок 6,4..7,2 кПа прогибы для плит ПО-I-1, ПО-I-2 и ПО-I-3 составили 5 мм, 9,1 мм и 14,2 мм соответственно. Максимальная ширина раскрытия нормальных

трещин составила 0,1 – 0,25 мм и не превысила нормируемых значений. Разрушение плит ПО-I-1 и ПО-I-2 произошло при нагрузке 17,1 и 16,8 кПа соответственно вследствие раздробления бетона сжатой зоны продольных ребер. Разрушение плиты ПО-I-3 произошло при нагрузке 16,7 кПа вследствие разрыва рабочей арматуры одного из продольных ребер. К моменту разрушения в приопорной зоне продольного ребра было отмечено проскальзывание гладкой поперечной арматуры в бетонной матрице продольных ребер.

По результатам предварительного расчета вариационным методом [3] за контрольную нагрузку для испытаний двугранной складки (второй этап) была принята нагрузка 9,7 кПа. На этом этапе нагружения прогиб крайнего нижнего ребра составил 18,24 мм, среднего ребра 18,50 мм, крайнего верхнего ребра 15,40 мм, максимальная ширина раскрытия трещин для всех продольных ребер плит фрагмента не превысила 0,1 мм.

При дальнейшем увеличении нагрузки контроль вертикальных перемещений выполнялся при помощи нивелира Н-10КЛ по заранее установленным на конструкции линейкам. Схемы образования трещин дистанционно фиксировали маркерами. При нагрузке 18,9 кПа произошло проскальзывание поперечной арматуры, последующее хрупкое разрушение по наклонному сечению нижней грани складки, повлекшее за собой разрушение всего фрагмента. Причиной разрушения явились дефекты конструктивного исполнения арматурных каркасов продольных ребер, накопившиеся эксплуатационные повреждения и исчерпание силового сопротивления несущих элементов фрагмента покрытия.

Уместно также отметить что, несмотря на наличие значительных дефектов и повреждений защитного слоя для продольной рабочей арматуры в виде продольных трещин и даже полного отслоения защитного слоя на отдельных участках ребер плит (см. рис. 1, б), разрушения ребер по нормальным и наклонным сечениям из-за нарушения сцепления продольной арматуры с бетоном не произошло.

Анализ опытных и расчетных деформаций бетона и перемещений плит покрытия позволил отметить следующее. На всех уровнях нагружения деформации бетона сжатой и растянутой зоны крайнего нижнего продольного ребра фрагмента складки носили ярко выраженный нелинейный характер (рис. 3, а). Особенно резкое нарастание этих деформаций проявилось после образования нормальных трещин в нижней растянутой зоне продольных ребер при нагрузке $q_{crc2}=4$ кПа.

Сопоставление кривых деформирования на графиках «момент-кривизна» для одиночной плиты (результаты испытаний 1-го этапа) и наиболее напряженной

плиты в составе фрагмента (результаты 2 этапа испытаний) показали значительное (более чем в 3 раза) отличие в значениях кривизн. Так, при нагрузке трещинообразования $M_{crс2}=19,0 \text{ кН}\cdot\text{м}$ разница между опытными значениями кривизн в составе фрагмента и отдельной плиты составила 3,1 раза, а при контрольной нагрузке по прочности $M=31,28 \text{ кН}\cdot\text{м}$ – 4,1 раза (см. рис. 3, б). Из этого следует, что даже крайние наиболее напряженные плиты в составе складчатого покрытия имеют значительный запас по жесткости. Это подтверждается и характером трещинообразования и разрушения конструкций в составе покрытия (рис. 4). Если одиночные плиты при испытании разрушались по балочной схеме, то в составе фрагмента складчатого покрытия даже при нулевых углах перелома граней (а это наиболее невыгодное конструктивное решение двугранной складки) их разрушение происходило по пространственной схеме (см. рис. 4, в-г). Это соответствовало схемам разрушения, принятым в нормах [5], при углах перелома граней 3 - 5°.

Значение внутренних усилий, вычисленных при нагрузке 18,9 кПа с учетом динамических приращений в продольных ребрах элементов складки от внезапного хрупкого выключения крайнего нижнего ребра по наклонному сечению, превысило значение предельных усилий для этих ребер, что и привело к прогрессирующему обрушению всего опытного фрагмента складчатого покрытия.

Выводы.

Выявленные в результате исследований особенностей деформирования и разрушения железобетонных складчатых покрытий, как пространственных систем, при проектных и запроектных воздействиях позволяют увеличить резервы по параметрам предельных состояний I и II групп и продлить их сроки эксплуатации, не прибегая к кардинальному усилению отдельных несущих конструкций или замене покрытия.

Результаты анализа проведенных численных и экспериментальных исследований железобетонных складчатых покрытий показали, что разработанные методика и алгоритм расчета живучести таких конструктивных систем в целом удовлетворительно описывают параметры их деформирования и разрушения при рассматриваемом запроектном воздействии.

Список литературы

1. **Клюева, Н.В.** К расчету живучести железобетонных рамно-стержневых конструктивных систем при внезапных запроектных воздействиях [Текст] / Н.В. Клюева, О.А. Ветрова // Промышленное и гражданское строительство. – 2006. – №11. – С. 56.
2. **Бондаренко, В.М.** К расчету сооружений, меняющих расчетную схему вследствие коррозионных повреждений [Текст] / В.М. Бондаренко, Н.В. Клюева // Известия вузов. Строительство. – 2008. – №1. – С. 4–12.
3. **Осовских Е.В.** Особенности разрешающих уравнений железобетонных складчатых систем для расчета их живучести [Текст] / Е.В. Осовских // Строительство и реконструкция. – 2010. – №4. – С. 13–18.
4. **СП 13-102-2003.** Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений [Текст]. – Введ. 2003–08–21. – М.: ГОССТРОЙ РОССИИ: Изд-во ДЕАН, 2003. – 26 с.
5. **СП 52-117-2008.** Железобетонные пространственные конструкции покрытий и перекрытий. Часть 1. Методы расчета и конструирование [Текст]. – Введ. 2008–08–01. – М.: ФГПУ НИЦ Строительство, 2008. – 150 с.

а)

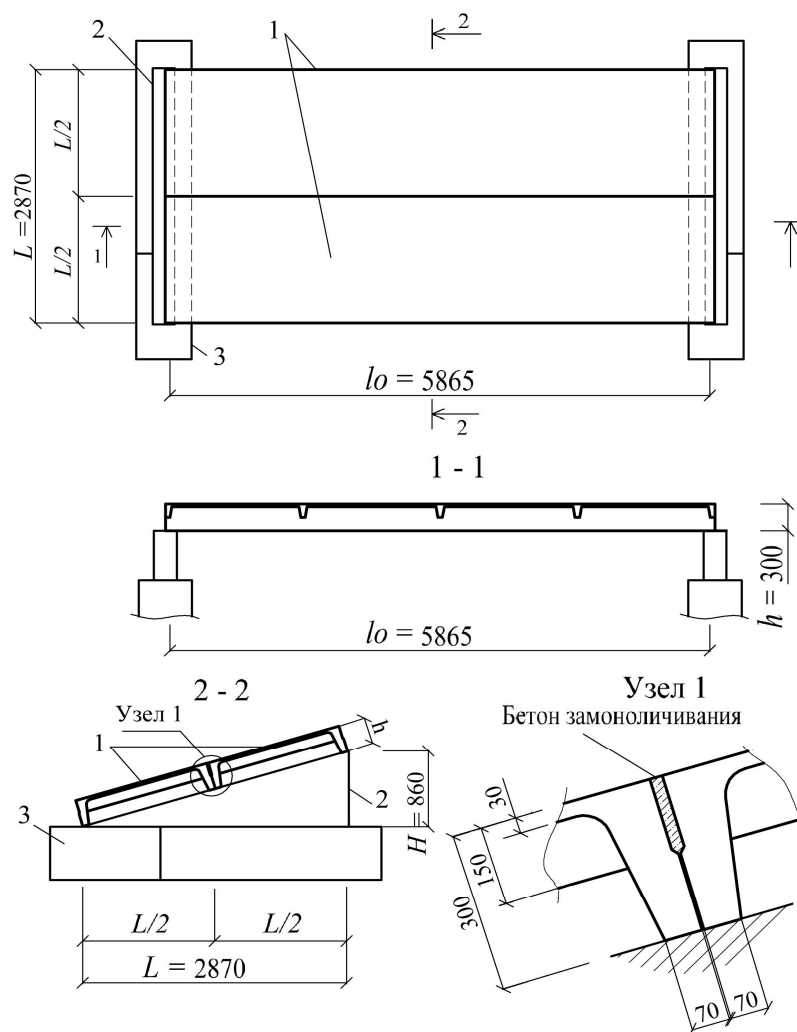


б)



Рисунок 1 – Складчатое покрытие с коррозионными повреждениями после длительной эксплуатации: а – общий вид; б – фрагмент плиты

а)

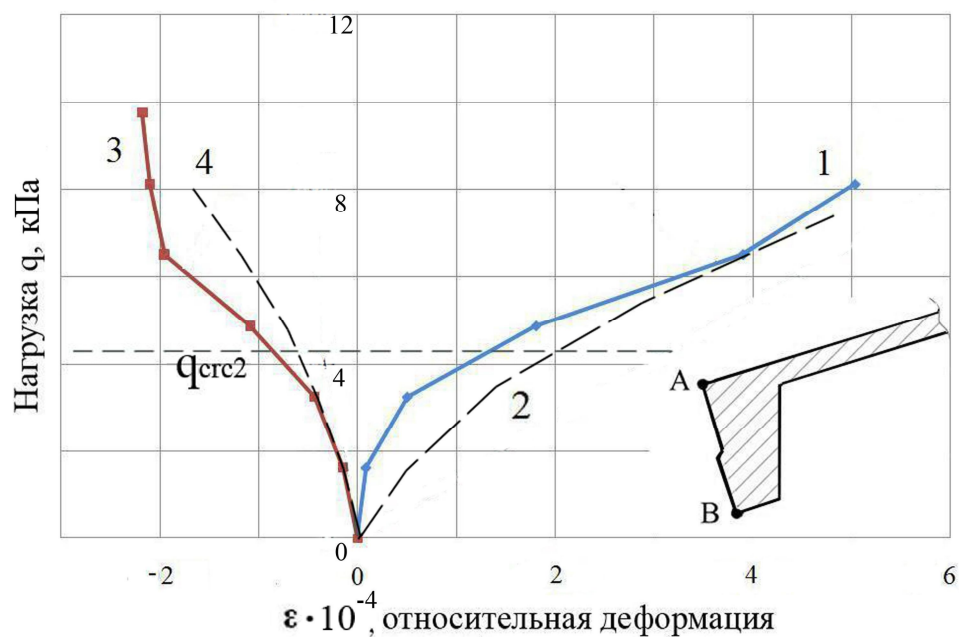


б)



Рисунок 2 – Схема конструкции опытного фрагмента складчатого покрытия (а) и общий вид испытания (б); 1 – железобетонные ребристые плиты; 2 – сталебетонная опора, 3 – опорные блоки испытательного стенда

а)



б)

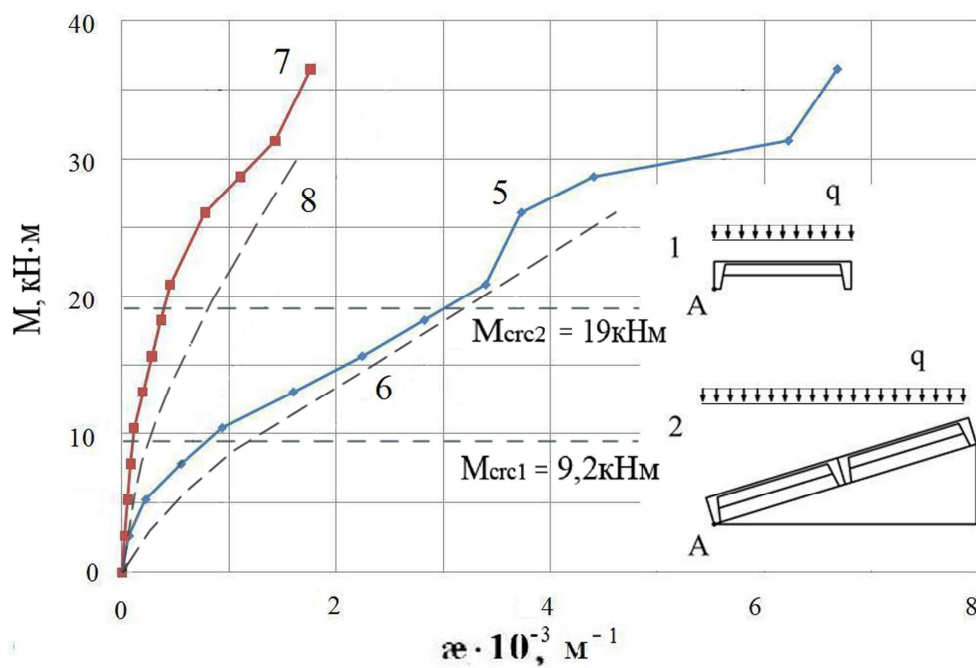


Рисунок 3 – Деформации крайнего нижнего продольного ребра фрагмента складки в точках А (кривая 1 - опытная, кривая 2 - расчетная) и В (кривая 3 – опытная, кривая 4 - расчетная) (а); зависимость «момент-кривизна» для среднего поперечного сечения крайнего продольного ребра одиночной плиты (кривая 5 – опытная, кривая 6 - расчетная) и плиты в составе фрагмента складки (кривая 7 – опытная, кривая 8 - расчетная) (б)

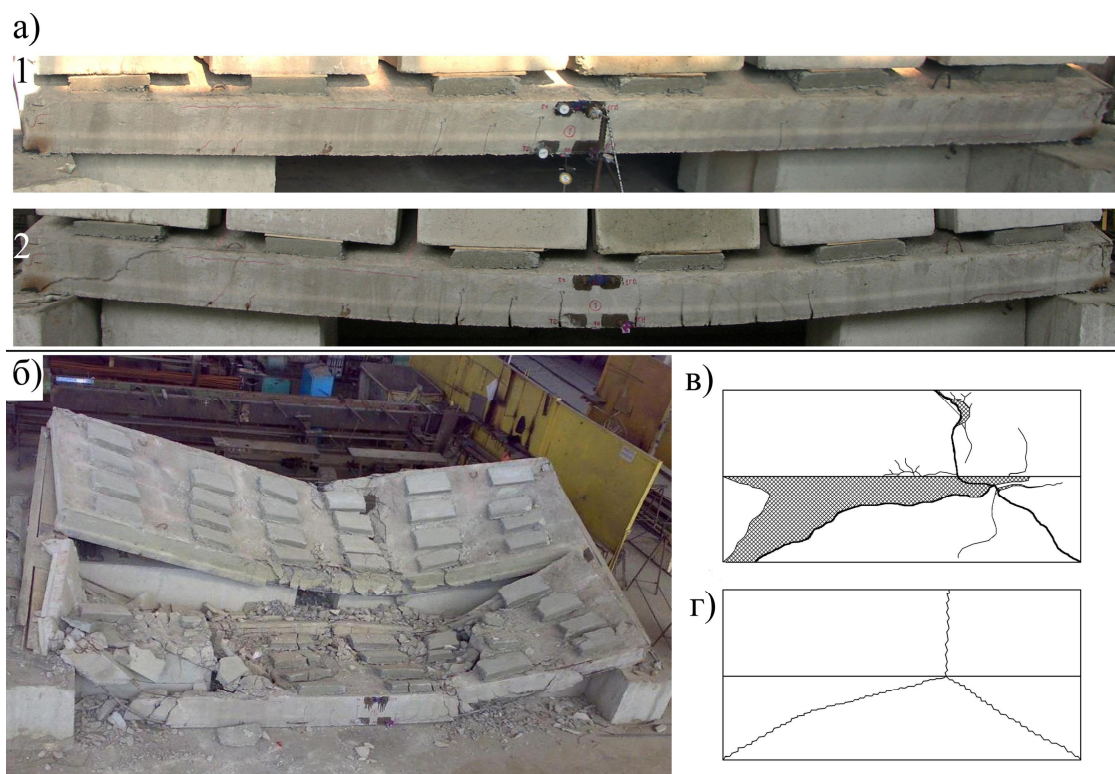


Рисунок 4 – Общий вид трещинообразования в продольном ребре нижней плиты фрагмента (а); общий вид разрушения фрагмента складчатого покрытия (б); схемы разрушения фрагмента: опытная (в) и расчетная (г)

Осовских Е.В.

Колчунов В.И.

Афонин П.А.