

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЖИВУЧЕСТИ ФРАГМЕНТА ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО КАРКАСА МНОГОЭТАЖНОГО ЗДАНИЯ\***

В статье представлена экспериментальная методика определения параметров живучести железобетонных пространственных конструктивных систем. Получены опытные данные о характере деформирования и разрушения фрагмента железобетонного каркаса многоэтажного здания в запредельных состояниях.

Ключевые слова: живучесть, железобетонный каркас, динамический расчет, конструктивная пространственная система, трещинообразование.

В работах [1, 2] в рамках новой концепции конструктивной безопасности решены отдельные задачи живучести физически и конструктивно нелинейных строительных систем. Рассмотрены деформирование и разрушение балочных и рамно-стержневых систем с элементами сплошного и составного сечения в запредельных состояниях при структурных перестройках в таких системах, вызванных внезапными выключениями моментных связей.

Дальнейшее развитие таких исследований связано с решением задач живучести сложных конструктивных систем, например, каркасов многоэтажных зданий, пространственных конструкций покрытий и перекрытий и других сооружений. Характерным фрагментом каркаса многоэтажного здания является пространственная система, включающая перекрестные ригели и колонны (рис. 1). Такой фрагмент при расчете сложных пространственных систем может использоваться в качестве расчетной схемы второго уровня для детального изучения деформирования и разрушения железобетонных элементов при запроектных воздействиях. При этом в качестве выключающихся элементов могут рассматриваться не только моментные, но и линейные связи.

В работах [3, 4] аналитическим методом был выполнен прямой динамический расчет и численный анализ такого фрагмента с различными граничными условиями. Данные этого анализа показали, что даже в линейно-упругой постановке такой расчет представляет значительную сложность для динамического анализа сооружений и может рассматриваться не более, чем тестовый пример для оценки практических методов расчета.

Учитывая сложность решаемой задачи, при разработке расчетного аппарата живучести рассматриваемых железобетонных конструктивных

---

\* Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-64540.2010.8

систем использованы физические представления о сопротивлении железобетона, базирующиеся на экспериментальных данных.

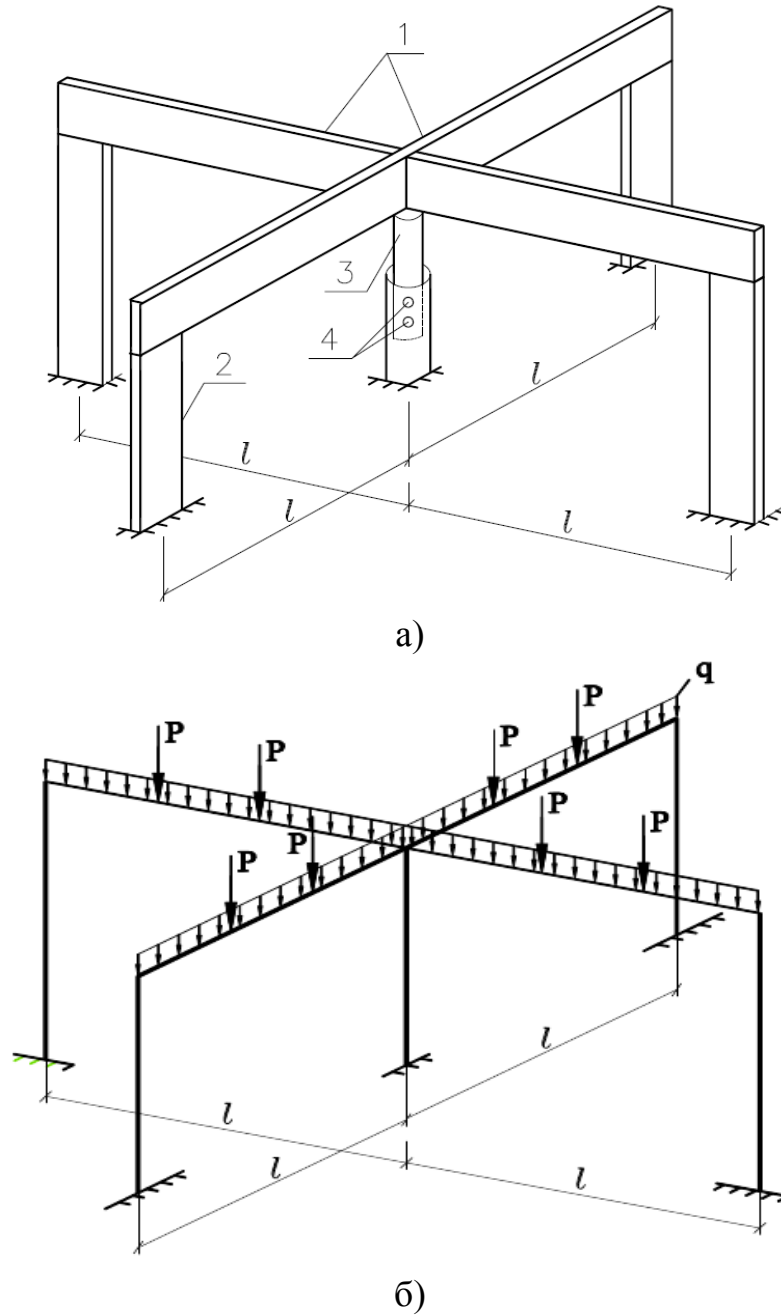


Рис. 1. Опытный характерный фрагмент (а) и расчетная схема (б) железобетонного каркаса многоэтажного здания: 1 – ригель; 2 – стойка; 3 – телескопическая стойка; 4 – бетонная шпонка

Для практической реализации этой задачи были проведены экспериментальные исследования двух фрагментов железобетонных конструктивных пространственных систем в виде перекрестных рам. Были запроектированы две серии таких конструктивных систем. Каждая из них

состояла из четырех сборных ригелей и пяти стоек, объединенных закладными деталями и замоноличиванием стыков в пространственную сборно-монолитную раму (рис. 2).

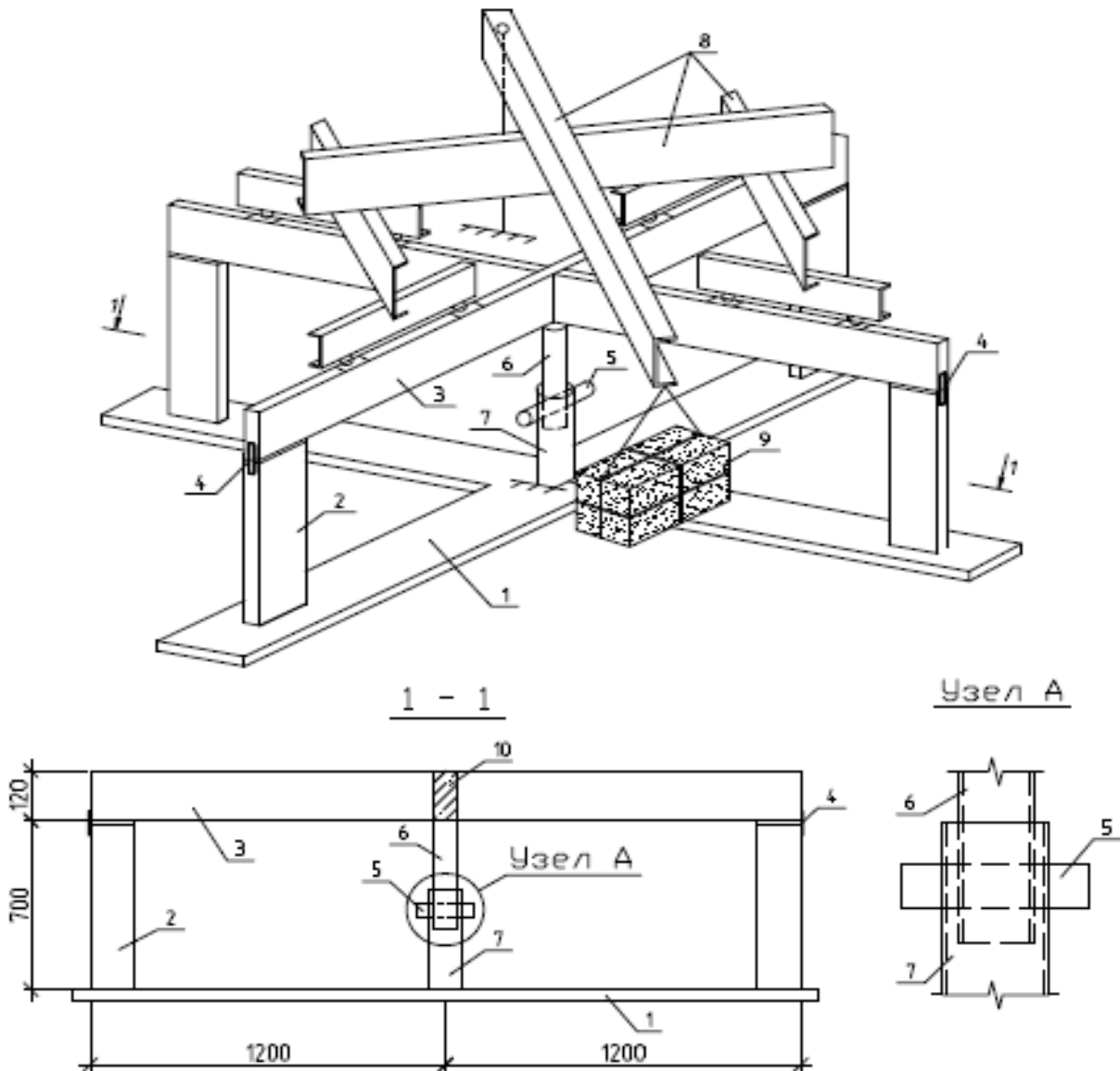


Рис. 2. Схема фрагмента пространственной конструктивной системы и нагрузочных устройств: 1 – опорная балка; 2 – стойки; 3 – ригель; 4 – закладные соединительные элементы; 5 – бетонная шпонка; 6, 7 – телескопическая конструкция из двух металлических труб; 8 – рычажная система; 9 – грузовая платформа; 10 – бетон замоноличивания

Конструкция ригеля (3) принята сечением 120x70 мм длиной 1200 мм, четыре стойки (2) такого же сечения длиной 700 мм. Сечение ригелей принято слоистым из бетонов классов В15, В20 с толщиной верхнего и нижнего слоев 40 и 80 мм соответственно. Стойки изготовлены из бетона

класа В20. Центральна стойка була виконана в виде телескопической конструкції, состоящей из двух металлических труб (6, 7) диаметрами 50 и 60 мм, соединенных бетонными шпонками (5).

Армирование сборных образцов ригелей принято плоскими сварными каркасами КР-1 с рабочей арматурой диаметром 6 мм класса А-III (А400). Поперечная арматура запроектирована из проволоки диаметром 1,5 мм с шагом 60 мм. Стойки армированы плоскими сварными каркасами Кр-2 с рабочей арматурой 8 мм класса А-III (А400) (рис. 3).

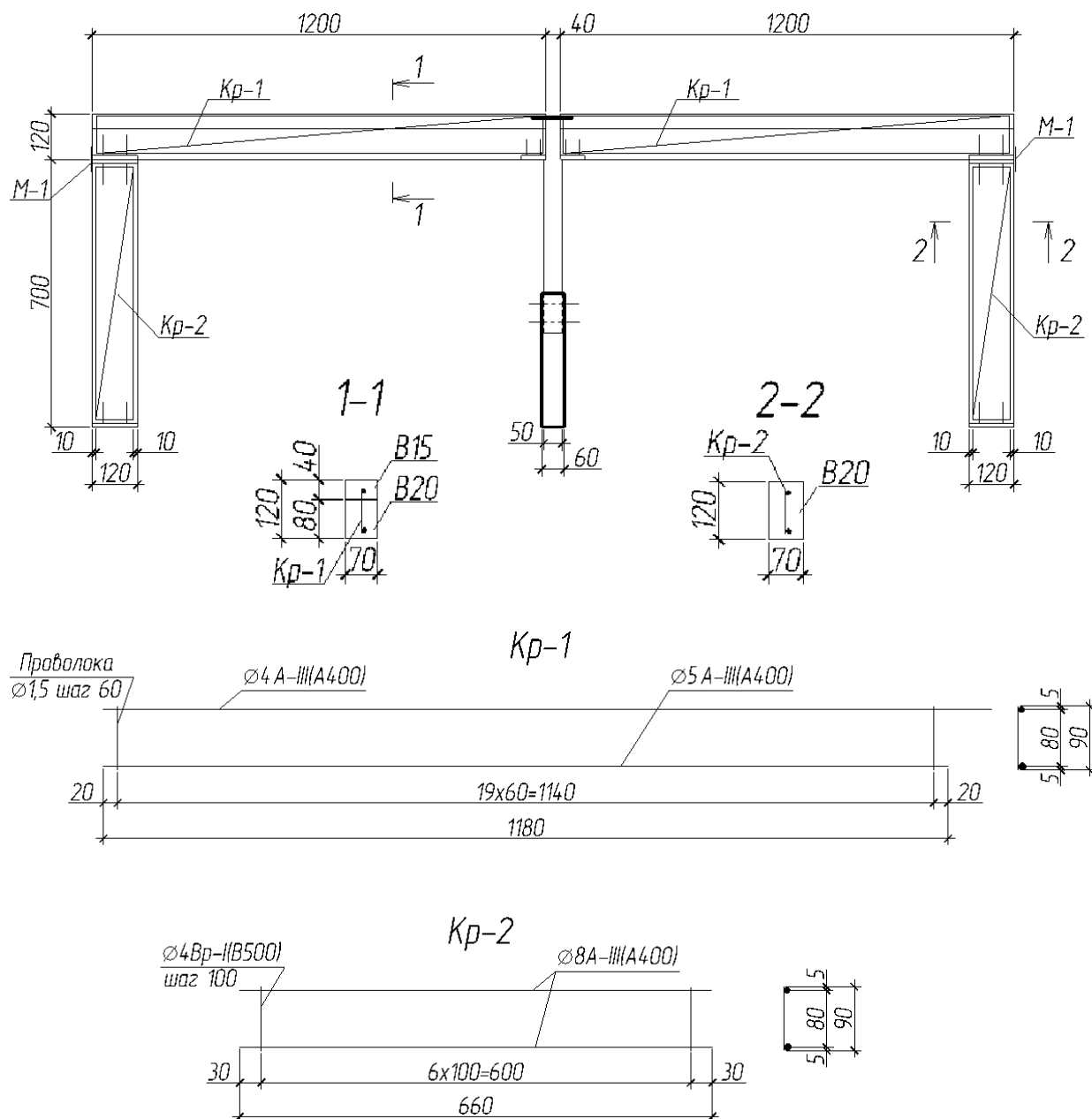


Рис. 3. Схема армирования фрагмента железобетонной пространственной рамы

В конструкции первой серии опирание перекрестных ригелей над центральной опорой было выполнено с односторонними моментными связями над центральной опорой, во второй серии – конструкция узла выполнена неразрезной. Для этого ригели первой серии имели выпуски верхней рабочей арматуры и в процессе монтажа соединялись между собой сварным швом, обеспечивая одностороннюю моментную связь над средней опорой. Ригели в опытной конструкции рамы второй серии имели выпуски верхней и нижней арматуры и после соединения этих выпусков на сварке омоноличивания узла сопряжения всех ригелей обеспечивалась неразрезность узла над центральной опорой (см. рис. 2).

Параллельно с изготовлением основных образцов фрагмента изготавливались вспомогательные кубы и призмы, предназначенные для получения фактических прочностных и деформационных характеристик бетона на момент испытаний.

Испытания конструкций рам производились на специально разработанном стенде, который представлял собой сварную конструкцию из прокатных профилей с механическим рычажно-нагрузочным устройством.

До проектной нагрузки ригели нагружались двумя сосредоточенными силами в средней части каждого пролета. Запроектная нагрузка прикладывалась путем внезапного хрупкого разрушения прокалываемых под заданную нагрузку шпонок в центральной стойке (см. рис. 2, 4).



а)



б)

Рис. 4. Общий вид опытного фрагмента конструктивной системы в виде перекрестных рам (а) и шпоночного соединения центральной стойки (б)

В процессе испытаний механическими приборами (индикаторами часового типа с ценой деления  $10^{-3}$  м) и с помощью тензостанций (ЦТИ-1) измерялись продольные деформации сжатого и растянутого бетона, углы поворота и прогибы ригелей в середине пролетов, нагрузка трещинообразования и ширина раскрытия трещин при проектной и запроектной нагрузках; определялся характер разрушения конструкции от воздействия внезапно приложенной запроектной нагрузки. Всплеск перемещений в пролетах рамы в момент запроектного воздействия фиксировался записью показаний индикаторов на цифровую видеокамеру с частотой 25 кадров в секунду.

Анализом полученных опытных данных установлено, что деформирование, трещинообразование и разрушение конструкции при рассматриваемом запроектном воздействии имеет свои особенности. Внезапное приложение к нагруженной статически неопределимой системе запроектной нагрузки вызывает динамические догружения всех элементов системы. При этом главными параметрами, определяющими интенсивность догружения железобетонных конструкций являются уровень нагружения проектной нагрузкой и структура конструктивной системы.

По полученным опытным и расчетным данным построены диаграммы «момент-кривизна» («М- $\alpha$ ») для опорных сечений 1-1 фрагментов рамной системы обеих серий (рис. 5, 6).

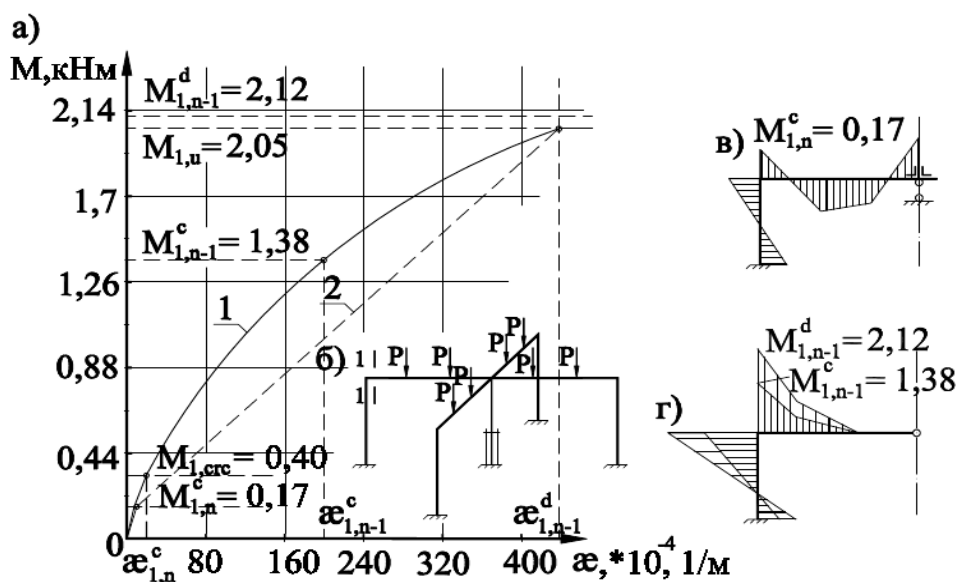


Рис. 5. Расчетные (1) и опытные (2) графики деформирования опорного сечения ригеля первой серии при нагружении проектной нагрузкой и запроектном воздействии: а) диаграммы «М- $\alpha$ »; б) схема проектной нагрузки; в),г) расчетные значения моментов, соответственно, при проектной нагрузке и после запроектного воздействия

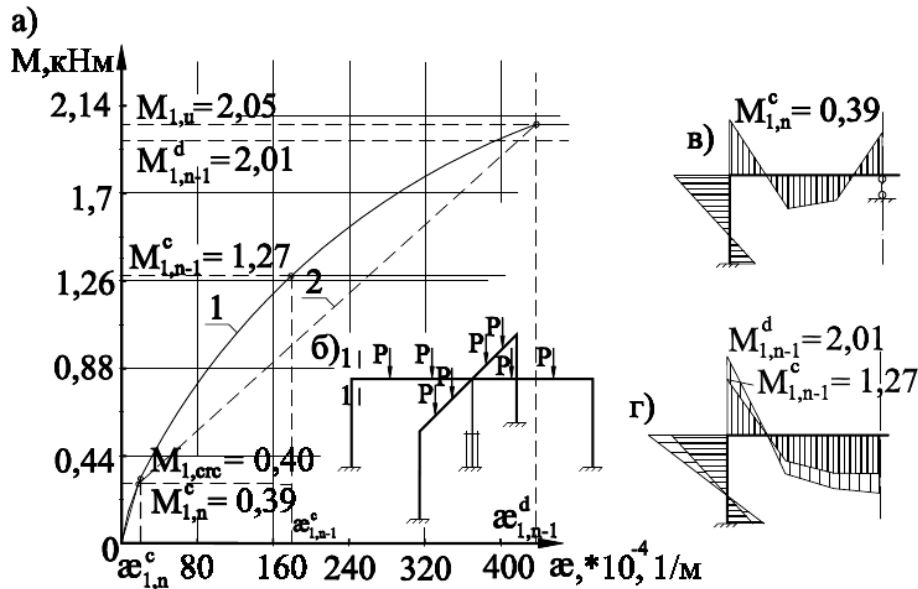


Рис. 6. Расчетные (1) и опытные (2) графики деформирования опорного сечения ригеля второй серии при нагружении проектной нагрузкой и запроектном воздействии: а) диаграммы «М-ε»; б) схема проектной нагрузки; в),г) расчетные значения моментов, соответственно, при проектной нагрузке и после запроектного воздействия

Анализируя опытные (2) и расчетные (1) кривые «момент-кривизна» для опорного сечения 1-1 фрагмента рамной системы первой серии (рис. 5,а), можно отметить следующее. На первом этапе нагружения исходной  $n$ -раз статически неопределимой системы проектной нагрузкой  $P$  в интервале  $0 < M < 0,17$  кНм деформирование носило упруго-пластический характер с незначительно выраженной нелинейностью (рис. 5,б,в). Значение рассчитанного в рассматриваемом сечении по максимальной проектной нагрузке изгибающего момента в ригелях, равного  $0,17$  кНм, не превышало момента трещинообразования ригеля ( $M_{\text{срс}} = 0,4$  кНм). Хрупкое выключение из работы центральной стойки привело к внезапному уменьшению степени статической неопределимости конструктивной системы на единицу и соответственно внезапному динамическому догружению всех элементов фрагмента пространственной рамы и последующему ее прогрессирующему разрушению.

Коэффициент динамического догружения рассматриваемого сечения, равный отношению  $M_{1,n-1}^d / M_{1,n-1}^c$ , составил  $1,53$ , а момент в рассматриваемом сечении после внезапного изменения степени статической неопределимости рамы на единицу по отношению к усилию в исходной  $n$  раз статически неопределимой раме увеличился в  $12,5$  раз.

Сопоставляя графики деформирования для опорного сечения 1-1 обеих серий проведенных испытаний можно отметить следующее. Рассчитанное по методике [5] значение динамического момента в рассматриваемом сечении системы  $n-1$  второй серии – (после выключения из работы центральной опоры) с жестким узлом над центральной опорой составило 2,01 кНм, а в системе первой серии (с односторонними моментными связями) 2,12 кНм. Испытанием первого фрагмента на рассматриваемое запроектное воздействие установлено прогрессирующее обрушение ригелей пространственной системы (рис. 5,а,г). Это полностью согласуется с полученными теоретическими значениями коэффициента динамического догружения и значениями изгибающих моментов в рассматриваемом сечении ( $n-1$ ) раз статически неопределимой рамы. При испытании конструкций второй серии прогрессирующее обрушение не произошло.

Полученная экспериментально картина трещин в ригелях рамно-стержневой системы обеих серий (после запроектного воздействия) также подтвердила описанный характер разрушения. Трещинообразование в ригелях первой конструктивной системы наблюдалось в верхних растянутых зонах над крайними опорами ригелей. Одиночная трещина над средней опорой (тр. 1) образовалась от поворота торцов ригелей при удалении средней стойки (рис. 7,а).

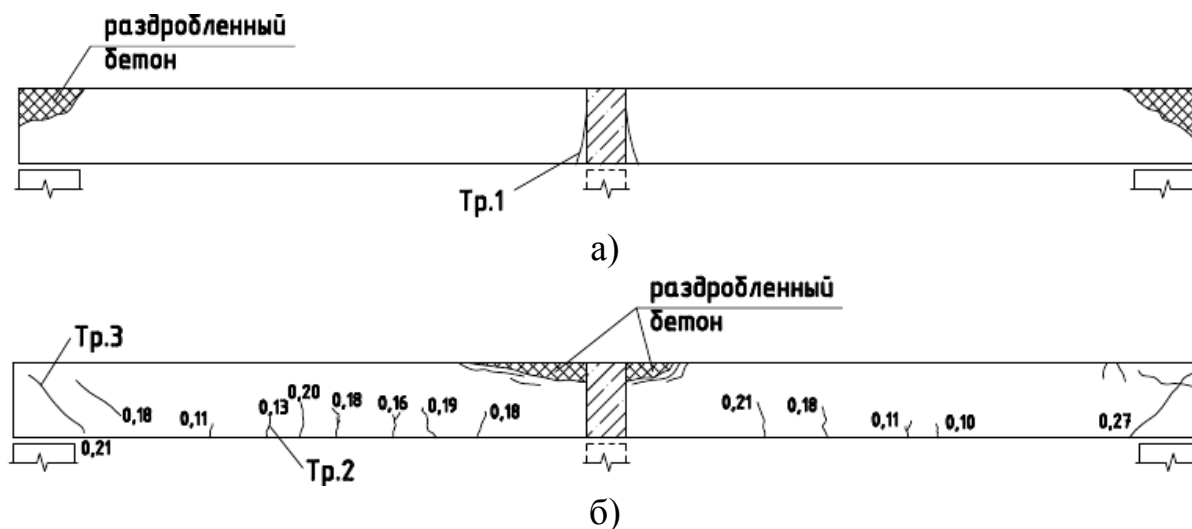


Рис. 7. Характерные схемы трещинообразования разрушения и остаточная ширина раскрытия трещин в ригелях первой (а) второй (б) серий после запроектного воздействия

Характер трещинообразования в ригелях второй серии после внезапного выключения из работы центральной стойки (тр. 2, тр. 3) качественно соответствовал картине трещин в ригеле однопролетной рамы с жесткими



узлами на опорах (рис. 7,б). Максимальная остаточная ширина раскрытия нормальных трещин в опытной конструкции рамы второй серии в пролетном сечении составила 0,3 мм, в опорном сечении – 0,27 мм.

Несмотря на значительное раскрытие нормальных трещин и частичное раздробление бетона сжатой зоны в середине пролета, хрупкого разрушения рамы с внезапно выключенной центральной опорой, как в конструкции первой серии, не произошло. Из приведенного анализа следует, что, варьируя структурой (топологией), конструктивным армированием элементов и классом бетона, можно управлять параметрами живучести железобетонного каркаса многоэтажного здания.

### **Выводы.**

1. Разработанная методика экспериментального определения параметров живучести железобетонных пространственных конструктивных систем с внезапно выключающимися линейными связями позволяет опытным путем определять динамические догрузки в элементах железобетонных пространственных конструкций, схемы трещинообразования и характер разрушения таких систем при внезапных изменениях конструктивных и расчетных схем.

2. Полученные опытные данные о характере деформирования и разрушения исследованного фрагмента железобетонного каркаса многоэтажного здания в запредельных состояниях, вызванных внезапным выключением одного из конструктивных элементов, могут быть использованы при разработке предложений по расчету на отказ одной из несущих строительных конструкций, предусмотренного «Техническим регламентом о безопасности зданий и сооружений» (№ 384-ФЗ от 30.12.2009 г.) в рамках актуализации нормативных документов, обеспечивающих соблюдение требований этого регламента.

### **Список использованной литературы**

1. Ключева Н.В. К построению критериев живучести коррозионно повреждаемых железобетонных конструктивных систем [Текст] / Н.В. Ключева, Н.Б. Андросова // Строительная механика и расчет сооружений. – 2009. – №1. – С. 29-34.
2. Бондаренко В.М. К расчету сооружений, меняющих расчетную схему вследствие коррозионных повреждений [Текст] / В.М. Бондаренко, Н.В. Ключева // Известия вузов. Строительство. – 2008. – №1. – С. 4-12.
3. Гордон В.А. Расчет динамических усилий в конструктивно-нелинейных элементах стержневых пространственных системах при внезапных структурных изменениях / В.А. Гордон, Н.В. Ключева, Т.В. Потураева, А.С.

- Бухтиярова // Строительная механика и расчет сооружений. – 2008. – № 6. – С. 26–30.
4. Ключева Н.В. Расчет динамических усилий в конструктивно-нелинейных элементах стержневых пространственных систем / Н.В. Ключева, В.А. Гордон // Известия вузов. Строительство. – 2008. – №3. – С. 7–11.
5. Гениев Г.А. Прочность и деформативность железобетонных конструкций при запроектных воздействиях/ Г.А. Гениев, В.И. Колчунов, Н.В. Ключева, А.И. Никулин, К.П. Пятикрестовский. Научное издание. – М.: Изд-во АСВ, 2004. – 216 с.

#### **Анотація**

У статті представлена експериментальна методика визначення параметрів живучості залізобетонних просторових конструктивних систем. Отримані дослідні дані про характер деформування та руйнування фрагменту залізобетонного каркасу багатоповерхової будівлі у заграничних станах.

Ключові слова: живучість, залізобетонний каркас, динамічний розрахунок, конструктивна просторова система, тріщиноутворення.

#### **Annotation**

The experimental technique of definition parameters of survivability of reinforced-concrete spatial constructive systems is presented in article . Skilled data about character of a warping and destruction of a fragment of a concrete formwork of a many-storeyed building in other-wordly conditions are obtained.

Keywords: survivability, concrete formwork, dynamic calculation, constructive space system, crack formation.