

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

УДК 624.078.4

И.И. Зуева, В.В. Зуев

Пермский государственный технический университет

РАБОТА ЭЛЕМЕНТОВ СТРУКТУРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЗА ПРЕДЕЛАМИ УПРУГОСТИ

Рассмотрена работа элементов структурных конструкций в упругопластической и пластической стадиях. На примере структурного блока размерами 24×12 м намечены пути повышения эффективности структурных конструкций за счет использования действительной диаграммы работы стали.

Ключевые слова: структурные конструкции, унификация, упругопластические и пластические деформации, эффективность.

Исследования структурных конструкций в основном посвящены упругой работе. Между тем в структурных системах, обладающих повышенной жесткостью, возможно использование пластических свойств стали и ее действительной диаграммы. Возможности работы систем в упругопластической стадии определяются сечениями стержней, видом нагрузки, схемой опирания покрытия. В зависимости от указанных параметров увеличение нагрузки в предельном состоянии по сравнению с упругой стадией достигает 13–30 % [1].

Структурные конструкции получают в настоящее время широкое применение во всех странах мира. Одним из видов структурных конструкций являются структурные конструкции типа «ЦНИИСК» – это пространственная стержневая плита, собираемая из прокатных профилей. Верхние продольные пояса выполняются из двутавров, нижние – из одиночных уголков, наклонные раскосы – из одиночных или парных уголков. Продольные верхние и нижние элементы, а также раскосы крепят-

ся к поперечной сварной торцевой ферме пролетом 12 м. В отличие от ранее применявшихся довольно сложных узловых сопряжений в этой системе раскосы крепятся к поясам непосредственно по одной полке при помощи болтов нормальной точности. Ввиду относительной простоты изготовления, невысокой стоимости и использования недефицитных прокатных элементов эта конструкция получила широкое применение в промышленном строительстве [2].

В структурных конструкциях, как правило, вследствие унификации элементов наблюдается недоиспользование несущей способности отдельных стержней. Снижения расхода материалов в подобных системах можно добиться путем применения большего числа типоразмеров или, как уже отмечалось, выравнивания усилий за счет работы наиболее нагруженных стержней за пределами упругости.

Известно, что в статически неопределимой пространственной стержневой конструкции исчерпание несущей способности в одном или нескольких стержнях во многих случаях не определяет предельного состояния системы в целом, при этом сжатые и растянутые стержни при достижении ими соответственно напряжений потери устойчивости или текучести в дальнейшем ведут себя различно. Так, отдельные растянутые элементы за пределами упругости продолжают работать в составе конструкции, а потеря устойчивости сжатого стержня приведет к его быстрой разгрузке и перераспределению усилий на соседние элементы.

Указанная особенность работы структурной конструкции позволяет добиться снижения расхода материала за счет развития пластических деформаций в отдельных элементах без нарушения надежности и пригодности конструкции в целом в условиях эксплуатации.

При исследовании резервов структурного блока размерами 24×12 м (рис. 1) было принято, что сжатые стержни, потерявшие устойчивость, выключаются из работы системы, а работа растянутых элементов рассмотрена с учетом действительной диаграммы материала.

Следует отметить, что не во всех элементах структуры возможна работа за пределами упругости. Выход из строя отдельных элементов может превратить систему в механизм и привести к ее обрушению. В связи с этим первоначально был проведен анализ влияния изменения жесткостей отдельных раскосов или выход их из работы конструкции на напряженно-

деформированное состояние системы. Расчетами установлено, что конструкция способна воспринимать нагрузку до тех пор, пока ни один из ее узлов ни по одному направлению не получит кинематическую свободу, что в решении определялось развитием бесконечно больших перемещений. Результаты анализа позволили выявить раскосы, выход каждого из которых обращает систему в механизм. Эти элементы условно названы основными. При изменении жесткостей основных раскосов во всех стержнях структуры усилия не меняются, а наблюдается только изменение прогибов (см. рис. 1). Так как усилия в основных растянутых раскосах не зависят от распределения жесткостей, то переход данных элементов за упругую стадию будет сопровождаться более интенсивным развитием прогибов. В остальных раскосах возможно допустить развитие пластических деформаций или выход сжатых раскосов из работы конструкции. При варьировании жесткостей неосновных раскосов наблюдалось перераспределение усилий во всех элементах системы, кроме стержней, обозначенных на рис. 1 пунктирными линиями, а также изменение прогибов узлов структурного блока.

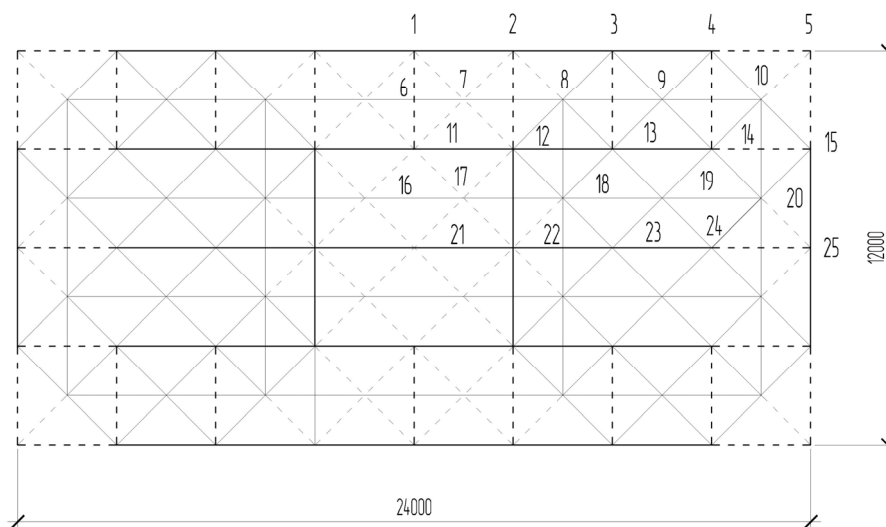


Рис. 1. Структурный блок типа «ЦНИИСК» размерами 24 × 12 м
(----- основные элементы)

На примере рассматриваемого структурного блока получено, что при выходе из строя какого-нибудь одного из неосновных раскосов перераспределяются усилия во всех элементах, за

исключением основных. В отдельных случаях уменьшение жесткостей раскосов может привести к снятию нагрузки с некоторых элементов, к смене знака в одних стержнях или перегрузке других. Таким образом, показано, что напряженно-деформированное состояние систем, обладающих высокой статической неопределимостью, в значительной степени зависит от жесткостей элементов, а снижение жесткости отдельных элементов за счет возникновения в них пластических деформаций может привести к существенному перераспределению усилий.

На основании проведенных исследований оказалось возможным наметить пути повышения эффективности структурных конструкций за счет использования упругопластической и пластической стадий работы отдельных элементов.

Исследование структурного блока с учетом этого фактора проводилось по программе, обеспечивающей расчет структурных конструкций с учетом физической нелинейности отдельных элементов.

Физическая нелинейность связана с нелинейностью зависимости $y = y(e)$, которой характеризуется материал конструкции в упругопластической области.

Учет физической нелинейности приводит к получению разрешающей системы уравнений, содержащей нелинейные относительно определяемых основных неизвестных члены. При этом основное матричное уравнение для определения неизвестных узловых перемещений запишется в виде

$$[\bar{K}]\{\bar{q}\} = \{\bar{F}\}.$$

Значение матрицы $[\bar{K}]$ зависит не только от геометрических параметров конструкции, но и от ее напряженно-деформированного состояния, выражаемого через узловые перемещения. Именно это обстоятельство и приводит к решению системы уравнений с помощью итерационных методов.

При учете физической нелинейности связь между вектором напряжений $\{y\}$ и вектором деформаций $\{\varepsilon\}$ можно представить в виде

$$\{y\} = \left[E_{\varepsilon(\varepsilon)} \right] \{\varepsilon\},$$

где значение матрицы $\left[E_{\varepsilon} \right]$ будет некоторой функцией подлежащего определению деформированного состояния $\{\varepsilon\}$, которое в методе конечных элементов является однозначной функцией узловых перемещений $\{q\}$. Последнее позволяет переписать зависимость следующим образом:

$$\{\sigma\} = \left[E(q) \right] \{q\}.$$

При использовании шагового метода нагружения решение системы нелинейных уравнений обеспечивается, если прикладывать нагрузку малыми порциями, считая каждое предыдущее состояние за исходное и решая каждый раз систему линейных уравнений. Ряд поэтапных нагружений преобразует физическую зависимость для материала конструкции в совокупность линейных соотношений между напряжениями и деформациями на каждом шаге нагружения. Работа растянутых элементов соответствует заданной диаграмме работы материала, а сжатые стержни, достигнув предельного состояния, выключаются из работы.

В этом случае усилия в растянутых элементах системы для текущего этапа нагружения могут быть найдены по формуле

$$N = \frac{EA \cdot \Delta l}{l} \cdot \eta,$$

где $\eta = \frac{E_k}{E}$; E_k – касательный модуль.

Значение коэффициента η для данного этапа нагружения устанавливается из анализа напряженно-деформированного состояния элемента конструкции на предыдущем шаге и принимается по данным действительной диаграммы работы материала.

Описание действительной диаграммы осуществляется следующим образом: за пределами упругости диаграмма разбивается на достаточно малые участки, на каждом из которых определяется касательный модуль. Значения касательных модулей для соответствующих напряжений задаются в исходных данных. Это позволяет применить для расчета любую диаграмму работы материала, разбив ее с любой степенью точности. Шаг нагружения принимается произвольным. Для обеспечения точности решения шаг нагружения за пределами упругости может быть выбран достаточно малым.

Как показали исследования, полученные на примере структурного блока (см. рис. 1) в растянутых элементах продольного нижнего пояса, перешедших за предел упругости, усилия при последующих шагах нагружения возрастают незначительно, причем в соседних по отношению к ним элементах наблюдается более интенсивное увеличение усилий. Усилия в нижних поясах начинают выравниваться, а деформации узлов растут непропорционально нагрузке. Расчетами установлено, что при нагрузке, превышающей расчетную на 20 %, в опорном раскосе напряжения достигают предела текучести, что способствует повышению деформативности системы при последующих шагах загрузки. Это хорошо прослеживается по зависимости прогибов узлов от действующей нагрузки (рис. 2). Как видно из графиков, при нагрузке 1,3 от расчетной за счет развития пластических деформаций в опорном раскосе прогибы конструкции в узле № 21 достигают предельной величины. Таким образом, при достижении этого значения нагрузки конструкция становится непригодной к нормальной эксплуатации вследствие развития больших деформаций.

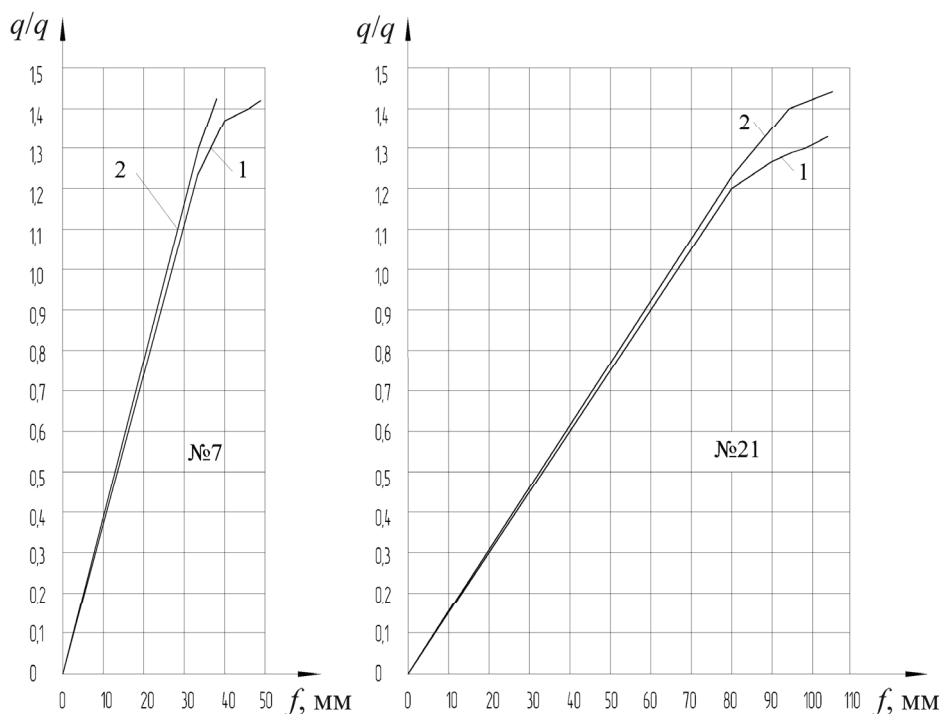


Рис. 2. Зависимость прогибов узлов от действующей нагрузки

При дальнейшем увеличении нагрузки сжатый раскос 10–15 (см. рис. 1) достигает напряжений потери устойчивости. Как отмечалось ранее, усилие с потерявшего устойчивость стержня сбрасывается и перераспределяется на соседние элементы. Большая часть его передается на сжатый раскос 10–14, вследствие чего он также теряет устойчивость, приводя конструкцию к разрушению.

Таким образом, наиболее напряженными элементами структурного блока являются раскосы торцевой фермы и центральная панель крайнего продольного нижнего пояса.

Рассмотрим один из возможных вариантов повышения эффективности конструкции за счет усиления отдельных элементов торцевой фермы, не нарушая унификации системы. Проведем расчет усиленной системы, допуская развитие пластических деформаций в наиболее нагруженных панелях растянутого продольного нижнего пояса. Графики прогибов узлов № 7, 21 конструкции показаны на рис. 2, кривая 1 соответствует прогибам структуры без усиления; кривая 2 – с учетом усиления. При сопоставлении этих графиков видно, что незначительное усиление структурного блока способствует существенному уменьшению деформативности конструкции, приводя к пропорциональному развитию прогибов практически до 1,4 от расчетной нагрузки.

Дальнейшее нагружение системы показывает, что стержень 14–20 теряет устойчивость и в центральной панели среднего нижнего пояса начинают развиваться пластические деформации. Распространение текучести на соседние пояса вызывает более быстрое возрастание прогибов, особенно в начальных точках текучести. После следующего малого этапа нагружения прогибы резко увеличиваются, поэтому перегрузка конструкции на 40 % может быть принята за предельную.

Выводы:

1. Показана возможность резкого повышения до 30 % несущей способности конструкции за счет работы отдельных элементов структурного блока типа «ЦНИИСК» размерами 24 × 12 м за пределами упругости.

2. Некоторое усиление торцевой фермы (увеличение массы блока на 1 %), не нарушая унификации системы, допускает увеличение нагрузки на 10 %.

3. Проведенные расчеты с использованием различных диаграмм работы стали показали, что небольшие изменения диаграммы весьма мало влияют на конечные результаты прогибов

и распределение усилий в системе. Поэтому при расчете подобных систем могут быть применены усредненные диаграммы для металла, применяемого в конструкции.

Библиографический список

1. Бегун Г.Б. Устойчивость стержней в пространственных стержневых конструкциях // Строительная механика и расчет сооружений. – 1972. – № 2. – С. 15–19.
2. Структурные конструкции из прокатных профилей / В.И. Трофимов, Ю.С. Мкрчанц, Э.В. Третьякова [и др.] // Промышленное строительство. – 1974. – № 8. – С. 6–12.

Получено 26.04.2011