

# РАБОТА СТАЛЬНЫХ МНОГОЭТАЖНЫХ РАМ С УЧЕТОМ ФИЗИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ ПО ДЕФОРМИРОВАННОЙ СХЕМЕ.

Д.В. Купченко, А.А. Мешанинов (ОГАСА, г. Одесса)

В последнее время, для расчета прочности стальных рам, получила дальнейшее развитие методика учета неупругой работы стали в изгибаемых стержневых конструкциях на основе критерия ограниченных пластических деформаций [1].

В предлагаемой статье рассматривается расчет плоских двухэтажных рам с целью определения возникающего в них перераспределения усилия при работе некоторых сечений стержней за пределом упругости, а также при учете деформированной схемы.

В основе решения поставленной задачи лежит метод последовательных приближений с возобновлением заданной величины интенсивности пластических деформаций  $\epsilon_{ip}$  на каждом шаге итерационного процесса [2]. Основным достоинством способа возобновления ограниченных пластических деформаций является обеспечение сходимости процесса расчета за пределом упругости при уменьшении количества необходимых итераций. Предлагаемый способ эффективен при использовании метода перемещений для определения усилий, возникающих в сечениях стержней рамы. Для возможности использования метода перемещений при расчете физически и геометрически нелинейной системы на каждом шаге итерации рассматриваемая система принимается линейной при фиксированных значениях скорректированных коэффициентов системы канонических уравнений.

При расчете известными являются схема рамы, сечения ее элементов, физические свойства материала и заданная нагрузка, величина которой изменяется пропорционально одному параметру, так чтобы максимально загруженные сечения работали при ограниченных пластических деформациях  $\epsilon_{ip,lim}$ . Расчет первой итерации выполняется в предположении неограниченно упругой работы материала. Находится предельный уровень усилий  $M_{i,lim}$ ,  $N_{i,lim}$ , при котором с учетом физической нелинейности материала в наиболее напряженной точке этого сечения достигаются предельные деформации  $\epsilon_{ip,lim}$ . Нагрузка корректируется коэффициентом  $\lambda_{min}^{(k)}$  определяемым на каждом шаге итерационного процесса и, в конечном итоге, она изменяется на произведение всех указанных коэффициентов. а сам коэффициент  $\lambda_{min}^{(k)}$  в ходе расчета будет стремиться к единице.

$$\lambda_{min}^{(k)} = M_{k,lim} / M_k^{max}$$

Все усилия, полученные в предыдущей итерации, умножаются на коэффициент  $\lambda_{min}^{(k)}$  и в сечениях, где напряжения превышают расчетное сопротивление материала, по программе "Сечение" выполняется их упругопластический расчет.

Для определения изменения жесткостей сечений, работающих за пределом упругости, вводится предположение о сохранении законов распределения некоторых напряжений, справедливых в пределах упругости [3]. Так как внутренняя работа изгибающего момента равна его произведению на приращение кривизны оси стержня, то коэффициент изменения изгибной жесткости  $\alpha_M$  равен

$$\alpha_M = (\epsilon_{ed} - \epsilon_{et}) / (\epsilon_{epd} - \epsilon_{ept}),$$

где  $\epsilon_{ed}$ ,  $\epsilon_{et}$  - полные деформации в нижней и верхней частях сечения в пределах упругости;  $\epsilon_{epd}$ ,  $\epsilon_{ept}$  - то же, за пределом упругости, которые получаем по программе "Сечение".

Физическая нелинейность в данном расчете учитывается поправочным коэффициентом  $\alpha_M$  к моменту инерции сечения, зависящим от увеличения податливости сечений, работающих за пределом упругости.

Геометрическая нелинейность учитывается корректировкой коэффициентов канонических уравнений, которые выражают влияние усилий, полученных при учете деформированной схемы.

Изменение жесткостей отдельных элементов стержневой системы влечет за собой изменение реактивных моментов и опорных реакций от единичных поворотов и смещений, а также грузовых эпюр. В стержнях с переменной жесткостью, сечения которых работают в области ограниченных пластических деформаций, происходит перераспределение усилий, ведущее к выравниванию эпюры изгибающих моментов. В связи с вышеуказанным меняются коэффициенты матрицы жесткости и вектор нагрузки в системе канонических уравнений метода перемещений. Поэтому на каждом шаге расчета необходимо заново вычислять реактивные моменты и опорные реакции от всех видов перемещений для построения единичных эпюр и измененные грузовые эпюры. Эту задачу необходимо решать только для тех элементов стержневой системы, сечения которых работают в области ограниченных пластических деформаций, так как в указанных стержнях поменяется жесткость. Это легко осуществить, рассматривая каждый из этих стержней как заделанную по концам балку. Для нахождения усилий в каждом элементе, удовлетворяющем вышеперечисленным требованиям, решаем систему канонических уравнений метода сил, коэффициенты которой из-за переменной жесткости сечений по длине элемента определяем по формуле Симпсона, при этом, если необходимо учесть деформированную схему стержней рассматриваемой конструкции, в вектор нагрузок включаются дополнительные слагаемые. Учет деформированной схемы требует расчета по предложенной схеме для всех элементов стержневой системы, даже если не все из них будут работать в упругопластической стадии работы материала. Предложенная методика расчета применима как для иско-

стальных, так и для бистальных сечений, формирующих элементы стержневой системы. Расчет можно считать окончанным, когда коэффициент  $\lambda_{min}^{(k)}$ , корректирующий нагрузку, будет близок к единице с заданной точностью.

По приведенной методике расчета был проведен ряд расчетов многопролетных, многоэтажных рам с жестким закреплением элементов в узлах. В процессе расчета каждый из элементов рамной конструкции разбивался на пятьдесят отрезков. Такое количество разбиений с достаточной точностью позволило определить те сечения стержней, в которых материал работает в упругопластической стадии.

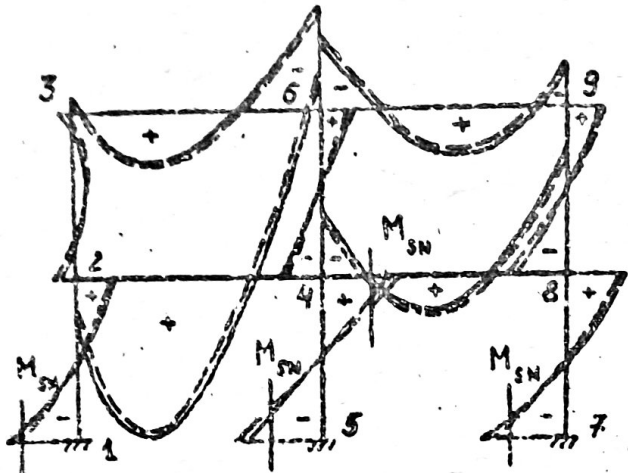


Рис. I. Эпюры изгибающих моментов до и после перераспределения усилий в двухэтажной двухпролетной раме.

На рис. I штриховой линией изображена эпюра изгибающих моментов от конечной нагрузки в предположении неограниченно упру-

гой работы материала рамы. Сплошной линией показана эпюра изгибающих моментов, полученная из расчета рамы по критериям ограниченных пластических деформаций с учетом деформированной схемы. Уровень наибольших изгибающих моментов в пределах упругости показан сплошной линией

. В этом расчете пластические деформации ограничивались величиной  $\epsilon_{ip,lim} = 0,4\%$ . В результате исследования работы этой рамы выделились четыре участка стержней, работающих в упругопластической стадии. Все они находились на стойках первого этажа. Первый из них, составляющий 0,02 длины стойки, находился на опоре стержня 1-2, где пластические деформации равны  $\epsilon_{ip} = 0,02\%$ . Два участка, составляющие общей сложностью 0,28 длины стержня, появились в средней стойке 4-5 по ее концам. Пластические деформации на обоих этих участках достигли предельной величины. Еще один упругопластический участок, составлявший 0,08 от всей длины стержня, развивался на опоре правой стойки, где пластические деформации почти достигли предельной величины и равнялись  $\epsilon_{ip} = 0,39\%$ .

Перераспределение изгибающих моментов по расчету рамы с учетом физической и геометрической нелинейности для сечений, испытывающих максимальное напряжение, в каждом стержне составило от 0,22% до 19,7%.

Полученные результаты показывают необходимость учета физической и геометрической нелинейности при расчете плоских стальных стержневых

систем с жесткой заделкой элементов в узлах, так как это приводит к выравниванию элтр изгибающих моментов и к увеличению равнопрочности конструкции в целом.

Практически расчеты прочности плоско загруженных рам, на основе методики исследования работы рам с учетом физической нелинейности и деформированной схемы, предлагается выполнять в форме непосредственной проверки интенсивности пластических деформаций, используя предельное неравенство

$$\varepsilon_{\varphi} \leq \varepsilon_{\varphi, \text{lim}}$$

Использование критерия ограниченных пластических деформаций позволило решить поставленные задачи для САПР и оказалось полезным для анализа конструкций благодаря итерационному процессу с хорошей сходимостью, удерживающему систему на малых отклонениях от линейного поведения. Вместе с тем за границей реализации установленного уровня пластических деформаций у конструкции остаются небольшие энергетические ресурсы сопротивления.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернов Н.Л., Стрелецкий Н.Н., Любаров Б.И. Расчеты стальных конструкций на прочность по критериям ограниченных пластических деформаций // Известия вузов. Строительство и архитектура. - 1984. - № 7. - С. 1-9.
2. Чернов Н.Л. Расчет стальных изгибаемых конструкций способом последовательного возобновления ограниченных пластических деформаций // Известия вузов. Строительство и архитектура. - 1985. - № 9. - С. 17-21.
3. Рекомендации по расчету стальных конструкций на прочность по критериям ограниченных пластических деформаций // 2-е изд. - М.: ЦНИИпроект-стальконструкция им. Н.П. Мельникова, 1985. - С. 48.