

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОГИБОВ И
РАЗГРАНИЧЕНИЯ ОБЛАСТИ РАСЧЕТА НА ПРОЧНОСТЬ И
ЖЕСТКОСТЬ СТЕРЖНЕЙ ПРИ ИЗГИБЕ С ПРОДОЛЬНОЙ
СИЛОЙ С УЧЕТОМ ДЕФОРМИРОВАННОЙ СХЕМЫ В
ОБЛАСТИ ОГРАНИЧЕННЫХ ПЛАСТИЧЕСКИХ
ДЕФОРМАЦИЙ

Vyacheslav Shebanin, Nikolaj Veremeenko, Ivan Khilko

Mykolayiv State Agrarian University, Ukraine

Krylova Street 17, Mykolayiv 54040, Ukraine

Аннотация. Разработана методика и программа на ПЭВМ расчета прочности бистальных конструкций при изгибе с продольной силой с учетом деформированной схемы в области ограниченных пластических деформаций. В результате расчета получена эпюра изгибающих моментов, корректировочные коэффициенты ν и величина прогибов по всей длине стержня.

Ключевые слова: Пластическая деформация, деформированная схема, прогиб стержня, изгибающий момент, продольная сила.

ВСТУПЛЕНИЕ

Расчет конструкций является одним из основных этапов проектирования. Как известно, проектирование начинают с разработки конструктивной схемы сооружения. И только после того, как установлены основные генеральные размеры сооружения, конструктивная форма элементов и способы их сопряжения, переходят к расчету конструкций.

Цель расчета – проверка прочности, устойчивости и жесткости предварительно намеченной конструктивной схемы сооружения с уточнением размеров элементов и их сечений. При этом приходится решать две противоречивые задачи. С одной стороны, конструкции должны быть экономичными, т.е. иметь минимальный расход материалов, низкие затраты труда на их изготовление и монтаж. С другой – необходимо обеспечить надежность

конструкций и их безотказную работу на весь период эксплуатации с определенными резервами, которые должны учитывать случайные превышения нагрузок, непредусмотренные отклонения свойств материала, отличие действительной работы конструкций от теоретической модели, принимаемой при расчете.

Расчет сооружений и их элементов производят на основе методов сопротивления материалов и строительной механики. В результате расчета определяют внутренние усилия и перемещения, возникающие в конструкциях под действием приложенных нагрузок. В настоящее время с развитием вычислительной техники нет принципиальных трудностей рассчитать любую сложную конструкцию с необходимой для практики степенью точности. Вместе с тем методы сопротивления материалов и строительной механики не дают ответа на следующие вопросы:

- какие нагрузки принимать для расчета конструкций;
- с чем сравнивать полученные при расчете усилия (напряжения) и перемещения;
- как учесть различия (неадекватность) в работе идеализированной теоретической модели и фактической конструкции;
- как оценить надежность конструкции и обеспечить ее бесперебойное функционирование в течение всего срока службы.

Ответы на эти и другие вопросы должна дать методика расчета конструкций.

АНАЛИЗ ПРЕДЫДУЩИХ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Решающий вклад в развитие методики расчета металлических конструкций внес выдающийся российский ученый, чл.-корр. АН СССР Н.С. Стрелецкий [Стрелецкий Н.С. 1940, 1952, 1956]. Поставленные им исследования позволили выявить изменчивость ряда нагрузок, свойств стали, а также степень соответствия расчетной схемы действительной работе конструкций. На основании этих исследований были повышены допускаемые напряжения, т.е. снижены коэффициенты запаса. Обоснованность такого решения была в дальнейшем подтверждена практикой эксплуатации зданий и сооружений.

Цель расчета строительных конструкций – обеспечить заданные условия эксплуатации и необходимую прочность при минимальном расходе материалов и минимальной затрате труда на изготовление и монтаж. Строительные конструкции рассчитывают на силовые и другие воздействия, определяющие их напряженное состояние и деформации, по предельным состояниям.

Метод расчета по предельным состояниям впервые был разработан в Советском Союзе в 50-е годы. Целью метода является не допускать с определенной обеспеченностью наступления предельных состояний при эксплуатации в течение всего заданного срока службы конструкции здания или сооружения, а также при производстве работ.

Под предельными состояниями подразумевают такие состояния, при которых конструкции перестают удовлетворять заданным эксплуатационным требованиям или требованиям при производстве работ.

В расчетах конструкций на действие статических и динамических нагрузок и воздействий, которым они могут подвергаться в течение строительства и заданного срока службы, учитываются следующие предельные состояния:

первой группы - по потере несущей способности и (или) полной непригодности к эксплуатации конструкций;

второй группы - по затруднению нормальной эксплуатации сооружений.

Принцип расчета конструкций по предельным состояниям был принят в СССР в 1955 году при утверждении 1-го издания Строительных норм и правил и в настоящее время является включенным в основу стандарта ИСО [ISO 6897. 1984] и системы еврокодов [ISO ST 2394. 1994]. В связи с этим при рассмотрении работы стальных та бистальных элементов конструкций значительный интерес вызывает методика расчета по предельным состояниям первой группы – по непригодности к эксплуатации в следствие развития пластических деформаций.

Деформационная природа большинства предельных состояний, включая предельное состояние по прочности, впервые была установлена Н.С. Стрелецким [Стрелецкий Н.С. 1971, 1975], в настоящее время признана за основные положения проектирования строительных конструкций [СНиП II-A.10-71. 1972]. Пересмотру норм проектирования стальных конструкций в связи с переходом на новый критерий прочности предшествовала работа по совершенствованию главы [СНиП II-23-81*. 1991] в части расчетов стальных конструкций на прочность, которая регламентировала использование критерия ограниченных пластических деформаций [Рекомендации. 1985].

Недостатком данных положений является использование для расчета прочности сжато (растянуто) – изогнутых стержневых элементов конструкций недеформированной схемы, которая не учитывает искривления начальной оси стержней, что имеет место в реальных условиях и влияние прогиба на величину эксцентриситета продольного усилия, который изменяет значение изгибаемого момента

Существующие нормы СНиП II-23-81* рекомендуют выполнять расчет стальных конструкций, как правило, с учетом неупругих деформаций и позволяют учитывать пластические деформации только при действии статических нагрузок с некоторыми ограничениями. Таким образом значительная часть элементов конструкций, которые работают под статическими нагрузками рассчитывается только в пределах упругости, а расчет бистальных конструкций за пределами упругости вообще нормами не предусмотрен, хотя расчетные сопротивления зависят от марок стали и толщины листа.

Тема работы обусловлена необходимостью последующего развития и усовершенствования теории расчета прочности и устойчивости бистальных стержней по деформационному критерию в виде ограничения пластических деформаций в случае сжатия (растяжения) с изгибом с учетом деформированной схемы, что открывает дополнительные пути экономии металла и дает возможность последующего усовершенствования методов расчета металлических конструкций.

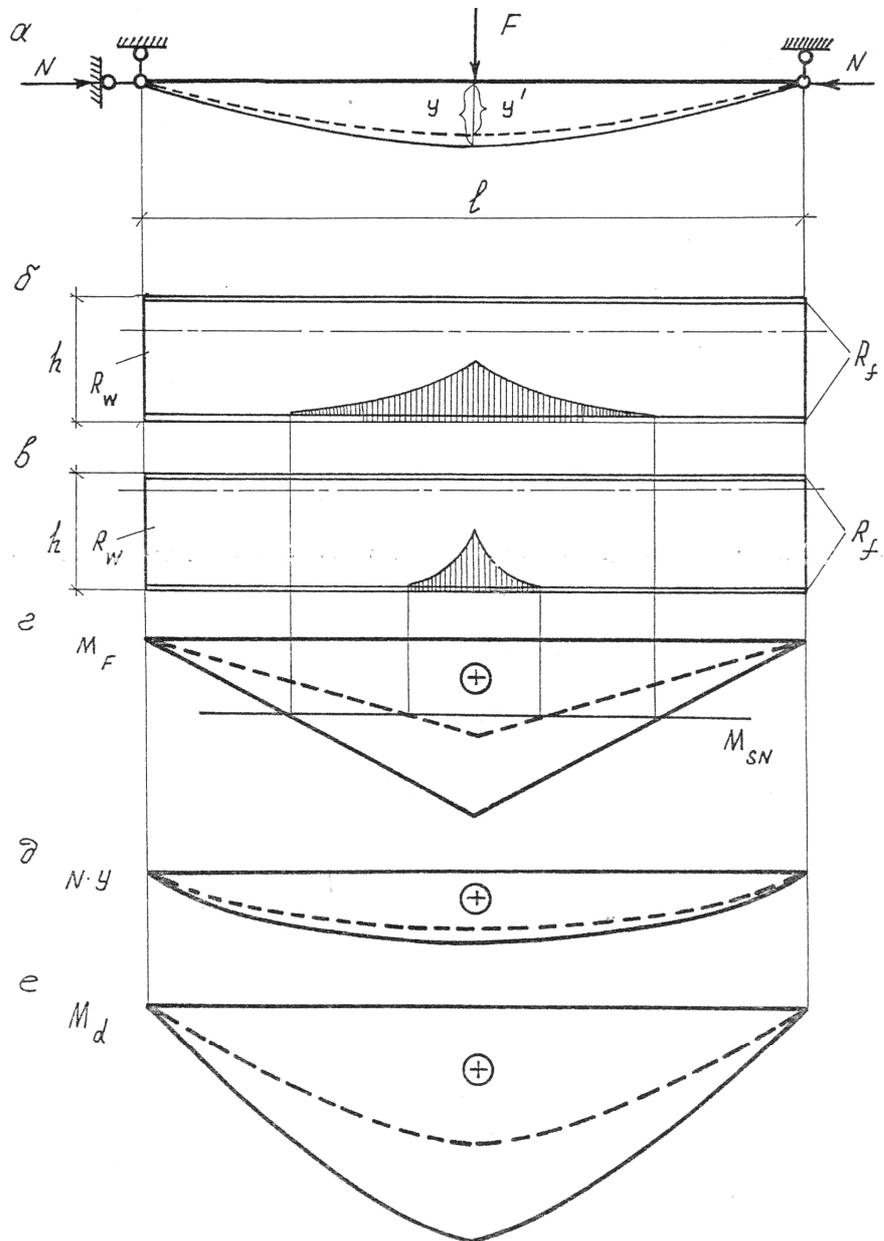


Рис. 1. Особенности расчета бистальных и моностальных стержней
 Fig. 1. Features of calculation of bistalnih and monosteel bars

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Для расчета прочности по деформационному критерию в виде ограничения интенсивности пластических деформаций в случае сжатия (растяжения) с поперечным изгибом необходимо учитывать влияние прогиба на величину эксцентриситета продольного усилия, который изменяет значение изгибаемых моментов – увеличивает их в случае сжатия с изгибом, и уменьшает значение изгибаемых моментов при растяжении с изгибом. Учет данное влияние путем введения корректирующего коэффициента ν равного отношению наибольшего изгибаемого момента, определенного по деформированной схеме к соответствующему наибольшему моменту, определенному по недеформированной схеме от того же нагружения в виде продольной силы N и поперечной силы P . Как предельное состояние стержня по непригодности к эксплуатации принимается достижение в наиболее напряженном сечении предельной пластической деформации при определении усилий по деформированной схеме.

Расчитывая прочность стержней будем использовать следующий критерий прочности – ограничения пластической составляющей интенсивности деформации [Рекомендации. 1980] величиной $\varepsilon_{ip,lim} = 0.002$. Заданный критерий значительно расширяет область конструкций, которые рассчитываются при работе материала за пределами упругости.

При разработке методики расчета прочности стержней нужно также учитывать отличия в работе бистальных двутавровых сечений при наличии продольной силы, по сравнению с моностальными сечениями которые приводят к появлению разных кривизн продольной оси стержня и, соответственно, к разным прогибам стержня. Появление разных прогибов внецентренно-сжатых и внецентренно-растянутых стержней, которые изготовлены из одной или двух марок стали, приводит к разному поведению их при работе в области ограниченных пластических деформаций с учетом деформированной схемы.

На рис.1 показаны особенности работы бистального и моностального стержня двутаврового сечения. Стержни отличаются один от одного только расчетными сопротивлениями материала поясов: R_f – для бистального стержня, R_w – для моностального, причем $R_f > R_w$.

Оба стержня нагружены одинаковыми продольными силами (рис.1,а). Поперечное нагружение определяется из условия развития в наиболее напряженном сечении предельной пластической деформации $\varepsilon_{ip,lim}$ с учетом деформированной схемы и для бистального стержня оно больше, чем для моностального. Зона развития пластических деформаций в бистальных (рис.1,б) и моностальных (рис.1,в) стержнях определяется уровнем изгибаемого момента M_{SN} – максимального в пределах упругости (рис.1,г). При этом текучесть возникает в моностальном стержне позже и зона упруго-пластической работы в нем значительно меньше. В этой связи прогибы в бистальном стержне больше чем прогибы моностального стержня, что приводит при одинаковых продольных силах к разным величинам моментов M_x , которые вызваны искривлением оси стержня с учетом влияния деформированной схемы при расчете бистального и моностального стержня. На рис.1,д эпюра N_y в моностальном стержне показана

штриховой линией, в бистальном – сплошной. Расчетные эпюры изгибаемых моментов найдены с учетом их физической и геометрической нелинейности, приведенные на рис.1,е (штриховая линия соответствует эпюре в моностальном стержне, сплошная - в бистальном).

Отличия в поведении моностальных и бистальных стержней указывают на необходимость изучения работы бистального стержня в области ограниченных пластических деформаций с учетом деформированной схемы.

Для решения поставленной задачи в работе предлагается такой подход. Используя геометрические размеры стержня и действующих сил, была построена математическая модель стержня. Затем на ПЕОМ с заданной заранее точностью проводился расчет этой модели со следующим изменением стрелы прогиба стержня, пока он не занимал равновесного положения в зависимости от размеров и действующих нагрузок.

В результате проведенных расчетов с учетом деформированной схемы получается эпюра изгибаемых моментов, корректирующие коэффициенты ν и величины прогибов по всей длине стержня. Полученные коэффициенты ν используются в дополнение как уточнение формулы для проверки прочности с учетом деформированной схемы [Шебанин В.С. 1993]:

$$\frac{N}{A_F + A_2 \cdot \frac{R_W}{R_F}} \pm \frac{M_X \nu}{C_{NX} \cdot I_X} y \leq R_F \cdot \gamma_C ,$$

где C_{Nx} - коэффициент который учитывает ограниченное развитие пластических деформаций, γ_C - коэффициент условий работы стержня.

Как видно из формулы, в соответствии с разработанной методикой, соответствующее изменение изгибаемых моментов происходит с помощью умножения их на специальные корректирующие коэффициенты ν , которые и учитывают влияние прогиба на величину эксцентриситета продольного усилия.

Для получения корректирующих коэффициентов ν в формуле необходимо использовать точную кривую взаимодействия изгибаемых моментов и продольных усилий.

Для этого необходимо используя известные геометрические размеры стержня, заданную продольную силу, диаграмму работы материала и схему нагружения, рассчитать с учетом деформированной схемы максимальную величину поперечного нагружения, при котором в наиболее напряженном сечении достигаются предельные пластические деформации. Для этого исходная недеформированная ось стержня разбивается на некоторое число отрезков. И в каждом сечении по краям указанных отрезков строятся упруго-пластические эпюры нормальных напряжений и находятся величины изгибаемых моментов.

При этом принимаются следующие основные предположения расчета конструкций в области ограниченных пластических деформаций:

- деформационная теория пластичности;
- энергетическое условие текучести;
- идеализированная диаграмма Прандтля;
- гипотеза плоских сечений;

- сохранение при работе сечения за пределами упругости распределения касательных напряжений, полученных из расчета в пределах упругости;
- пренебрежение толщиной полок.

Ввиду сложности исследования упруго-деформированного состояния сжато-изогнутых и растянуто-изогнутых стержней в области ограниченных пластических деформаций по деформированной схеме и большим объемом вычислений, предложенная методика ориентирована на автоматизированный расчет на ПЕОМ.

Учитывая вышеприведенные предположения при заданных геометрических размерах стержня, величине продольной силы и схемы нагружения разработан алгоритм расчета прочности сжато(растянуто)–изогнутых моно- и бистальных стержней симметричного та асимметричного сечения с учетом деформированной схемы по критерию ограниченных пластических деформаций.

Рассмотрим более детально особенности предложенного алгоритма расчета прочности бистальных стержней асимметричного сечения:

1. В исходных данных необходимо задать :

- длину стержня l ;
- высоту стенки сечения стержня h ;
- число $m = 2n$ разбиений оси стержня на отрезки для дискретного расчета;
- площади полок A_1, A_3 и площадь стенки A_2 сечения;
- расчетные сопротивления материала стенки R_w и полок R_f ;
- предельную величину пластической деформации $\varepsilon_{ip,lim} = 0.002$;
- величину продольной силы N ;
- схему нагружения стержня с указанием величины нагружения P ;
- условие закрепления стержня на концах.

Расчет выполняется итерационным методом.

2. Для того, чтобы построить исходную эпюру изгибаемых моментов, из упруго-пластического расчета сечения стержня при заданной величине продольной силы N , определяется максимальный изгибаемый момент M_{lim} в наиболее нагруженном сечении стержня, в котором величина пластических деформаций принимает свое предельное значение $\varepsilon_{ip,lim}$. Для нахождения максимального изгибаемого момента M_{lim} необходимо использовать характерные случаи упруго-пластического расчета сечения стержня для обратной задачи [Шебанин В.С. 1993]. На первом шаге итерационного процесса искомая эпюра изгибаемых моментов по деформированной схемой $M_{d,i}$ полагается равной предельной эпюре моментов M , которая определена по недеформированной схеме, при выполнении условия, что $M^{max} = M_{lim}$.

3. На следующем этапе определяются те сечения, в которых величина изгибаемого момента $M_{d,i}$ превышает значение наибольшего момента M_{SN} , который вычислен в пределах упругости при действии силы N согласно условия $M_{SN} < M_{d,i} < M_{lim}$, где i – номер сечения стержня при работе материала в области ограниченных пластических деформаций; а значение наибольшего

момента: M_{SN} , вычисленного в пределах упругости определяется согласно формулы:
$$M_{SN} = R_F \cdot W_X \pm \frac{N \cdot R_F}{(A_1 + A_3) \cdot R_F + A_2 \cdot R_W},$$
 где: W_x – осевой момент сопротивления.

4. Для определение деформаций в сечениях, которые работают в пластической области решается прямая задача, то есть задача определения деформаций в сечениях при заданном изгибаемом моменте. При этом используется итерационный алгоритм последовательных приближений, который базируется на методе деления отрезка пополам [Шебанин В.С. 1993]. Таким образом в каждом сечении с помощью итерационного метода, строится эпюра нормальных напряжений σ_i , с учетом всех возможных при решении прямой задачи характерных случаев, которая удовлетворяет с необходимой точностью условиям равновесия с заданной продольной силой N и изгибаемым моментом $M_{d,i}$ в соответствующем i -м сечении в котором имеет место текучесть материала.

Для построения указанной эпюры нормальных напряжений:

– выбирается соответствующая предельная эпюра нормальных напряжений;

– на первом шаге итерационного процесса наибольшая величина пластической деформации в сечении считается равной величине $\varepsilon_{ip}^{(1)} = \frac{\varepsilon_{ip,lim}}{2}$. По

этой пластической деформацией решается обратная задача, в которой определяются фиктивные напряжения в верхней и нижней частях стенки с учетом пропорциональности деформаций и напряжений в области ограниченных пластических деформаций, которые потом ограничиваются пределом текучести материала в соответствующих точках сечения, и определяется величина изгибаемого момента M_{ip} за полученной эпюрой упругодеформированного состояния, которое на каждом шаге последовательных приближений сравнивается с соответствующим значением действительного момента $M_{d,i}$. В случае, когда $M_{d,i} > M_{ip}$ величина пластических деформаций в следующей итерации

изменяется в сторону увеличения за счет добавления значения $\varepsilon_{ip}^{(1)} = \frac{\varepsilon_{ip,lim}}{2^k}$, где

k – номер итерации, если же $M_{d,i} < M_{ip}$ – то в сторону уменьшения на аналогичное значение. Итерационный процесс деления отрезка пополам заканчивается при достижении необходимой точности. По полученным данным строится эпюра нормальных напряжений σ_i .

5. Используя эпюры нормальных напряжений в каждом i -том сечении, имеющему текучесть материала, определяются полные кривизны $\chi_i = (\varepsilon_{Hi} - \varepsilon_{Bi})/h$, где ε_{Hi} и ε_{Bi} – крайвые относительные деформации, соответственно снизу и сверху сечения, взятые со своими знаками. При работе материала стержня в пределах упругости (т.е. при $M_{d,i} \leq M_{SN}$) полная кривизна

сечения определяется по формуле $\chi_i = M_{d,i}/(EI)$, где E – модуль упругости Юнга; I – момент инерции.

6. С помощью метода Мора вычисляются величины полных прогибов $y_i = \int_0^l \overline{M}_i \chi dl$, $i = 1, 2, n-1$ [Щербина Н.И. 1978], где \overline{M}_i – эпюра изгибаемого момента от единичной нагрузки, которое прикладывается в рассматриваемом i – том сечении стержня по направлению искомого прогиба. Применение метода Мора обеспечивается сохранением гипотезы плоских сечений и определением кривизны исходя из упругого ядра. Для приближенного вычисления указанного интеграла воспользуемся формулой Симпсона, которая с учетом этого, что $\overline{M}_{i,0} = \overline{M}_{i,m} = 0$ дает следующее выражение для вычисления полных прогибов [Веремеенко Н.А. 1987]:

$$y_i = \frac{2\Delta\ell}{3} \left(\sum_{k=1}^{n-1} \overline{M}_{i,2k} \cdot \chi_{2k} + 2 \sum_{k=1}^n \overline{M}_{i,2k-1} \cdot \chi_{2k-1} \right),$$

$$\Delta\ell = l/m \quad (m = 2n), \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (y_0 = y_n = 0).$$

7. Вносятся изменения в вид предыдущей эпюры изгибаемых моментов $M_{d,(k-1)}$ (k – номер итерации) с использованием эффективного метода последовательных приближений – возобновления предельной величины пластических деформаций [Чернов Н.Л. 1985] на каждом шаге итерационного процесса, который сводится к требованию, чтобы в наиболее нагруженном сечении стержня изгибаемый момент $M_{d,(k)}^{max}$, определенный с учетом деформированной схемы равнялся бы предельному моменту M_{lim} .

Соответствующие эпюры изгибаемых моментов для разных случаев приведены в [Шебанин В.С. 1993]. Главным преимуществом метода возобновления предельной величины $\varepsilon_{ip,lim}$ является обеспечение сходимости процесса расчета за пределами упругости при значительном уменьшении количества необходимых итераций (в рассмотренных примерах сходимость вычислительного процесса обеспечивалась при выполнении 3-4 циклов), за счет того, что на каждом шаге последовательных приближений создается состояние стержня близкое к окончательному.

Возобновление величины $\varepsilon_{ip,lim}$ происходит за счет изменения значения искомой предельной нагрузки при определении усилий по деформированной схеме, а это вызывает за собой изменение эпюры изгибаемых моментов M_{ip} от поперечной силы. Максимальный изгибаемый момент от поперечной силы M_p^{max} в наиболее нагруженном сечении стержня находится таким образом $M_p^{max} = M_d^{max} + Ny^*$. При этом y^* – прогиб в наиболее нагруженном сечении (если посередине стержня, то $y^* = y^{max}$) и y^* принимается положительным, если стержень изгибается вправо (то есть за направлением действия поперечных нагрузок), иначе прогиб y^* – отрицательный. У формуле для нахождения прогиба y значение продольной силы N берется со своим знаком, то есть

значение сжимающей продольной силы берется со знаком "минус", а растягивающей – со знаком "плюс".

По найденному значению M_p^{max} строится вся эпюра $M_{p,i}$ от поперечных нагрузжений, и как результат получается эпюра изгибаемых моментов $M_{d,i}$, определенная с учетом деформированной схемы $M_{d,i} = M_{p,i} - M_{N,i}$. Таким образом, результирующая эпюра изгибаемых моментов $M_{d,i}$ с учетом действующих нагрузжений является суммой эпюр изгибаемых моментов от сосредоточенных нагрузжений $M_{p,i}$ и моментов $M_{N,i} = N \cdot y_i$, которые возникают от продольной силы в результате геометрической нелинейности нагруженного стержня.

8. На следующем этапе выполняется сравнение с заданной точностью δ относительной разницы двух приближений максимальных прогибов, и расчет повторяется, начиная с п.3 тех пор, пока не будет выполняться неравенство $\left| \left(y_{(k)}^{max} - y_{(k-1)}^{max} \right) / y_{(k)}^{max} \right| < \delta$, где $k, k-1$ – номера соответственно последней и предпоследней итерации.

9. После завершения итерационного процесса вычисляются корректирующие коэффициенты ν как отношения наибольшего изгибаемого момента M_d^{max} , определенного с учетом деформированной схемы при ограниченных пластических деформациях к соответствующему изгибаемому моменту от аналогичного нагружения за недеформированной схемой $\nu = M_d^{max} / M_{max}$. Так как $M_d^{max} = M_{lim}$ и $M^{max} = M_d^{max} + N y^*$, то отсюда следует, что корректирующие коэффициенты $\nu > 1$ при сжатии (при этом $M^{max} < M_d^{max}$) и $\nu < 1$ при растяжении ($M^{max} > M_d^{max}$).

10. Для проверки выполнения условий второго предельного состояния определяется относительный прогиб стержня f/l , который затем сравнивается с заданным нормативным значением в зависимости от назначения стержня. Расчет проводится до получения таким предельным нагрузок, при которых значение относительного прогиба не превышало бы заданного значения нормативного прогиба стержня, т.е. до выполнения условия $f/l \leq [f/l]$. Это достигалось за счет пропорционального изменения продольной силы N и поперечной силы P .

11. Выполняется печать полученных результатов. Предложенный алгоритм дает возможность рассчитывать не только бистальные стержни асимметричного сечения. При необходимости расчета бистальных симметричного сечения в исходных данных площади полков задаются равными, то есть $A_1 = A_3$. Для расчета моносталяного стержня асимметричного сечения необходимо положить, что расчетные сопротивления полков и стенок равны, то есть $R_f = R_w$. При расчете моносталяных стержней симметричного сечения принимают $A_1 = A_3$ и $R_f = R_w$.

Данный алгоритм реализован на алгоритмическом языке СИ на ПЕОМ. В результате выполненных расчетов получены таблицы корректирующих

коэффициентов γ к формулам упруго-пластического расчета прочности по критерию ограниченных пластических деформаций, полученные раньше без учета деформированной схемы.

Таблица . Корректирующие коэффициенты ν для моно- та бистальных стержней симметричного та асимметричного сечения

Table. Correcting coefficients for mono- that bisticalnih bars of symmetric that asymmetric section

Схема нагружения	N	M, B	$\frac{A_2}{A_1}$	$\frac{A_3}{A_1}$	N/N_{lim}					
					0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
1 сила	-	М	1	1	1.010	1.016	1.026	1.035	1.045	1.057
	-	М	1	0.5	1.009	1.017	1.028	1.038	1.050	1.074
	-	Б	1	1	1.010	1.021	1.032	1.044	1.056	1.070
	-	Б	1	0.5	1.012	1.024	1.035	1.048	1.062	1.083
	+	М	1	1	0.992	0.984	0.977	0.968	0.960	0.951
	+	М	1	0.5	0.991	0.981	0.973	0.962	0.952	0.943
	+	Б	1	1	0.990	0.979	0.970	0.961	0.951	0.941
	+	Б	1	0.5	0.989	0.978	0.966	0.955	0.944	0.932
2 сили	-	М	1	1	1.015	1.030	1.048	1.070	1.095	1.127
	-	М	1	0.5	1.017	1.041	1.055	1.072	1.099	1.130
	-	Б	1	1	1.016	1.034	1.053	1.074	1.098	1.125
	-	Б	1	0.5	1.018	1.038	1.055	1.078	1.101	1.119
	+	М	1	1	0.984	0.971	0.954	0.935	0.912	0.879
	+	М	1	0.5	0.984	0.966	0.947	0.924	0.898	0.865
	+	Б	1	1	0.984	0.966	0.951	0.931	0.907	0.870
	+	Б	1	0.5	0.981	0.962	0.943	0.918	0.885	0.855
Равномерное	-	М	1	1	1.012	1.027	1.040	1.056	1.075	1.100
	-	М	1	0.5	1.013	1.029	1.042	1.062	1.082	1.104
	-	Б	1	1	1.014	1.029	1.045	1.063	1.081	1.101
	-	Б	1	0.5	1.016	1.032	1.048	1.067	1.087	1.114
	+	М	1	1	0.999	0.976	0.962	0.949	0.933	0.914
	+	М	1	0.5	0.986	0.972	0.957	0.941	0.922	0.899
	+	Б	1	1	0.986	0.973	0.959	0.944	0.929	0.901
	+	Б	1	1	0.984	0.968	0.952	0.935	0.918	0.898

В соответствии с предложенной методикой рассчитывались моно- и бистальные стержни симметричного и асимметричного сечения длиной $l = 12m$ с разными схемами нагружения при величине предельных деформаций $\varepsilon_{ip,lim} = 0,002$.

Результаты проведенного расчета систематизированы в таблице, в которой используются следующие обозначения :

– значение сжимающей продольной силы N обозначено знаком “-”, растягивающей силы N – знаком “+”;

- моностальные стержни обозначены буквой “М”, бистальные – буквой “Б”;
- вид сечения стержня (симметричный или асимметричный) задается соотношениями A_2/A_1 и A_3/A_1 ;
- величина продольной силы N указана соотношением N/N_{lim} , где $N_{lim} = (A_1 + A_3)R_f + A_2R_w$.

Из приведенной таблицы коэффициентов ν , вычисленных для предельной величины пластических деформаций $\varepsilon_{ip,lim} = 0.002$ видно, что учет деформированной схемы существенно влияет на величину изгибаемых моментов, сравнительно с расчетами, выполненными по недеформированной схеме.

Используя разработанную программу, были проведены расчеты для исследования несущей способности бистальных стержней за пределом упругости симметричного и асимметричного сечения длиной $l = 6$ м, 9 м, 12 м, 15 м, 18 м, 21 м при нагружении их сосредоточенной поперечной силой P в сочетании с продольной силой N , где $N = n \cdot N_{lim}$, n принимает значение -0.7; -0.6; ...; 0; ...; 0.6; 0.7 и $N_{lim} = (A_1 + A_3)R_f + A_2R_w$, которые вызывали достижение предельной пластической деформации в наиболее напряженном сечении.

В соответствии с предложенной методикой было выполнено разграничение границ расчета сжато-изогнутых стержней на две области: первая – область в которой расчет выполняется на проверку прочности, вторая – в которой расчет выполняется на проверку жесткости. Для этого при заданных значениях геометрических параметров сечения, расчетных сопротивлений материала и величине пластической деформации $\varepsilon_{ip,lim} = 0.2\%$ выполнялся расчет стержней средней гибкости λ в границах от 30 до 75, которые наиболее широко используются. Для этого вначале определялся относительный прогиб стержня f/l , который затем сравнивался с заданным нормативным значением в зависимости от назначения стержня. Расчет проводился до получения необходимой продольной силе N , при которой относительный прогиб f/l стержня не превышал бы заданного значения нормативного прогиба, т.е до выполнения условия $f/l \leq [f/l]$.

Данный расчет был выполнен для трех схем нагружения стержней симметрического сечения, относительный прогиб которых был ограниченный нормативными величинами $\frac{1}{200}, \frac{1}{300}, \frac{1}{400}$, и его результаты отображены на рис.2, где для всех точек размещенных над соответствующим графиком расчет должен выполняться за первым предельным состоянием – на прочность, так как жесткость обеспечена, а для всех точек размещенных ниже графика расчет в первую очередь должен выполняться за вторым предельным состоянием – на жесткость. Увеличение жесткости вызывает вместе с собой и увеличение прочности стержня. Данное увеличение жесткости можно проводить за счет изменения величины сечения, или за счет изменения площади поперечных сечений. В зависимости от схемы нагружения соответствующие области изменяют свои размеры.

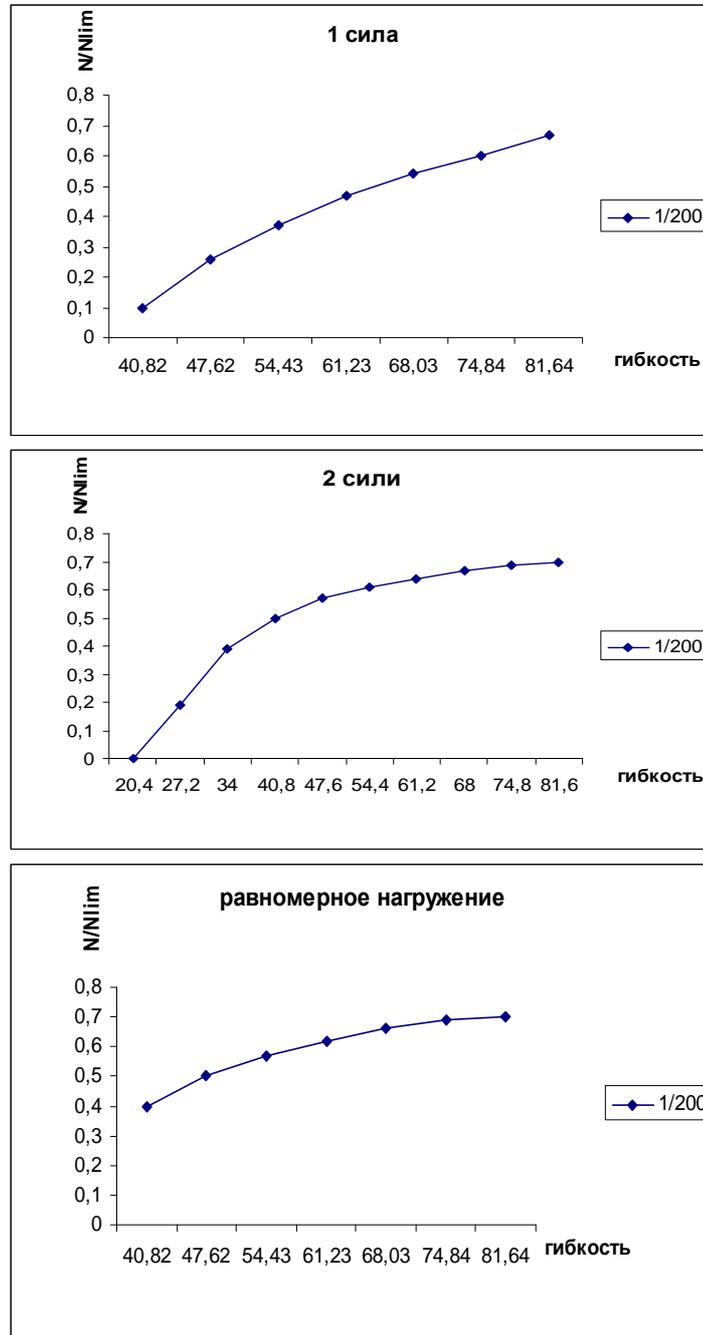


Рис. 2. Разграничение областей по расчету на прочность и жесткость
Fig. 2. Differentiation of regions upon settlement on durability and inflexibility

Для получения достоверных данных, которые можно бы было рекомендовать для практического использования, были проведены экспериментальные исследования действительной работы сжато-изогнутых стержней в области ограниченных пластических деформаций. Испытания моделей бистальных стержней симметричного сечения на изгиб проводились на установке, которая признана изобретением [А.С. N 1020772 (СССР). 1983]. Испытывались сварные двутавры со следующими размерами сечения: площадь полок – 2 см², площадь стенки – 1 см², высота сечения – 5 см. Длины стержня – 100 см, расчетные сопротивления: $R_f = 3400 \text{ кгс} / \text{см}^2$. Проведенные исследования показали, что теоретические и экспериментальные деформации в упругой области практически совпадают. За пределами упругости опытные кривые проходят выше теоретических, что указывает на некоторый запас прочности. Полученные в процессе эксперимента значения прогибов были также меньше теоретических, а это указывает и на некоторый запас жесткости.

ВЫВОДЫ

1. Анализ теоретических и экспериментальных исследований согласно разработанной методики расчета прочности бистальных стержней с учетом физической и геометрической нелинейности показал, что при расчете прочности сжато (растянуто) – изогнутых бистальных стержней по критерию предельных пластических деформаций необходимо учитывать влияние деформированной схемы.
2. Влияние деформированной схемы значительно расширяет область работы стали и при растяжении с изгибом приводит к экономии стали, а при сжатии с изгибом приводит к увеличению надежности и равнопрочности металлических конструкций.
3. Разработанная методика исследования несущей способности бистальных стержней при продольно-поперечном изгибе путем расчета их математических моделей на ПЕОМ позволяет получить упругодеформированное состояние стержня, вычислить значение деформаций и прогибов по всей длине стержня с учетом деформированной схемы в области ограниченных пластических деформаций при разных схемах нагружения стержня.
4. Предложенная методика дает практическую возможность разграничения областей расчета на прочность и на жесткость с учетом деформированной схемы.
5. Экспериментальные исследования действительной работы сжато (растянуто) – изогнутых бистальных стержней за пределом упругости полностью подтвердили полученные теоретические результаты и предпосылки, которые были положены в основу разработанного метода расчета несущей способности бистальных стержней.

ЛИТЕРАТУРА

Богза В.Г., Чернов Н.Л., Шебанин В.С.: 1983. А.С. N 1020772 (СССР). Установка для испытания материалов / Авт. изобр.– Оpubл. в Б.И., N 20.

- СНиП II-A.: 10-71.: 1972. Строительные конструкции и основания. Основные положения проектирования. – М.: Стройиздат. – С. 4-9.
- СНиП II-23-81*.: 1991. Стальные конструкции. Нормы проектирования /Гостстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя. – 96 с.
- Веремеенко Н.А.: 1987. Прочность сжато-изогнутых и растянуто-изогнутых стальных стержней при ограниченных пластических деформациях. Кандидатская диссертация, Одесса.
- Стрелецкий Н.С.: 1940. Исследование металлических конструкций. – М.– Л.: Стройиздат. – 156 с.
- Рекомендации по расчету элементов стальных конструкций на прочность по критерию предельных пластических деформаций. 1980. – М.: ЦНИИпроектстальконструкция. С. 3–13.
- Рекомендации по расчету стальных конструкции на прочность по критериям ограниченных пластических деформаций. 1985. – 2-е изд. – М.: ЦНИИПроектстальконструкция им. Н.П. Мельникова. – 48 с.
- Стрелецкий Н.С.: 1952. Основы методики расчета сооружений по предельным состояниям. – Строительство. – №9. – С. 8–15.
- Стрелецкий Н.С.: 1956. Материалы к курсу строительных конструкций. Работа стали в строительных конструкциях. – М.: Госстройиздат. – В.1. – С. 152–161.
- Стрелецкий Н.С.: 1975. Избранные труды: Сб. статей под ред. Е.И. Беленя. – М.: Стройиздат. – С. 242–256.
- Стрелецкий Н.С.: 1971. К вопросу развития методики расчета по предельным состояниям //Развитие методики расчета по предельным состояниям. Сб. статей под ред. Е.И. Беленя. – М.: Стройиздат. – С. 257-262.
- Шебанин В.С.: 1993. Прочность изгибаемых стальных стержневых конструкций при учете физической и геометрической нелинейности в области ограниченных пластических деформаций. Докторская диссертация, Одесса.
- Шебанін В.С., Богза В.Г., Хилько І.І.: 2000. Математична модель розрахунку прогинів стержнів в області обмежених пластичних деформацій при складному опорі. Українська асоціація по металевим конструкціям. //Металеві конструкції. Том 1, №1. – С.45-48.
- Шебанін В.С., Хилько І.І.: 2003. Аналітичні залежності розрахунку прогинів стержнів при складному опорі за межею пружності //Металеві конструкції, 6, №1. – С.31-33.
- Шебаніна Л.П., Хилько І.І.: 2007. Експериментальні дослідження роботи бісталевих стержнів симетричного перерізу за межею пружності. //Вісник аграрної науки Причорномор'я, вип. 1(39). – Миколаїв. – С. 229-234.
- Щербина Н.И.: 1978. Определение прогибов в стальных балках при подвижных нагрузках в области малых пластических деформаций. - Известие вузов. Строительство и архитектура. N 4. С. 14–19.
- Чернов Н.Л.: 1985. Расчет стальных изгибаемых конструкций способом последовательного возобновления ограниченных пластических деформаций. – Известия вузов. Строительство и архитектура, N 9. С. 17–21.
- ISO 6897: 1984. Guidelines for the evaluation of the response of occupants of fixed structures, especially buildings and off-shore structures, to low-frequency horizontal motion (0,063 to 1 Hz), – International Organization of Standardizing, Geneva, Swi.
- ISO ST 2394: 1994. General Principles on Reliability for Structures. – 50 p.
- Cichon Czeslaw.: 1984. Large displacements in plane analysis of elastic-plastic frames

//Comput. And Struct. – 19. – №5-6. – P. 737-745.

Griffiths D.V.: 1988. An iterative method for plastic analysis of frame //Comput. And Struct. – v. 30. – №6. – p. 1347-1354.

Scholz H.: 1984. A rational method to allow for overall stability in low rise plastically designed steel away frames //Civ. Eng. S. Afr. – v. 26. – № 6. – P. 279-281, 283-285, 287.

STRENGTH OF BI-STEEL BARS WHEN BENT BY A LONGITUDINAL FORCE
WITH THE ACCOUNT OF DEFORMATION SCHEME UNDER LIMITED
PLASTIC DEFORMATIONS

Summary. The methods and the computer program of the strength calculation of the bi-steel structures when bent by a longitudinal force with the account of the deformation scheme under the limited plastic deformations have been elaborated. The calculations made it possible to receive the envelope of the bending moments, the correcting factors and the deflection meaning along the whole length of the bar.

Key words: plastic deformation, deformation scheme, bar deflection, bending moment, longitudinal force.

Reviewer: Valeriej Budak, Prof. Sc. D. Eng.