

ПРОЧНОСТЬ СТЕРЖНЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ОБЛАСТИ ОГРАНИЧЕННЫХ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ПОВТОРНО-ПЕРЕМЕННОМ НАГРУЖЕНИИ

Елена Цепурит¹, Николай Веремеенко²

¹*Николаевский национальный аграрный университет,
Ул. Парижской Коммуны, 9, Николаев, Украина, e-mail: helena_cepurit@mail.ru*

²*Международный классический университет «Украина-Юг»,
Ул. Котельная, 2, Николаев, Украина, e-mail: oksv_nik@mail.ru*

Elena Cepurit¹, Nikolaj Veremeenko²

¹*Nkolaev National Agrarian University,*

St. Paris Commune, 9, Nikolaev, Ukraine, e-mail: helena_cepurit@mail.ru

²*International classical University "Ukraine-South", e-mail: oksv_nik@mail.ru*

St. Kotelnaya, 2, Nikolaev, Ukraine,

Аннотация. Для проверки и усовершенствования методики расчета прочности стержневых элементов металлических конструкций при повторно-переменных погрузках в области ограниченных пластических деформаций с учетом деформированной схемы выполнены теоретические и экспериментальные исследования действительной работы стержней за пределом упругости с целью выяснения возможности повышения нагрузок, которые воспринимаются, и снижения затрат стали при использовании методики, которая предлагается.

С учетом теоремы об упругом характере разгрузки рассмотрены характерные случаи остаточного напряженно-деформированного состояния перереза при действии разных комбинаций внешних усилий и следующем. Для исследования прочности стержневых элементов использовалась методика учета физической и геометрической нелинейности и построение матриц жесткости моно и бистальных стержней с использованием метода переменных параметров, а также методы аппроксимации при нахождении аналитических зависимостей, которые характеризуют величину прогибов в соответствии с точкой приложения сосредоточенной силы. Практическая методика расчета прочности моно-и бистальных стержней реализует принцип сохранения традиционного вида формул, используемых в упругой стадии работы, с дополнением системой корректирующих коэффициентов, соответствующих взаимодействию различных комбинаций изгибающего момента и продольной силы.

Уменьшение жесткости некоторой части длины стержня, на которой развиваются пластические деформации, приводят к изменению реактивных усилий по концам стержня, а также при нагрузке в виде сосредоточенной силы, к общепринятым эпюрам изгибающих моментов в основной системе метода сил достаточно добавить эпюру изгибающих моментов от продольной силы. При этом – прогибы стержня при смещении его концов на единицу и, где – прогибы стержня в остальных указанных случаях. По разрабо-

танной методике и вычисляются коэффициенты для корректировки матрицы жесткости стержня с учетом физической и геометрической нелинейности. В качестве тестовой задачи были вычислены коэффициенты при очень малых значениях пластических деформаций, которые практически совпали с известными значениями для упругой работы материала. Скорректированные матрицы жесткости могут быть использованы для расчета стержневых систем методом перемещений как по недеформированной схеме, так и с учетом деформированной схемы при ограниченном развитии пластических деформаций.

Ключевые слова: деформированная схема, ограниченные пластические деформации.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Важнейшими задачами в области строительства является достижение высокой экономичности сооружений и конструкций и в то же время обеспечение их надежности при эксплуатации. Одним из главных направлений для их решения является учет возможности снижения расхода металла в строительных конструкциях на стадии проектирования и совершенствование методов расчета инженерных сооружений по предельным состояниям. В связи с этим целью работы является теоретическое и экспериментальное обоснование расчета прочности сжато-согнутых и растянуто-согнутых стальных стержневых элементов строительных конструкций с учетом деформированной схемы по критерию ограниченных пластических деформаций, а также разработка для использования в практике проектирования методики расчета стержневых элементов конструкций при действии повторных нагрузок.

Объектом исследования является напряженно-деформированное (с учетом остаточных напряжений) состояние сечений стержневых элементов в области ограниченных пластических деформаций, а также прочность стержневых элементов при сложном сопротивлении и повторных нагрузках с учетом дефор-

мированной схемы. Предметом исследования выбрана работа сжато - и растянуто-согнутой стержневых элементов статически определенных и неопределенных систем (балочных и рамных конструкций) под воздействием повторных нагрузок.

В основу разработанных методов расчета на прочность стержневых элементов с учетом физической и геометрической нелинейности в области ограниченных пластических деформаций и повторных нагрузок положены экспериментальные методы, опробованные на специальной установке, предназначенной для испытания моделей элементов стальных конструкций, методы классической механики и итерационные методы.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Аналізу расчета конструкций по предельным состояниям посвящены работы ряда авторов.

Начало исследования повторной погрузки стержневых элементов в области упруго-пластической работы было положено в трудах [1]. Разрабатывая теорию приспособления стальных конструкций за пределом упругости, М.Д. Жудин приводит методику определения теоретических значений деформаций стальных балок в упруго-пластической стадии, а также результаты экспериментального исследования деформаций и прогибов. Им было проведено испытание однопрогонных и двухпрогонных балок прямоугольного сечения на статическую нагрузку и повторную нагрузку с постоянной и переменной схемой нагружения. На основе теоретического и экспериментального исследования им сделан вывод о том, что повторная нагрузка не приводит статически неопределенную конструкцию к разрушению, если основная система остается неизменной, и напряжения в ней не превышают предел текучести.

Случай многократной нагрузки балок исследовался [2] для случая чистого изгиба и [3] для случая изгиба с поперечной силой, причем авторами сделан вывод о невозможности накопления остаточных деформаций при изгибе. Б.М. Броуде выдвинул гипотезу о замыкании пластического шарнира в стенке независимо от напряженного состояния поясов. Используя теорию малых упругих деформаций, он разложил деформации на упругую и пластичные составляющие.

Необходимо отметить, что при исследовании работы металлических конструкций по критерию ограниченных пластических деформаций, например, в [4, 5, 6, 7] и других трудах используется положение об одинаковом виде зависимости интенсивности напряжений-деформаций при изгибе и при получении этой зависимости из опытов на одноосное растягивание, то есть при равномерном поле напряжений.

Кроме линейной зависимости, связь между деформациями и напряжениями в пластичной зоне предоставляется в криволинейном виде [8, 9, 10], а именно: $\sigma = \sigma_e \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_e} \right)^m$ где: σ и ε - значения напряжений и деформаций на нелинейных участках диаграмм, σ_e и ε_e - пределы пропорциональности для этих вели-

чин. Надаи А.[10] предоставляет показателю степени роль константы, которая равняется: $m = \frac{\varepsilon_B}{1 + \varepsilon_B} \approx \Psi_B$, где:

ε_B и Ψ_B - соответственно относительные удлинения и поперечное сужение, которые отвечают началу образования шеек на образцах, которые растягиваются.

В работе [11] выполнен анализ напряженно-деформированного состояния отдельных элементов линии электропередачи (проводов, тросов, металлоконструкций опор, фундаментов), и разработанная методика расчета опор на обтяжках по деформированной схеме. В проведенных исследованиях [12] учтено нелинейное изменение напряженно-деформированного состояния оболочки многопролетных покрытий мембранного типа, необходимый учет изменения напряженно-деформированного состояния оболочки осуществляется корректировкой результатов расчета традиционной расчетной схемы с помощью коэффициентов, сведенных в специальные таблицы. Предоставлено алгоритмы формирования матриц жесткости элементов, приведены методы обследования и выполнения экспериментальных исследований мембранных конструкций.

В работе [13] разработана методика определения напряжений от кручения при ограниченных пластических деформациях, предоставлены результаты эксперимента на неравно - полочному двутавре. Автором получен коэффициент:

$$k_n = \frac{\sigma_{теор}^y}{\sigma_{ym}} = 1,24, \quad (1)$$

который отображает отношения максимальных нормальных напряжений, которые были вычислены теоретически по упругой модели, к максимальным нормальным напряжениям по эксперименту с учетом упруго-пластической работы. Сделан вывод о том, что проверку прочности по эквивалентным напряжением в разных точках сечения следует проводить по условию: $\sqrt{(\sigma_x + \sigma_y)^2 + 3(\tau_{xy} + \tau_y)^2} \leq R_{y,c}^* k_n$,

где: при упругом расчете $k_n = 1$ для краевых точек поясов, при расчете с учетом упруго-пластической работы $k_n = 1,24$. Для повышения надежности в запас предлагается применить коэффициент, приведенный в СНиП п.14* и принять $k_n = 1,15$, что отвечает относительной деформации $\varepsilon = 0,0017$. Исследования докритической работы стальных стержней по деформированной схеме с предельным состоянием при достижении ограниченных пластических деформаций проводились [14,15,16]. Коллективом этих авторов под руководством [16] было спроектировано и создано оборудование для испытания разнообразных стальных конструкций на повторные нагрузки за пределом упругости. Предусмотрена возможность испытания, как отдельным подвижным грузом, так и разными системами связанных между собой грузов. На оборудовании проведены неоднократные испытания разнообразных балок и рам при различных уровнях нагрузки, начиная с площадки текучести [17].

Предлагается известную теорию пластичных шарниров, для которой является типичным выравнивание

моментов, заменить методом контролируемой адаптации. Сущность контролируемой адаптации состоит в искусственном повышении предела текучести на некоторую величину, то есть в введении в упругий расчет коэффициента адаптации, который определяется, как отношение предельного изгибающего момента к упругому моменту и отвечает относительно удлинению 0,11. В работах рассмотрены деформации балок, которые подлежат изгибу, а также приведены примеры результатов экспериментальных исследований балок с разной формой сечений при переменных нагрузках.

В результате анализа работ, посвященных указанной тематике, сделан вывод о целесообразности дальнейшего исследования докритической работы сжато-согнутых стержней (стержневых систем) при повторной нагрузке с учетом деформированной схемы в области ограниченных пластических деформаций.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для реализации цели, которая поставлена, необходимо решить следующие задачи:

1. Провести теоретическое исследование напряженно-деформированного состояния сечений стальных и бистальных стержней при повторной нагрузке при сложном сопротивлении и упруго-пластичной работе.
2. Разработать методику расчета прочности стержневых элементов металлических конструкций при повторных нагрузках в области ограниченных пластических деформаций с учетом деформированной схемы.
3. Выполнить экспериментальное исследование действительной работы стержней за границей упругости при повторной нагрузке для выяснения возможности повышения нагрузок, которые воспринимаются и снижения затрат стали при использовании методики, которая предлагается.
4. Разработать предложения по проектированию, а также составить программный продукт, который может быть использован в практике проектных организаций

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

При исследовании вопроса о приспособляемости элементов стержневых металлических конструкций, которые работают в области ограниченных пластических деформаций, рассматривалась задача определения напряженно-деформированного состояния сечений при повторной нагрузке различными комбинациями изгибающего момента и продольной силы.

Под повторной нагрузкой стержневых элементов конструкций, которые подлежат действию продольной и поперечной сил, будем понимать разгрузку и пропорциональное нагружение в одном направлении поперечной силой и изгибающим моментом.

Действительная диаграмма $\sigma - \varepsilon$ имеет криволинейную часть между пределом упругости и пределом текучести [18]. В случае учета деформированной схемы при расчете прочности сжато-согнутых и растянуто-согнутых стальных стержней нет необходимости делать в пластической зоне нелинейную аппроксима-

цию, поскольку идеализированная диаграмма Прандтля позволяет с достаточной степенью точности найти корректировочные коэффициенты к формулам упруго-пластичного расчета прочности, которые получены без учета деформированной схемы [19].

Следовательно, за диаграмму работы материала берется идеализированная диаграмма Прандтля, по которой зависимость напряжений от деформаций определяется как:

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon & \text{при } 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_T \\ \sigma_T & \text{при } \varepsilon_T \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{\text{lim}} \end{cases}, \quad (2)$$

где:

$$\varepsilon_{\text{lim}} = \frac{\sigma_T}{E} + \varepsilon_{ip,\text{lim}},$$

σ_T - предел текучести, который равняется расчетному сопротивлению R_y :

$$\varepsilon_T = \frac{\sigma_T}{E}, \quad E = 2,06 \cdot 10^5 \text{ МПа}.$$

Величина пластической составляющей деформации $\varepsilon_{ip,\text{lim}}$ принята по следующему утверждению: пластические составляющие деформации не больше 0,002 не влияют заметно на ударную вязкость и не ухудшают свойства стали; незначительная величина $\varepsilon_{ip,\text{lim}}$ обеспечивает возможность приспособления конструкций при подвижных и переменных нагрузках.

Расчет ведется для конструкций третьей группы, для которой $\varepsilon_{ip,\text{lim}} = 0,2\%$, что включает в себя конструкции балок покрытия и перекрытия, ригелей и стоек фахверков, конструкции, которые держат технологическое оборудование, ригели и колонны эстакад и так далее (кроме конструкций, которые относятся к четвертой группе).

Если в асимметричном сечении зона текучести достигает центра тяжести сечения, то возможна неупругая разгрузка сечения, которая при переменном нагружении может привести к постепенному росту деформаций. Анализ асимметричных сечений показал, что ограничение деформаций величиной $\varepsilon_{ip,\text{lim}}$ обеспечивает упругую разгрузку сечения.

Рассматривались стальные и бистальные стержни, имеющие симметричные и асимметричные двутавровые сечения, в случае, когда на стержень совместно действуют продольная (сжимающая или растягивающая) сила и изгибающий момент, при этом продольная сила в пределах и за пределами упругости приложена в центре тяжести сечения. Для исследования вопроса о приспособляемости стержня при повторной нагрузке рассматривалась задача расчета напряженно-деформированного состояния каждого, в том числе наиболее нагруженного перереза стержня. Учитывалось, что при действии внешних усилий в сечениях, которые имеют после разгрузки остаточные напряжения и деформации, дополнительные пластические деформации возникают при других значениях внешних усилий. В соответствии со статичной теоремой Блейха сечение приспособится к повторной нагрузке,

если остаточные напряжения в сумме с напряжениями от внешней нагрузки за предположением неограниченно упругой работы материала не превышают границы текучести материала. Алгоритм определения предельных значений внешних усилий, к которым приспособится сечение при повторной нагрузке, включает решение обратной задачи, то есть нахождение значения предельного момента в наиболее нагруженном сечении по заданной предельной пластической деформации на первом этапе нагрузки комбинацией продольной силы и изгибающего момента, а также построение эпюры напряженно-деформированного состояния сечений, определение напряжений, которые отвечают полной разгрузке и эпюр остаточных напряжений и деформаций; построение эпюр напряженно-деформированного состояния, которое отвечает повторной нагрузке внешними усилиями.

Первым этапом является решение обратной задачи нахождения предельного значения изгибающего момента при приложении сосредоточенной силы и сжимающей (растягивающей) продольной силы к стержневому элементу конструкции по условию достижения в наиболее нагруженном сечении заданной величины предельной пластической деформации $\varepsilon_{ip,lim}$. Для симметричных сечений справедливы все результаты, которые получены для асимметричных сечений, поэтому отдельно симметричные сечения не рассматриваются. При действии одного изгиба без продольной силы в симметричных сечениях нейтральная линия располагается в середине высоты стенки и не смещается при развитии пластических деформаций, в асимметричных сечениях нейтральная линия не совпадает с центром тяжести и, кроме того, изменяет свое положение при разных величинах пластических деформаций. При одновременном действии изгибающего момента и продольной силы симметричные и асимметричные сечения при развитии текучести работают таким образом, что нейтральные линии у них, как правило, не совпадают с центрами тяжести перереза и смещаются при изменении величины действующих усилий.

При расчете в качестве исходных данных приняты геометрические размеры сечений: A_1, A_2, A_3, h , где: A_1, A_3 - площади поясных листов (не нарушая общности, будем считать, что $A_1 \geq A_3$), A_2 - площадь стенки, h - высота стенки сечения; R_W - величина расчетного сопротивления (в дальнейшем будем считать, что $\sigma_T = R_W$); значение предельной пластической деформации $\varepsilon_{ip,lim}$. Обратной задаче отвечают характерные случаи напряженно-деформированного состояния сечений, которые отличаются один от другого текучестью или упругой работой поясов и частей стенки около поясов сечения [20].

Для определенности будем считать, что на первом этапе нагружения заданная величина пластической деформации достигается в верхних волокнах наиболее нагруженного сечения и вызвана действием сжимающей продольной силы N и изгибающим моментом M_1 .

Используя уравнение:

$$M = \int_A \sigma_x y dx,$$

которое дает величину внутренних моментов, можно найти величину предельного изгибающего момента, которая определяется из эпюры напряжений по формуле:

$$M_{lim} = \left| -A_1 R_W h - \alpha_1 A_2 R_W \left(1 - \frac{\alpha_1}{2} \right) h - \frac{1}{2} (1 - \alpha - \alpha_1) A_2 R_W \left(\alpha + \frac{2}{3} (1 - \alpha - \alpha_1) \right) h + \frac{1}{2} \alpha A_2 \sigma_H \frac{1}{3} \alpha h \right| + N h_H \quad (3)$$

где: h - высота сечения, R_W - предел текучести материала сечения:

$$h_H = (A_1 h + A_2 h / 2) / (A_1 + A_2 + A_3) -$$

расстояние от нижней полки до центра тяжести сечения, N - сжимающая продольная сила, приложенная в центре тяжести сечения, α - относительное расстояние от меньшей полки до нейтральной линии, α_1 - относительная длина распространения пластичности в сечении.

В соответствии с геометрическими характеристиками:

$$\alpha_1 = (1 - \alpha) (1 - R_W / \sigma_{lim}^f),$$

$$\sigma_H = \alpha \sigma_{lim}^f / (1 - \alpha),$$

$$\sigma_{lim}^f = R_W + E \varepsilon_{ip,lim}.$$

Для нахождения относительного расстояния нейтральной линии от меньшей полки используется условие равновесия внешних и внутренних усилий:

$$N = \int_A \sigma_x dA,$$

которая в данном случае приобретает вид:

$$-A_1 R_W - \alpha_1 A_2 R_W - R_W (\alpha - \alpha_1) A_2 / 2 + \sigma_H (1 - \alpha) A_2 / 2 + \sigma_H A_3 = N$$

или, учитывая формулы для нахождения: α_1 та σ_H ,

$$-A_1 R_W - (1 - \alpha) \left(1 - \frac{R_W}{\sigma_{lim}^f} \right) A_2 R_W - \frac{R_W^2 A_2}{2 \sigma_{lim}^f} (1 - \alpha) + \frac{\alpha}{2(1 - \alpha)} \sigma_{lim}^f \alpha A_2 + \frac{\alpha}{1 - \alpha} \sigma_{lim}^f A_3 = N$$

Отсюда получаем квадратное уравнение относительно α вида:

$$a(1 - \alpha)^2 + b(1 - \alpha) + c = 0,$$

где:

$$a = R_W^2 A_2 / (2 \sigma_{lim}^f) + A_2 \sigma_{lim}^f / 2 - A_2 R_W,$$

$$b = -(A_1 R_W + A_2 \sigma_{lim}^f + A_3 \sigma_{lim}^f + N),$$

$$c = A_3 \sigma_{lim}^f + A_2 \sigma_{lim}^f / 2.$$

Рассмотрим случай полной разгрузки сечения.

При нахождении эпюры остаточных напряжений как суммарной для эпюры первой нагрузки и эпюры разгрузки учитывается упругий характер процесса разгрузки, следовательно, остаточные напряжения в верхних волокнах стенки наиболее нагруженного перереза определяются по формуле:

$$\sigma_B^o = -R_W + (M_{lim} / W_x^B - N / A), \quad (4)$$

в нижних волокнах стенки сечения по формуле:

$$\sigma_H^o = \sigma_H + (-M_{lim} / W_x^B - N / A), \quad (5)$$

для точек сечения остаточные напряжения:

$$\sigma_i^o = \sigma_i^l + \sigma_i^2, \quad (6)$$

где: σ_i^l - напряжения в точках сечения, вызванные нагружением,
 σ_i^2 - упругой разгрузкой сечения.

Следовательно, остаточные напряжения в точках, которые расположены на расстоянии $h\alpha_1$ от верхней полки и на расстоянии $h\alpha_2$ от нижней полки равняются соответственно:

$$\sigma_{\alpha_1}^o = -R_W + \sigma_B^p (1 - \alpha_p - \alpha_1),$$

$$\sigma_{\alpha_2}^o = R_W + \sigma_H^p (\alpha_p - \alpha_2) / \alpha_p,$$

где: σ_B^p и σ_H^p - напряжение верхней и нижней частей стенки, α_p - положение нейтральной линии по эпюре полной разгрузки сечения.

При разгрузке только продольной силы остаточные напряжения в верхней части сечения стержня определяются как:

$$\sigma_B^o = R_W - \frac{N}{A},$$

и при упругой разгрузке нижней части сечения:

$$\sigma_H^o = \sigma_H - \frac{N}{A}.$$

При приложении на втором этапе нагружения заданной сжимающей (растягивающей) продольной силы N_2 и изгибающего момента M_2 для приспособляемости сечения необходимо, чтобы соответственно статической теореме суммарные напряжения в волокнах сечения не превышали разницу между расчетным сопротивлением и остаточными напряжениями. Поскольку в остаточной эпюре максимальные значения напряжений достигаются в точках перегиба, при приложении повторных усилий напряжения в этих точках могут превышать предел текучести, следовательно, проверке на выполнение условий статической теоремы о приспособляемости подлежат верхние и нижние волокна перереза, а также точки x_1 и x_2 , соответствующие наибольшим напряжениям в стенке сечения. Согласно этому для определения предельных значений изгибающего момента и продольной силы на втором этапе нагрузки используется итерационный алгоритм, который последовательно применяется для значений продольной силы: $N_2 = 0; \pm 0,1; \pm 0,2; \dots; \pm 0,9N_{2lim}$, где: N_{2lim} - предельная продольная сила, которая может быть приложена на втором этапе нагружения без нарушения условий приспособляемости сечения. Значение для сжимаю-

щей продольной силы складывает в случае односторонней текучести на первом этапе нагрузки:

$$N_{2lim}^S = (A_1 + A_2 + A_3)(-R_W - \sigma_{x_1}^o),$$

для растягивающей:

$$N_{2lim}^R = (A_1 + A_2 + A_3) \min(R_W - \sigma_B^o, R_W - \sigma_H^o),$$

и в случае двусторонней текучести на первом этапе нагрузки для сжимающей продольной силы.

$$N_{2lim}^S = (A_1 + A_2 + A_3) \min(-R_W - \sigma_{x_1}^o, -R_W - \sigma_H^o),$$

для растягивающей продольной силы:

$$N_{2lim}^R = (A_1 + A_2 + A_3) \min(R_W - \sigma_{x_2}^o, R_W - \sigma_B^o).$$

Максимальное значение предельного изгибающего момента, к которому приспособится сечение при заданном значении продольной силы, находится по итерационному алгоритму. На первом шаге приближенное значение момента, который ищется, берется по условию равенства суммарных напряжений в верхних волокнах сечения пределу текучести R_W , а именно:

$$M_2 = (-R_W - \sigma_B^o + N_2 / A) W_B.$$

По найденному изгибающему моменту M_2 находятся суммарные напряжения в точке x_1

$$\sigma_{x_1}^{sum} = \sigma_{x_1}^o \frac{M_2}{W_B} \cdot \frac{\alpha_N - \alpha_1}{\alpha_N}, \quad (7)$$

$$\text{где: } \alpha_N = \frac{|\sigma_B^{(2)}|}{|\sigma_B^{(2)} + \sigma_H^{(2)}|}. \quad (8)$$

и в случае превышения в этой точке предела текучести уменьшенное значение момента определяется методом деления пополам, то есть имеет место уменьшение изгибающего момента на величину $M_2 / 2^K$, где K - номер шага итерационного процесса при:

$$|\sigma_{x_1}^{SUM}| > R_W$$

или увеличение на величину $M_2 / 2^K$

$$\text{при: } |\sigma_{x_1}^{SUM}| < R_W.$$

Итерационный процесс прекращается при достижении заданной точности:

$$|\sigma_{x_1}^{SUM} - R_W| \leq \Delta.$$

Следующим этапом является проверка условия приспособляемости в точке x_2 для случая двусторонней текучести и в нижней части стенки перереза, причем в случае превышения границы текучести в точке x_2 корректировка значения M_2 проводится аналогично. В результате при условии:

$$\sigma_i^{SUM} = \sigma_i^o + \sigma_i^{(2)}, \quad (9)$$

где: $\sigma_i^{(2)}$ - напряжение от второй нагрузки в i -й точке сечения, может быть построена эпюра суммарных напряжений. Поскольку предельная пластическая деформация по условиям первой нагрузки достигается только в верхней части стенки сечения, целесообразным является допущение возможности распространения текучести в середину сечения. При этом для определения предельного изгибающего момента, который соответствует заданной продольной силе на втором этапе нагрузки, строится эпюра суммарных напряжений. Причем при превышении в критической

точке x_1 предела текучести, область пластической работы распространяется в направлении центра сечения, что сопровождается перемещением точки x_1 , положение которой определяется по итерационному алгоритму, который включает проверку условия равенства внутреннего момента моменту от внешней нагрузки. В результате область взаимодействия продольной силы и изгибающего момента увеличивается в сравнении с более строгим ограничением, которое устанавливается за статической теоремой Блейха.

В результате может быть определена область взаимодействия изгибающего момента и продольной силы, которые обеспечивают приспособляемость сечения на втором этапе нагружения. При сравнении остаточной эпюры, полученной на первом этапе нагрузки и разгрузки сечения предельным изгибающим моментом при заданных значениях продольной силы с эпюрами, полученными на последующих этапах нагружения, сделан вывод о том, что на четвертом и следующих шагах для такого вида усилий остаточная эпюра и значение предельного изгибающего момента практически не изменяются. На основе расчетов для других видов нагрузки также получены результаты, которые показывают на формирование неизменного поля самоуравновешенных остаточных напряжений, то есть область взаимодействия изгибающего момента и продольной силы, которое обеспечивает приспособляемость сечений, остается дальше неизменной для всех дальнейших циклов нагрузки. Для построения областей взаимодействия проводились расчеты в области ограниченных пластических деформаций стального сечения по следующим исходным данным: $A_1 = 100\text{см}^2$, $A_2 = 100\text{см}^2$, $A_3 = 100\text{см}^2$, $h = 100\text{см}$, $E = 2100000\text{кГ} / \text{см}^2$, $R_w = 2350\text{кГ} / \text{см}^2$. Заданные значения продольной силы составляли $N = 0; \pm 0,1; \pm 0,2; \dots; \pm 0,9N_{lim}$ при $N_{lim} = AR_w = 705000\text{кГ}$. Для приведенных данных при $|N| < 0,2N_{lim}$ эпюра напряженно-деформированного состояния при первой нагрузке отвечает случаю двусторонней текучести, при $0,2N_{lim} < |N| < 0,7N_{lim}$ - односторонней текучести, причем верхняя часть сечения работает на сжатие, нижняя - на растяжение, при $|N| > 0,7N_{lim}$ сечение работает на сжатие.

В таблице 1 приведено значение предельного изгибающего момента при заданных исходных данных и изменении продольной силы.

Таблица 1. Значение предельного изгибающего момента при заданных исходных данных и изменении продольной силы

Table 1. The value of the bending moment at the given input data and the change of the longitudinal force

$ N / N_{lim}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
M_{lim} ($\text{кН} \cdot \text{м}$)	28,4	26,1	23,1	19,9	16,8	13,6	10,2	6,9

Как случай односторонней текучести рассмотрим работу сечения при первой нагрузке силой $N = -0,1N_{lim}$ и следующей разгрузке и повторном приложении внешних усилий. Значение предельного изгибающего момента достигает $M_{lim} = 2842033\text{кГсм}$, нейтральная линия смещена относительно середины стенки в направлении нижней полки, причем относительное расстояние от нижней полки к нейтральной линии составляет $\alpha = 0,35$. Напряжения, которые образуются при упругой разгрузке сечения, составили в верхних волокнах стенки сечения $\sigma_B^p = 2670\text{кГ} / \text{см}^2$, в нижних волокнах стенки сечения $\sigma_H^p = -2201\text{кГ} / \text{см}^2$. Остаточные напряжения имеют значения в верхней части сечения $\sigma_B^o = 321\text{кГ} / \text{см}^2$, в нижней части сечения $\sigma_H^o = 148\text{кГ} / \text{см}^2$, в точках перегиба эпюры остаточных напряжений $\sigma_{\alpha_1}^o = -1709\text{кГ} / \text{см}^2$, $\sigma_{\alpha_2}^o = 718\text{кГ} / \text{см}^2$. Как случай наличия односторонней текучести, когда верхняя часть сечения работает на сжатие, нижняя часть - на растяжение возьмем работу стержня с аналогичными параметрами при $N = -0,4N_{lim}$. Предельное значение изгибающего момента составляет $M_{lim} = 22346138\text{кГсм}$, действительные напряжения в нижней части сечения $\sigma_H = 1637\text{кГ} / \text{см}^2$. После полной разгрузки остаточные напряжения в верхней части стенки составили $\sigma_B^o = 301\text{кГ} / \text{см}^2$, в нижней - $\sigma_H^o = 340\text{кГ} / \text{см}^2$, в точке перегиба эпюры остаточных напряжений $\sigma_{\alpha_1}^o = -1714\text{кГ} / \text{см}^2$.

Односторонняя текучесть с работой всего сечения на сжатие достигается при значении $N = -0,8N_{lim}$. Предельный изгибающий момент равен $M_{lim} = 7813346\text{кГсм}$, расчетные значения остаточных напряжений составили $\sigma_B^o = 124\text{кГ} / \text{см}^2$, $\sigma_H^o = 184\text{кГ} / \text{см}^2$, $\sigma_{\alpha_1}^o = -791\text{кГ} / \text{см}^2$.

Как наиболее характерный случай рассмотрим построение области взаимодействий изгибающего момента и продольной силы при второй нагрузке для случая нагрузки на первом этапе продольной силой $N = -0,4N_{lim}$ и указанным предельным изгибающим моментом. При использовании вышеприведенной методики было получено значение принимаемого без нарушения условия не превышения суммарными напряжениями расчетного сопротивления материала изгибающего момента, указанные в таблице 2.

Область взаимодействия продольной силы N и изгибающего момента M , которые обеспечивают приспособляемость сечения, строится согласно неравенствам:

$N_{lim}^s \leq N \leq N_{lim}^R$, $0 \leq M \leq M_{lim}$, где N_{lim}^s , N_{lim}^R , предельная сжимающая и предельная растягивающая продольные силы, M_{lim} - предельный изгибающий момент.

При проведении экспериментальных испытаний необходимо было получить следующие характеристики

1. Величины пластических деформаций в наиболее нагруженных волокнах образцов и стенки их рота при повторной нагрузке.
2. Распределение деформаций в наиболее нагруженных перерезах стержней.
3. Величины упруго-пластичных перемещений стержней, которые испытываются.

Таблица 2. Значение принимаемого без нарушения условия непревышения суммарными напряжениями расчетного сопротивления материала изгибающего момента

Table 2. Value taken without infringing the terms of exceedance of the total voltage resistance of the material calculated bending moment

$ N / N_{lim}$	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0,0	0,1	0,2
M_{lim} (кН · м)	19,9	22,7	25,4	26,2	27,4	26,3	25,2
N / N_{lim}	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
M_{lim} (кН · м)	23,4	22,1	20,1	18,9	8,63	5,97	3,21

Перемещения (прогибы) моделей стальных стержней измерялись в двух направлениях прогибомерами типа 6ПАО с ценой деления 0,01мм. Величины деформаций в наиболее нагруженных волокнах образцов измерялись специально сконструированными индикаторными тензодатчиками, которые позволяют прикреплять их в разных местах образца. Для указанных тензодатчиков применялись индикаторы с ценой деления 0,002мм и ходом штока 2мм, что на базе тензодатчика 20мм и соотношения плеча подвижного ножа относительно точки его вращения, равному 1: 10, позволяет измерять без перестановки прибора деформации до 1,2. Тарировка индикаторных тензодатчиков выполнялось на равностойкой балке и на специально приспособленном оптиметре. Индикаторными тензодатчиками измерялись деформации в краевых волокнах полка стержней двутаврового сечения, которое испытывалось [16].

В соответствии с целями, которые были поставлены перед экспериментальным исследованием, были спроектированы и изготовлены 28 моделей стержней длиной 900 мм.

Проведенные исследования показали, что теоретические и экспериментальные линии в упруго-пластической области незначительно отличаются в сторону запаса прочности.

ВЫВОДЫ

Анализ теоретических и экспериментальных исследований по разработанной методике расчета прочности моно- и бистальных стержней при повторном нагружении с учетом физической и геометрической нелинейности показал, что при расчете прочности сжато (растянуто) - согнутых стержней по критерию предельных пластических деформаций необходимо учитывать влияние остаточных напряжений и деформированной схемы. При растягивании с изгибом и растягивании с изгибом деформированной схемы при повторной нагрузке приводит к экономии стали, а при

сжатии с изгибом и сжатии к увеличению надежности.

Усовершенствованная практическая методика расчета прочности стержней при их продольно-поперечном изгибе по деформированной схеме в области ограниченных пластических деформаций применяется в виде проверки условных суммарных напряжений с учетом повторных нагрузок.

Теоретические исследования прочности моно- и бистальных стержней с учетом остаточного напряженно-деформированного состояния сечений показали приспособляемость стержневых элементов конструкций на каждом этапе повторной нагрузки в области ограниченных пластических деформаций.

Экспериментальные исследования работы стержней при повторных нагрузках за границей упругости на специальном оборудовании подтвердили полученные результаты и предположения, какие было положено в основу метода расчета.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Жудин П.Д. 1936.** Пластические деформации в стальных конструкциях. Ч.2. Стали без площадки текучести. Исследование работы сечения. К.: Изд-во АН УССР, 7-23.
2. **Ржаницын А.Р. 1954.** Расчет сооружений с учетом пластических свойств материала. М.: Госстройиздат, 287.
3. **Броуде Б.М. 1950.** Предельные состояния стальных балок. М.: Госстройиздат, 186.
4. **Богза В.Г., Веремеенко Н.А., Чернов Н.Л., Шебанин В.С. 1986.** Испытания прочности сжато-изогнутых стальных стержней с учетом развития ограниченных пластических деформаций. – Известия вузов. Строительство и архитектура. 1986. №11, 10-13.
5. **Чернов Н.Л., Стрелецкий Н.Н., Любаров Б.И. 1984.** Расчеты стальных конструкций на прочность по критериям ограниченных пластических деформаций. Известия вузов. Строительство и архитектура. №7, 1-9.
6. **Шебанин В.С. 1981.** Изгиб стальных и бистальных балок с осевой силой при ограниченных пластических деформациях. Теория и практика ремонта и модернизации судов. М., 73-77.
7. **Шебанин В.С., Веремеенко Н.А. 1986.** Прочность стальных стержней при изгибе с продольной силой при учете деформированной схемы и ограничении пластических деформаций. Известия вузов. Строительство и архитектура. №4, 13-17.
8. **Шалин В.Н. 1971.** Расчеты упрочнения изделий при их пластической деформации. М.: Машиностроение, 7-41.
9. **Безухов Н.И. 1968.** Основы теории упругости, пластичности и ползучести. М.: Высшая школа, 512.
10. **Надан А. 1954.** Пластичность и разрушение твердых тел. М.: Изд-во иностр. лит. Т. 1, 647
11. **Шевченко Е.В., 2001.** Оптимальное проектирование конструкций опор высоковольтных линий электропередачи: Автореф. дисс. д-ра техн. наук: 05.23.01. Одеса, 34.

12. **Горохов Е.В., В.П. Мушанов, В.Н. Васильев, А.А.Ягмур. 1991.** Обследование и испытание несущих конструкций зданий и сооружений. К., УМКВО, 156.
13. **Соловьев А.В. 1998.** Стесненное кручение стальных балок при развитии ограниченных пластических деформаций: Автореф. дисс. канд. техн. наук: 05. 23. 01. Самара, 23.
14. **Бурковский И.Д., Веремеенко Н.А., Лутченко С.А., Чернов Н.Л., Шебанин В.С. 1987.** Методика расчета прочности стальных стержней с учетом деформированной схемы. Информационный листок о научно-техническом достижении. №87. 1256. М.: ВИМИ, 34-46.
15. **Шебанин В.С. 1993.** Прочность изгибаемых стальных стержневых конструкций при учете физической и геометрической нелинейности в области ограниченных пластических деформаций. Докторская диссертация. Одесса, 452.
16. **Чернов Н.Л. 1985.** Расчет стальных изгибаемых конструкций способом последовательного возобновления ограниченных пластических деформаций. Известия вузов. Строительство и архитектура, 1985, № 9, 17–21.
17. **Шебанин В.С., Богза В.Г., Хилько И.И. 2000.** Математическая модель расчета прогибов стержней в области ограниченных пластических деформаций при сложном сопротивлении. Украинская ассоциация по металлическим конструкциям. Металлоконструкции. Том 1. № 1, 45-48. (Украина).
18. **Vyacheslav Shebanin, Nikolaj Veremeenko, Ivan Khilko. 2008.** 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. Motrol. 10B, 230-245.
19. **Шебанін В.С., Богза В.Г., Цепуріт О.В. 1999.** Теоретико-экспериментальное исследование робо-ты бистальных стержней симметричного сечения при повторно-переменных нагрузках за пределом упругости Металлические конструкции. Т. 2. № 1, 1999. 39-43. (Украина).
20. **Вячеслав Шебанин, Владимир Богза, Сергей Богданов. 2012.** Расчет вероятности отказов конструктивного элемента сборно-разборных легких металлических конструкций. Motrol. 14-№ 2, 164-167.

DURABILITY OF CORED ELEMENTS OF STEEL CONSTRUCTIONS IN AREA OF LIMIT FLOWAGES AT THE REPEATED VARIABLE LADENING

Summary. For verification and improvement of methodology of calculation of durability of the cored elements of metallic constructions at the repeatedly-variable loading in area of limit flowages taking into account the deformed chart experimental researches of actual work of bars are executed after a border a resiliency with the aim of finding out of possibility increases of loading, that is

perceived and decline of expense permanent at the use methodologies, that is offered.

Taking into account a theorem about resilient unloading character is considered characteristic cases of the remaining tensely-deformed state of cut at the action of different combinations of external efforts and following. For research of durability of the cored elements methodology of taking into account of physical and geometrical non-linearity and construction of matrices of inflexibility of bars was used with the use of in-out parameters, and also methods of approximation at being of analytical dependences that characterize the size of bending in accordance with the point of appendix of the concentrated force. Practical methodology of calculation of durability of bars will realize principle of maintenance of traditional type of the formulas used in the resilient stage of work, with addition the system of coefficients corresponding to cooperation of different combinations of flexion moment and central force Reduction of inflexibility of some part long bar, plastic develop on that, cause the change of reactive efforts on the ends of bar, and also at loading as force, to the generally accepted epures of moments in the basic system of method of forces it is enough to add the epure of flexion moments from central force. Thus are bending of bar at displacement of his ends on unit and, where are bending of bar in other indicated cases. On methodology coefficients are calculated for adjustment of matrix of inflexibility of bar taking into account physical and geometrical non-linearity. In test problem coefficients were calculated at the very small values of plastic, that practically coincided with known for resilient work of material. matrix of inflexibility can used for the calculation of the cored systems by the method both on the undeformed chart and taking into account the deformed chart at.

Key words: shem of deformation, limited plastic deformation.