

Леонид Головки
Брестский инженерно-строительный
институт

ВЛИЯНИЕ УПРОЧНЕНИЯ МАТЕРИАЛА НА УСТОЙЧИВОСТЬ ВНЕЦЕНТРЕННО СЖАТЫХ СТЕРЖНЕЙ ИЗ ЗАМКНУТЫХ ГНУТОСВАРНЫХ ПРОФИЛЕЙ

В сжатых элементах стержневых систем металлических конструкций эффективно применение замкнутых гнутосварных профилей (ЗГСП) в виде прямоугольных труб. Внецентренно сжатые и сжато-изогнутые стержни из ЗГСП имеют резервы несущей способности, которые объясняются, в частности, повышенными прочностными свойствами стали в зонахгиба за счет технологического упрочнения — наклепа, не учитываемого в настоящее время в расчетах.

Проблема учета упрочнения при потере устойчивости внецентренно сжатых шарнирно опертых стержней из ЗГСП изучалась в работах Я.А.Березинского [1], В.М.Деренковского и Г.Э.Бельского [2], А.Н.Козачковой [3]. Отмечается, что влияние упрочнения на несущую способность внецентренно сжатого стержня зависит от эксцентриситета приложения нагрузки, формы поперечного сечения и гибкости стержня. Учет повышения прочностных свойств стали в зонахгиба выполняется введением более высокого расчетного сопротивления материала всего профиля, учитывающего упрочнение, [1] или, что более справедливо, учетом фактической неравномерности прочностных свойств стали по сечению, рассматривая стержни из ЗГСП как бистальные [2,3].

В [4] даются предложения по проверке устойчивости стержней из ЗГСП, при этом упрочнение профиля не учитывается. В [5] упрочнение также не учитывается. Это говорит о том, что проблема учета технологического упрочнения гнутых профилей полностью ещё не решена.

При исследовании влияния технологического упрочнения на устойчивость внецентренно сжатого шарнирно закрепленного по концам стержня из ЗГСП задача сводится к рассмотрению бистального стержня с учетом развития в нем пластических деформаций.

В [6] и [7] из рассмотрения напряженно-деформированного состояния сечения из ЗГСП, в котором действует продольная сила N и изгибающий момент M , определена зависимость жесткости сечения от глубины развития пластических деформаций и таких факторов как соотношение геометрических размеров сечения, радиуса закругления зон изгиба профиля, очертания рабочей диаграммы стали, величины продольной нагрузки. Исследована зависимость относительной жесткости сечения $\alpha = J/J_0$ от относительной глубины развития пластических деформаций в функции безразмерного параметра.

$$B = f(\xi) = \frac{1 - \varphi_e}{\varphi_e} \frac{M}{N} \frac{A}{W}$$

Здесь J_0 - момент инерции упругого сечения, J - момент инерции сечения с учетом развития пластических деформаций, A и W - площадь и момент сопротивления сечения. Коэффициент $\varphi_e = \sigma_0 / \sigma_T$, где $\sigma_0 = N/A$ - среднее напряжение в сечении; σ_T - предел текучести. В предельном состоянии стержня φ_e представляет собой коэффициент снижения расчетных напряжений при внецентренном сжатии.

При определении зависимости α от B представляется возможным учесть наличие в местах закругления профиля технологического упрочнения - наклепа, который материал профиля получает в результатегиба. Сечение ЗГСП в этом случае рассматривается как бистальное с введением в пределах закругления профиля повышенного предела текучести материала $\sigma_{T1} = \sigma_T \cdot \alpha_1$, где α_1 - относительное упрочнение. Характер эпюры нормальных напряжений в зоне закругления профиля изображен на рис. 1. Вид диаграммы деформирования упрочненного материала принимается таким же, как и для неупрочненного материала. Величина относительного упрочнения может быть принята согласно рекомендаций, приведенных в [4].

Известно, что при переходе от неупрочненного материала к упрочненному предел текучести изменяется не скачкообразно, а плавно. Длина этого переходного участка равна двум-трем толщинам стенки профиля. Поэтому в расчетах предусматривается возможность введения переходного участка длиной d от неупрочненного материала к упрочненному с линейным изменением предела текучести от σ_T к σ_{T1} (рис. 1).

Результаты некоторых расчетов на ЭВМ по специально разра-

ботанной программе JGUS приведены на рис. 2. При расчетах варьировались коэффициент φ_e и относительная глубина развития пластических деформаций ξ . Кривые зависимости α от B (рис. 2) даны для профиля Гн I80 x I80 x 6 при работе материала по унифицированной диаграмме. Относительное упрочнение $\alpha_1 = 1,5$, длина переходного участка $d = 2t = 12$ мм. Следует отметить, что учет упрочнения оказывает существенное влияние на характер изменения жесткости сечения с ростом глубины развития пластических деформаций.

На следующем этапе исследуется устойчивость внецентренно сжатого шарнирно закрепленного по концам стержня. Расчетная схема стержня изображена на рис. 3.

При рассмотрении упруго-пластического состояния стержня принимается приближенное, в виде косинусоиды, выражение формы изогнутой оси, справедливое, строго говоря, при упругой работе стали. В нашем случае приближенность расчета заключается в том, что жесткость стержня принимается постоянной по его длине и равной жесткости максимально пластифицированного сечения (рис. 3). Такое допущение не приводит к существенным погрешностям расчета и соответствует методике, принятой в [5].

Ординаты изогнутой оси стержня относительно линии давления определяются выражением

$$y = f \cos \frac{\pi x}{\ell_{ef}},$$

где: $\ell_{ef} = \pi \sqrt{EI/N}$ - эффективная длина стержня;
 f - амплитуда в начале координат, определяемая из выражения для B с учетом того, что $M = N \cdot f$, по формуле

$$f = B \frac{1 - \varphi_e}{\varphi_e} \frac{W}{A}.$$

При $x = \ell/2$ эксцентриситет силы на конце стержня

$$e = f \cos \frac{\pi \ell}{2 \ell_{ef}} = B \frac{1 - \varphi_e}{\varphi_e} \frac{W}{A} \cos \nu, \text{ где } \nu = \frac{\pi \ell}{2 \ell_{ef}}.$$

Тогда относительный эксцентриситет

$$m = e \frac{A}{W} = B \frac{1 - \varphi_e}{\varphi_e} \cos \nu.$$

При одинаковых эксцентриситетах продольной силы N на опорах выражение относительного эксцентриситета m представляет собой уравнение равновесия стержня. Переменным параметром является B , который связан с развитием пластических деформаций в стержне. При расчете учтем, что производная

$$\frac{d\nu}{dB} = -\frac{\nu}{2\alpha} \frac{d\alpha}{dB},$$

где α определяется по зависимости $\alpha - B$ (рис. 2), а $d\alpha/dB$ – угол наклона касательной к соответствующей кривой α при определенном значении B , который может быть определен по разности значений α и B для двух близлежащих точек на кривой. Продифференцировав по параметру B уравнение равновесия стержня и приравняв производную нулю, приходим к уравнению предельного равновесия:

$$\frac{ctg \nu}{\nu} = -\frac{B}{2\alpha} \frac{d\alpha}{dB}.$$

Используя выражение ν определяем условную гибкость стержня

$$\bar{\lambda} = \frac{l}{i} \sqrt{\frac{R_y}{E}} = 2\nu \sqrt{\frac{\alpha}{\varphi_e}}.$$

При численном решении задачи на ЭВМ по программе JGUS, реализующей изложенный алгоритм, исходными данными для расчета являются относительный эксцентриситет m и коэффициент φ_e . Задавая значение относительной глубины развития пластических деформаций ξ , определяются величины α , B и $d\alpha/dB$, далее из уравнения предельного равновесия находится параметр ν и затем проверяется уравнение равновесия стержня. Варьируя ξ с помощью итерационного процесса подбирается такая глубина развития пластических деформаций, при которой выполняется уравнение равновесия стержня. Этот случай соответствует предельному состоянию внецентренно сжатого стержня и для него определяется условная гибкость $\bar{\lambda}$.

По результатам расчета для профиля Гн I80xI80x6 построены зависимости коэффициента φ_e от условной гибкости $\bar{\lambda}$ при различных относительных эксцентриситетах m (рис. 4). Следует отметить, что значения φ_e при расчете без учета упрочнения профиля практически совпадают со значениями, вычисленными по [5] с учетом коэффициента влияния формы сечения для замкнутого профиля. На рис. 4 показаны кривые соответствующие расчету без учета упрочнения, а также с учетом упрочнения профиля при $\alpha_1 = 1,5$ без переходного участка и с переходным участком длиной $d = 2t$. Учет переходного участка от неупрочненного материала к упрочненному позволяет более существенно повысить коэффициент φ_e . Также видно, что с увеличением гибкости стержня влияние упрочнения уменьшается,

поэтому учет технологического упрочнения наиболее эффективен при малых гибкостях.

Таким образом, учет упрочнения ЗГСП позволяет увеличить коэффициент снижения расчетных напряжений при внецентренном сжатии φ_e и, следовательно, несущую способность внецентренно сжатого стержня до 8-10%.

Выполненное решение для ЗГСП является приближенным, дающим дополнительный резерв устойчивости, так как предполагалось, что пластические деформации одинаковы по всей длине стержня. Строгое решение с учетом переменного развития пластических деформаций по длине стержня с использованием метода начальных параметров при делении стержня по длине на отдельные участки получено путем расчетов по методике, изложенной в [7]. Расчеты показывают, что ошибка приближенного расчета достигает 2-3% в запас устойчивости.

Литература.

1. Березинский Я.А. Исследование влияния технологического упрочнения на устойчивость стержней из стальных гнутых профилей.: Автореферат дисс.на соискание уч.степ.канд.техн. наук. - Киев: 1974.-22 с.

2. Деренковский В.М., Бельский Г.Е. Влияние упрочнения материала на несущую способность сжато изогнутых стержней из гнутых профилей. - Деп.рукопись / ЦНИИПСК - ЦНИИС. - № 747.- М.: 1977. - 9 с.

3. Казачкова А.Н. Исследование работы сжатых элементов стропильных ферм из гнутосварных профилей при действии внеузловой нагрузки.: Автореферат дисс. на соискание уч.степ.канд. техн.наук. - Свердловск: 1982. - 23 с.

4. Руководство по проектированию стальных конструкций из гнутосварных замкнутых профилей / ЦНИИПСК. - М.: 1978. - 43 с.

5. СНИП П-23-81^ж. Стальные конструкции / Госстрой СССР.- М.: ЦИТП Госстроя СССР. 1987. - 96 с.

6. Соболев Ю.В., Астряб С.М., Головкин Л.Г. "К вопросу определения расчетных длин сжатых элементов конструкций из замкнутых гнутосварных профилей". В кн. "Развитие металлических конструкций: Работы школы Н.С.Стрелецкого"/В.В.Кузнецов, Е.И.Беленя, Н.Н.Стрелецкий и др.; Под ред. В.В.Кузнецова;

ЦНИИпроектстальконструкция и др. М.: Стройиздат, 1987. - 576 с.

7. Головки Л.Г. Расчет на устойчивость сжатых элементов ферм из замкнутых гнутосварных профилей. Материалы польско-советской конференции "Актуальные проблемы проектирования стальных конструкций". - Люблин: 1988.

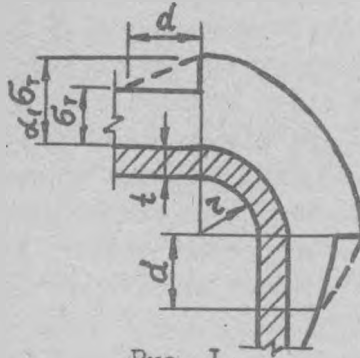


Рис. 1.

Эпюра нормальных напряжений в зонегиба ЗГСП при расчете с учетом упрочнения: — — без учета переходного участка; - - - с учетом переходного участка.

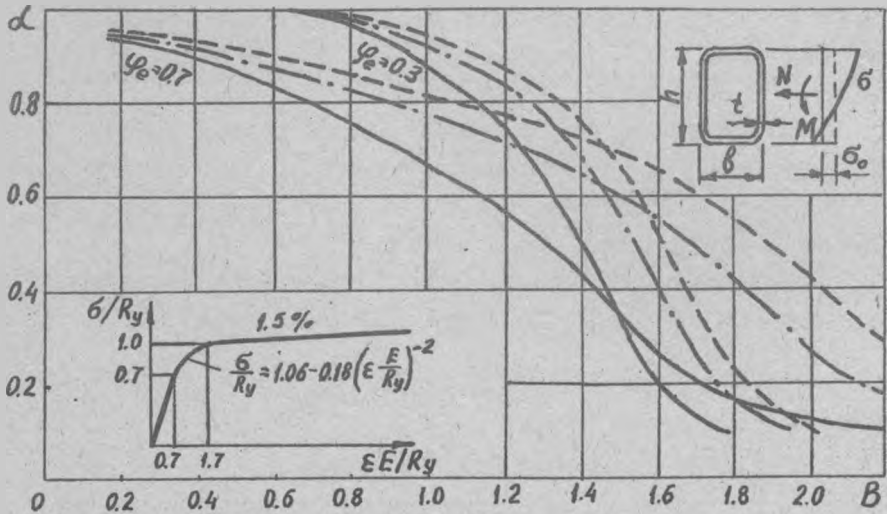


Рис. 2.

Зависимость α от B для Гн I80xI80x6: — — без учета упрочнения; — . — с учетом упрочнения без переходного участка; - - - то же с переходным участком длиной $2t$.

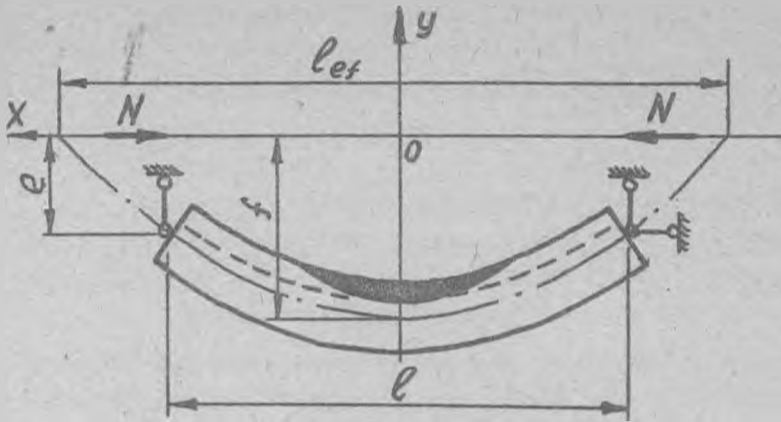


Рис. 3.

Расчетная схема внецентренно сжатого стержня: - - - - условная зона развития пластических деформаций

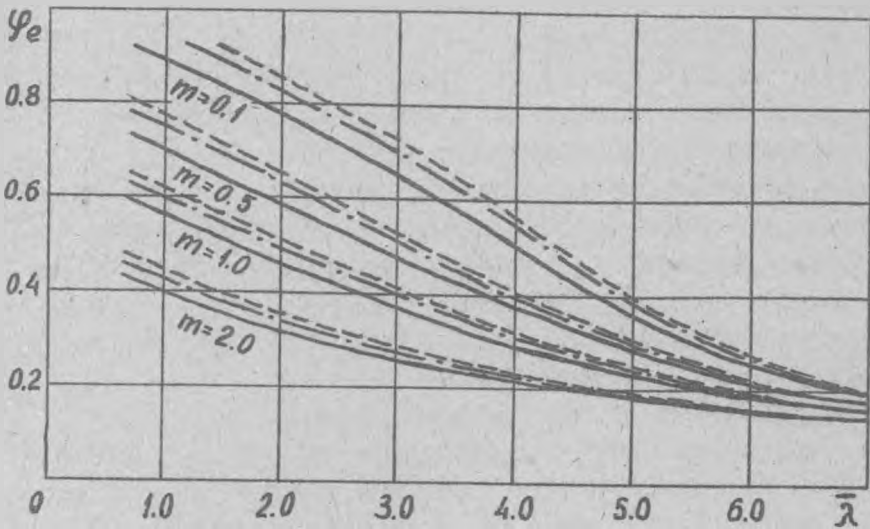


Рис. 4.

Зависимость коэффициента φ_e от условной гибкости $\bar{\lambda}$ для Гн I80xI80x6: — — — без учета упрочнения;
 — · — — с учетом упрочнения без переходного участка;
 - - - - то же с переходным участком длиной $2t$.