

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР ПО НАРОДНОМУ
ОБРАЗОВАНИЮ

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Выпускается Новосибирским ордена Трудового Красного Знамени
инженерно-строительным институтом имени В. В. Куйбышева с марта 1958 года

№ 4

Апрель 1990 г.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

УДК 624.014.072 : 539.4

ПРОЧНОСТЬ СЕЧЕНИЙ СТАЛЬНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ СТЕРЖНЕЙ ПРИ ОГРАНИЧЕННЫХ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЯХ

Д-р техн. наук, доц. Н. Л. ЧЕРНОВ; канд. техн. наук, доц. В. С. ШЕБАНИН,
инж. Ю. В. КУПЧЕНКО, инж. ЕБРАХИМ ВАЛИД, инж. И. А. АРТЮШКИН

Одесский инженерно-строительный институт

Нахождение напряженно-деформированного состояния составных стальных сечений при сложном сопротивлении в области ограниченных пластических деформаций при помощи последовательной корректировки фиктивной эпюры продольных нормальных напряжений σ_F рассмотрено в работе [1]. Учитывалось воздействие силовых факторов N , M_x , M_y , Q_x , Q_y и $M_{кр}$. При этом в качестве упрощений приняты средние значения касательных напряжений в пределах отдельных листов сечения, влияние касательных напряжений от момента чистого кручения $M_{кр}$ в сечениях открытого профиля не учитывалось. Дальнейшее развитие предложенной методики выполнено с учетом следующих условий:

1. Введено предложение о сохранении за пределом упругости распределения касательных напряжений τ , полученного из расчета в пределах упругости, как дающего хорошо совпадающие с экспериментальными данными результаты, согласно которым наблюдается существенный рост сдвигов γ в областях текучести материала. Кроме того, такое распределение τ соответствует замене в действующих нормах при проверке прочности стенки средних напряжений τ на определяемые по формуле Журавского [2].

2. Учтено влияние бимоента B и изгибно-крутящего момента M_{ω} .

3. Учтено влияние касательных напряжений от момента чистого кручения $M_{кр}$ в открытых профилях.

© Строительство и архитектура. Сер. Изв. вузов. 1990.

4. Для ускорения сходимости итерационного процесса на каждой итерации учитывается изменение жесткости сечения путем введения в пределах зон текучести соответствующих секущих модулей деформаций.

5. Сечение открытого или двустенчатого замкнутого профиля принимается из n ортогональных листов, которые задаются координатами концов x_j и y_j , толщинами t_j и расчетными сопротивлениями R_{yj} , равными пределу текучести, где j — номер листа.

Распределение касательных напряжений по контуру сечения от поперечных сил Q_x, Q_y , крутящего момента $M_{кр}$ и изгибно-крутящего момента M_ω выполняется обычным расчетом в пределах упругости:

$$\begin{aligned} \tau_k^{Q_x} &= Q_x S_y^{отс} / (I_y t_j); & \tau_k^{M_\omega} &= M_\omega S_\omega^{отс} / (I_\omega t_j); \\ \tau_k^{Q_y} &= Q_y S_x^{отс} / (I_x t_j); & \tau_k^{M_{кр}} &= M_{кр} t_j / I_{кр}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $S_y^{отс}, S_x^{отс}$ — статические моменты отсеченных частей сечения относительно осей Y и X соответственно; $S_\omega^{отс}$ — секториальный статический момент отсеченной части сечения; I_y, I_x — моменты инерции сечения относительно осей Y и X соответственно; I_ω — секториальный момент инерции; $I_{кр}$ — момент инерции сечения при кручении; t_j — толщина j -го листа, входящего в контур сечения и разбиваемого на $(k-1)$ участков по длине.

Следует особо подчеркнуть важность предположения о сохранении за пределом упругости распределения τ , полученного из расчета в пределах упругости. Во многих исследованиях исходят из предположения сохранения «упругого» характера распределения сдвигов γ за пределом упругости, по аналогии с гипотезой плоских сечений, предполагающей сохранение за пределом упругости распределения относительных удлинений ϵ , полученных из «упругого» расчета. Однако, если гипотеза плоских сечений хорошо подтверждается экспериментально при развитии, по крайней мере, ограниченных пластических деформаций, с распределением сдвигов γ дело обстоит иначе. Опыты показывают резкое возрастание величин сдвигов γ в тех областях листов изгибаемых сечений, в которых началась текучесть. На рис. 1 изображено напряженно-деформированное состояние двутаврового сечения при воздействии усилий M_x, M_y, Q_x, Q_y и N . В зонах текучести напряжения

$$\sigma_{z\tau} = \sqrt{R_{yl}^2 - 3\tau^2}. \quad (2)$$

Граница зоны текучести определяется пересечением эпюры напряжений $\sigma_{z\tau}$ (штрихпунктир) с эпюрой фиктивных напряжений по-

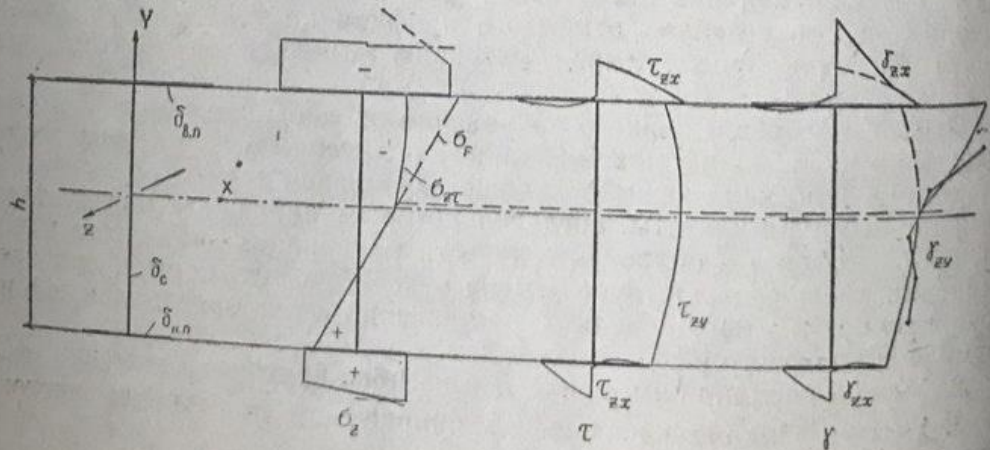


Рис. 1

следней итерации σ_F (пунктир). Далее на рис. 1 показано распределение касательных напряжений τ , полученных из расчета в пределах упругости. Теоретические величины сдвигов γ получаются из физических зависимостей между напряжениями и деформациями [3]:

$$\epsilon_l = \sigma_l \epsilon_z / \sigma_z; \quad \gamma = 3\tau \epsilon_l / \sigma_l = 3\tau \epsilon_z / \sigma_z, \quad (3)$$

где ϵ_l — интенсивность деформаций; ϵ_z — относительные удлинения, принимаются согласно гипотезе плоских сечений; τ_z — действительные нормальные напряжения; σ_l — интенсивность напряжений, равная $K_{y,l}$.

На рис. 1 изображено и теоретическое распределение сдвигов γ (сплошная линия) в сечении. Получаемое значительное возрастание теоретических сдвигов γ в зонах текучести видно из опытных значений γ_{zy} , нанесенных линией с жирными точками. Кроме нахождения распределения касательных напряжений по контуру сечения, т. е. по длине листов, определяется распределение касательных напряжений и по ширине листов, составляющих сечение. Принимается равномерное распределение касательных напряжений по толщине листа от поперечных сил Q_x , Q_y и изгибно-крутящего момента M_w . На рис. 2 это соответствует касательным напряжениям τ_1 , распределение которых показано в трех местах по высоте и ширине стенки приведенного на рис. 1 двутавра. Для открытого профиля сечения касательные напряжения от крутящего момента $M_{кр}$ в пределах каждого листа, составляющего сечение, вдоль боковых сторон листа создают потоки, направленные в разные стороны. Касательные напряжения от чистого кручения достигают максимальных значений на поверхности листов, а по срединной плоскости равны нулю (рис. 2, касательные напряжения τ_2). Соответственно, с одной стороны листа касательные напряжения от $M_{кр}$ складываются с касательными напряжениями от поперечных сил и изгибно-крутящего момента, а с другой вычитаются. На рис. 2 это касательные напряжения τ_3 . В связи с этим величины напряжений $\sigma_{\tau kn}$, при которых начинается текучесть материала, по длине и ширине листов сечения оказываются переменными и для каждого k -го участка длины и n -го участка ширины листа, на которые он разбивается при расчете на ЭВМ, значения

$$\sigma_{\tau kn} = \sqrt{R_{y,l} - 3 \cdot (\tau_{kn}^{Q_x} + \tau_{kn}^{Q_y} + \tau_{kn}^{M_w} + \tau_{kn}^{M_{кр}})^2}. \quad (4)$$

На рис. 2 далее показано распределение нормальных напряжений σ_1 в тех же трех местах по высоте и ширине стенки двутавра с учетом касательных напряжений τ_1 . Изображено распределение нормальных напряжений σ_3 по длине и ширине листа с учетом касательных напряжений τ_3 . Видно, что в этом случае нормальные напряжения по ширине листа в зоне текучести распределяются неравномерно. Эпюра нормальных напряжений представляет собой выпуклую кривую. Максимальное значение нормальных напряжений ($\sigma_{\tau kn} = \sigma_{\tau} = R_{y,l}$) (5) соответствует тому участку по толщине листа, где касательные напряжения равны нулю. По обе стороны от максимального значения эпюры нормальные напряжения плавно уменьшаются, причем минимальное значение продольного напряжения достигается на поверхности листа и соответствует участку с наибольшим касательным напряжением τ_3 . В местах, где материал еще не достиг напряжений текучести, нормальные напряжения распределяются равномерно по толщине листа, независимо от распределения касательных напряжений.

Сравнение величин интенсивности пластических деформаций ϵ_{lp} при воздействии усилий $N = 0,3N_{пр}$, $M_x = 0,8M_{x,пр}$, $M_y = 0,11M_{y,пр}$, $Q_x = 0,45Q_{x,пр}$, $Q_y = 0,11Q_{y,пр}$ в сечении со стенкой 600×12 мм, верхней полкой 220×18 мм и нижней полкой 160×18 мм показало,

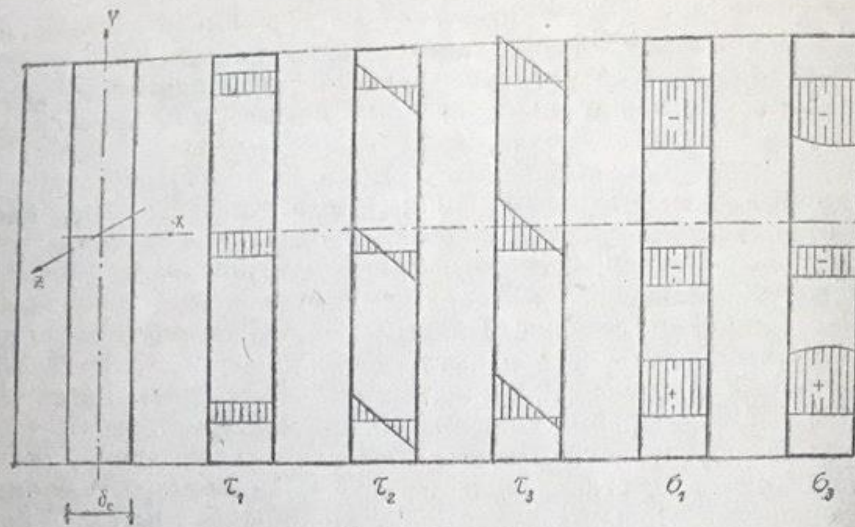


Рис. 2. Эпюры нормальных и касательных напряжений в стенке двутавра

по сравнению со случаем $M_{кр} = 0$, увеличение интенсивности пластических деформаций при $M_{кр} = 0,25M_{крпр}$ до 10%, а при $M_{кр} = 0,5M_{крпр}$ — до 90%.

Предлагаемая методика расчета на сложное сопротивление составных стальных сечений при ограниченных пластических деформациях [1] допускает любое число действующих усилий. Учет воздействия бимоента B может быть осуществлен следующим образом. При построении эпюры фиктивных напряжений к нормальным напряжениям от усилий M_x, M_y, N добавляются нормальные напряжения от B :

$$\sigma_k = B\omega_k/I_\omega, \quad (6)$$

где ω_k — главная секториальная координата.

Затем по эпюре действительных продольных напряжений $\sigma_z^{(1)}$ от совместного действия всех усилий M_x, M_y, N и B вычисляются соответствующие усилия первой итерации, в том числе и $B^{(1)}$:

$$B^{(1)} = \int_A \sigma_z^{(1)} \omega dA. \quad (7)$$

Находятся разности первой итерации:

$$\Delta B^{(1)} = B - B^{(1)}. \quad (8)$$

Фиктивное усилие второй итерации вычисляется по формуле

$$B_F^{(2)} = B_F^{(1)} + \Delta B^{(1)}. \quad (9)$$

В первой итерации роль фиктивного усилия играет усилие заданное:

$$B_F^{(1)} = B.$$

Фиктивное усилие n -й итерации определяется по формуле

$$B_F^{(n)} = B + \Delta B^{(1)} + \Delta B^{(2)} + \dots + \Delta B^{(n-1)}, \quad (10)$$

где k -я разность равна $\Delta B^{(k)} = B - B^{(k-1)}$.
Процесс продолжается до требуемой точности.

Для ускорения сходимости процесса и уменьшения соответствующего машинного времени на каждом этапе итерационного процесса производится расчет сечения в предположении неограниченно упругой

работы материала, но не с начальными модулями упругости, а с касательными, соответствующими достигнутой деформации [4]. Суть этого метода ускорения сходимости процесса состоит в следующем.

Физические уравнения связывают между собой напряжения и деформации произвольных волокон балки, для материала которой известна диаграмма растяжения $\sigma-\epsilon$, а упругие свойства характеризуются модулем Юнга $E = \operatorname{tg} \alpha$. Когда $\epsilon \leq \epsilon_T$, связь между напряжениями и деформациями определяется законом Гука:

$$\sigma = E \cdot \epsilon. \quad (11)$$

Если же $\epsilon > \epsilon_T$, надо использовать зависимость $\sigma-\epsilon$. Равенство (11) представим через секущий модуль $E_c = \operatorname{tg} \alpha'$:

$$\sigma = \epsilon E_c. \quad (12)$$

Равенство (12) аналогично по форме записи соотношению (11), но существенно отличается от него по содержанию, так как секущий модуль E_c играет роль переменного параметра упругости и зависит от напряженного состояния сечения. Таким образом, соотношение по определению напряжений сведено к форме, аналогичной закону Р. Гука, но с переменным модулем E_c .

Деформации ϵ_k во всех точках сечения через действующие усилия в этом случае определяются по формуле

$$\epsilon_k = M_x y_k / \left(\int_A E_c y^2 dA \right) + M_y x_k / \left(\int_A E_c x^2 dA \right) + N / (E_c A) + B \omega_k / \left(\int_A E_c \omega^2 dA \right), \quad (13)$$

где y_k, x_k — соответствующие координаты точек относительно осей X и Y ; A — площадь сечения.

Применение этого метода позволяет ускорить процесс сходимости приблизительно в два раза.

Используя данные рекомендации, а также предложенную методику расчета сечений за пределом упругости при сложном сопротивлении [1] и изложенный в работе [5] метод расчета статически неопределимых систем возобновлением ограниченных пластических деформаций, можно рассчитывать на прочность по критерию предельных пластических деформаций пространственные стержневые изгибаемые системы при учете действия в стержнях усилий $M_x, M_y, N, Q_x, Q_y, B, M_{кр}$ и M_ω совместно или в различных сочетаниях.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]. Чернов Н. Л., Шебанин В. С. Сложное сопротивление составных стальных сечений при ограниченных пластических деформациях // Изв. вузов. Строительство и архитектура. — 1988. — № 7. — С. 8—12. [2]. СНиП II-23—81*. Нормы проектирования. Стальные конструкции. — М., 1988. [3]. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. — М.: Машиностроение, 1968. — 400 с. [4]. Колосов В. П. Метод определения напряжений и деформаций в сечении балки при произвольном нагружении с учетом действительной диаграммы ($\sigma-\epsilon$) // Изв. вузов. Авиационная техника. — 1966. — № 1. — С. 63—71. [5]. Чернов Н. Л., Шебанин В. С. Расчет прочности статически неопределимых систем при ограниченных пластических деформациях // Изв. вузов. Машиностроение. — 1986. — № 4. — С. 3—6.

Поступила 22 февраля 1989 г.