



УДК 621.7-216

М. В. Баранов

ОАО «НПО ПМ – Малое Конструкторское Бюро»,
г. Железнодорожск, Красноярский край, Россия

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ДЛЯ КОРОТКОГО СТЕРЖНЯ КОРОБЧАТОГО СЕЧЕНИЯ ИЗ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Критические напряжения находятся из условий минимума потенциальной энергии системы с использованием уравнения Эйлера вариационной задачи. Получены конечные формулы для случаев осевого и внецентренного сжатия. Приведен порядок расчета. Показано, что расчетные и экспериментальные данные для опорных кронштейнов ракеты-носителя «Космос-3М» дают хорошие совпадения.

Ключевые слова: внецентренное сжатие, упругопластическое деформирование, вариационная задача.

M. V. Baranov

JSC «NPO PM – Small Design Bureau», Zheleznogorsk, Russia

DETERMINATION OF BUCKLING CRITICAL STRESSES FOR BOX-SECTION SHORT ROD MADE OF PLASTO-ELASTIC MATERIAL

Critical stresses are calculated from minimal conditions of system's potential energy using Euler's variational problems equations. End formulas for axial and eccentric compression are derived. Computation method is given. It is shown, that computational and experimental data for support brackets of "Cosmos-3M" launch vehicle constitute a match.

Key words: eccentric compression, plasto-elastic deformation, variational problem.

Несущая способность опорных кронштейнов ракеты-носителя «Космос-3М» определяется сечениями, представляющими замкнутую прямоугольную коробку. Материал кронштейна – литейный алюминиевый сплав АЛ23-1. Проведенные эксперименты показали, что потеря устойчивости происходит, когда материал кронштейна работает в упругопластической стадии деформирования.

В качестве расчетной схемы может быть принят короткий стержень коробчатого сечения в условиях внецентренного сжатия при следующих предположениях:

- напряжения во всех точках сечения превосходят предел упругости;
- потеря устойчивости происходит при увеличении сжимающей нагрузки, то есть в сечении отсутствуют зоны разгрузки;
- диаграмма $\sigma_i(\epsilon)$ совпадает с диаграммой $\sigma(\epsilon)$;
- до потери устойчивости для сечения в целом справедлива гипотеза Гирхгофа-Лява.

Критические напряжения потери устойчивости находятся из условия минимума потенциальной энергии системы с использованием уравнения Эйлера вариационной задачи [1]

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial \xi} - \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial \Gamma}{\partial \xi'} \right) + \frac{d^2}{dx^2} \left(\frac{\partial \Gamma}{\partial \xi''} \right) = 0, \quad (1)$$

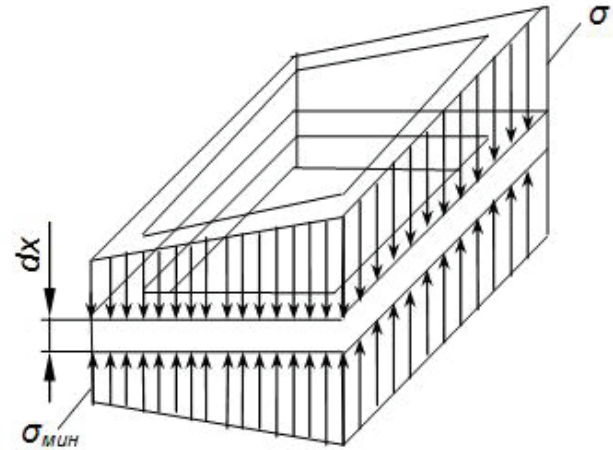
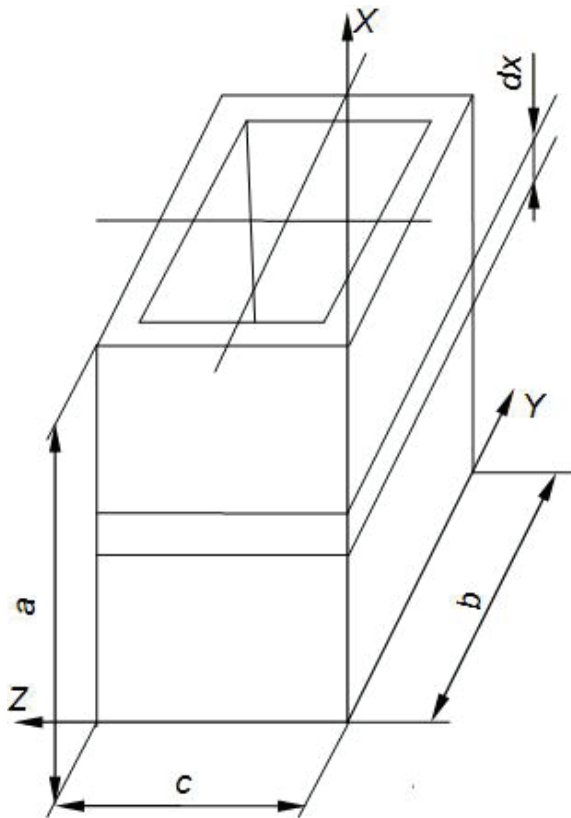


Рис. 1

где Γ – потенциальная энергия на единицу длины системы вдоль оси X (рис. 1).

Грани стержня рассматриваются как пластины:

- в плоскости, параллельной XOY , $-a \times b \times h_1$;
- в плоскости, параллельной XOZ , $-a \times b \times h_2$.

Потенциальная энергия элементарного участка dx может быть представлена в виде

$$\Gamma = \Gamma_1 + \Gamma_2, \quad (2)$$

где

$$\Gamma_1 = \int_0^b \left[\frac{1}{2} M_x \cdot \chi_x + \frac{1}{2} M_y \cdot \chi_y + H \cdot \chi_{xy} - \frac{1}{2} \sigma_1 h_1 \left(\frac{\partial W_1}{\partial x} \right)^2 \right] dy \quad (2')$$

– потенциальная энергия элементарного участка dx пластины $a \times c$ (без учета влияния поперечных сил);

$$\Gamma_2 = \int_0^c \left[\frac{1}{2} M_x \cdot \chi_x + \frac{1}{2} M_z \cdot \chi_z + H \cdot \chi_{xz} - \frac{1}{2} \sigma_2 \cdot h_2 \cdot \left(\frac{\partial W_2}{\partial x} \right)^2 \right] dz \quad (2'')$$

– потенциальная энергия элементарного участка dx пластины $a \times c$.

Для упругопластической зоны по теории деформации при $\mu = 0,5$ значения изгибающих и крутящих моментов запишутся как [2]

$$\begin{cases} M_x = D' \left[\varphi_C \cdot (\chi_x + \frac{1}{2} \chi_y) - \frac{3}{4} (\varphi_C - \varphi_K) \cdot \frac{\sigma_x \cdot \Pi(\sigma, \chi)}{\sigma_i^2} \right] \\ M_y = D' \left[\varphi_C \cdot (\chi_y + \frac{1}{2} \chi_x) - \frac{3}{4} (\varphi_C - \varphi_K) \cdot \frac{\sigma_y \cdot \Pi(\sigma, \chi)}{\sigma_i^2} \right] \\ H_{xy} = \frac{3}{4} D' \left[\frac{2}{3} \varphi_C \cdot \chi_{xy} - (\varphi_C - \varphi_K) \cdot \frac{\tau \cdot \Pi(\sigma, \chi)}{\sigma_i^2} \right] \end{cases}, \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} \chi_x &= -\frac{\partial^2 W_1}{\partial x^2}, \quad \chi_y = -\frac{\partial^2 W_1}{\partial y^2}, \\ \chi_{xy} &= -\frac{\partial^2 W_1}{\partial x \partial y} \end{aligned} \quad (3')$$

для плоскости XOY .

Аналогичные выражения для M_x , M_z и H_{xz} могут быть записаны для плоскости XOZ , где

$$\begin{aligned} \chi_x &= -\frac{\partial^2 W_2}{\partial x^2}, \quad \chi_z = -\frac{\partial^2 W_2}{\partial z^2}, \\ \chi_{xz} &= -\frac{\partial^2 W_2}{\partial x \partial z}. \end{aligned} \quad (4)$$

Принимаем, что до момента потери устойчивости в гранях стержня реализуется одноосное напряженное состояние.

Тогда

$$\begin{cases} \sigma_i = \sigma_x \\ \sigma_y = \sigma_z = \tau = 0 \\ \Pi(\sigma, \chi) = \sigma_x \cdot \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \end{cases} \quad (5)$$

Подставив в систему (3) выражения (3') и (5), получим

$$\begin{cases} M_x = -D' \left[\varphi_c \cdot \left(\frac{\partial^2 W_1}{\partial x^2} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 W_1}{\partial y^2} \right) - \frac{3}{4} (\varphi_c - \varphi_K) \cdot \frac{\partial^2 W_1}{\partial x^2} \right] \\ M_y = -D' \cdot \varphi_c \cdot \left(\frac{\partial^2 W_1}{\partial x^2} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 W_1}{\partial y^2} \right) \\ H_{xy} = -D' \cdot \frac{1}{2} \cdot \varphi_c \cdot \frac{\partial^2 W_1}{\partial x \partial y} \end{cases} \quad (6)$$

В системах (3) и (6)

$$\begin{aligned} D' &= \frac{Eh^3}{9}; \quad \varphi_C = \frac{E_C}{E}; \quad \varphi_K = \frac{E_K}{E}; \\ E_C &= \frac{\sigma}{\xi} - \text{секущий модуль}; \\ E_K &= \frac{\partial \sigma}{\partial \xi} - \text{касательный модуль}. \end{aligned}$$

Закон распределения напряжений по граням, параллельным плоскости XOZ:

$$\sigma_2 = \sigma \cdot \left[1 - (1 - \mathfrak{Z}) \frac{Z}{C} \right],$$

где $\mathfrak{Z} = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma}$.

Учитывая эти обозначения, после подстановки (6) и (3') в выражения (2') и (2'') имеем:

$$\Gamma_1 = D_1 \int_0^b \left[\left(\frac{1}{2} \varphi_c + \frac{3}{4} \varphi_K \right) \cdot \left(\frac{\partial^2 W_1}{\partial x^2} \right)^2 + \varphi_c \cdot \left(\frac{\partial^2 W_1}{\partial y^2} \right)^2 + \varphi_c \cdot \left(\frac{\partial^2 W_1}{\partial x \partial y} \right)^2 + \varphi_c \cdot \frac{\partial^2 W_1}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 W_1}{\partial y^2} - \frac{1 + \mathfrak{Z}}{2} \cdot \frac{\sigma h_1}{D_1} \cdot \left(\frac{\partial^2 W_1}{\partial x^2} \right)^2 \right] dy; \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \Gamma_2 = D_2 \int_0^c \left[\left(\frac{1}{2} \varphi_c + \frac{3}{4} \varphi_K \right) \cdot \left(\frac{\partial^2 W_2}{\partial x^2} \right)^2 + \varphi_c \cdot \left(\frac{\partial^2 W_2}{\partial z^2} \right)^2 + \varphi_c \cdot \left(\frac{\partial^2 W_2}{\partial x \partial z} \right)^2 + \varphi_c \cdot \frac{\partial^2 W_2}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 W_2}{\partial z^2} - \frac{\sigma h_2}{D_2} \cdot \left[1 - (1 - \mathfrak{Z}) \cdot \frac{Z}{C} \right] \cdot \left(\frac{\partial^2 W_2}{\partial z^2} \right)^2 \right] dz. \quad (8) \end{aligned}$$

Функции прогибов пластин принимаем в виде

$$\begin{cases} W_1 = f_1 \cdot \sin \frac{m \cdot \pi \cdot x}{a} \cdot \sin \frac{\pi \cdot y}{b} \\ W_2 = f_2 \cdot \sin \frac{m \cdot \pi \cdot x}{a} \cdot \sin \frac{\pi \cdot z}{c} \end{cases} \quad (9)$$

Условие равенства углов поворота по ребрам запишется как

$$\left. \frac{\partial W_1}{\partial y} \right|_{y=0} = \left. \frac{\partial W_2}{\partial z} \right|_{z=0}. \quad (9')$$

Тогда

$$f_2 = f_1 \cdot c/b. \quad (10)$$

Введем обозначения:

$$\begin{aligned} f(x) &= f_1 \cdot \sin \frac{m \cdot \pi \cdot x}{a}; \\ f(y) &= \sin \frac{\pi \cdot y}{b}; \\ f(z) &= \sin \frac{\pi \cdot z}{c}; \\ D_{1C} &= \frac{1}{9} \cdot E \cdot \varphi_c \cdot h_1^3; \\ D_{2C} &= \frac{1}{9} \cdot E \cdot \varphi_c \cdot h_2^3; \\ D_{2C} &= D_{1C} \cdot \frac{h_2^3}{h_1^3}; \\ k &= \frac{c}{b}. \end{aligned} \quad (10')$$

Тогда

$$W_2 = k \cdot f(x) \cdot f(z);$$

$$\begin{aligned} \Gamma_1 &= D_{1C} \left\{ \left(\frac{1}{2} + \frac{3}{4} \cdot \frac{\varphi_K}{\varphi_c} \right) \cdot [f''(x)]^2 \cdot \int_0^b f^2(y) \cdot dy + \right. \\ &+ f(x) \cdot f''(x) \cdot \int_0^b f(y) \cdot \frac{d^2 f(y)}{dy^2} \cdot dy + f^2(x) \cdot \int_0^b \frac{d^2 f(y)}{dy^2} \cdot dy + \\ &+ [f'(x)]^2 \cdot \int_0^b \left[\frac{df(y)}{dy} \right]^2 \cdot dy - \frac{1 - \mathfrak{Z}}{2} \cdot \frac{\sigma \cdot h_1}{D_{1C}} \cdot [f'(x)]^2 \cdot \int_0^b f^2(y) dy \left. \right\}; \\ \Gamma_2 &= D_{2C} \left\{ k^2 \left(\frac{1}{2} + \frac{3}{4} \cdot \frac{\varphi_K}{\varphi_c} \right) \cdot [f''(x)]^2 \cdot \int_0^c f^2(z) dz + \right. \\ &+ k^2 \cdot f(x) \cdot f''(x) \cdot \int_0^c f(z) \cdot \frac{d^2 f(z)}{dz^2} dz + \\ &+ k^2 \cdot f^2(x) \cdot \int_0^c \left[\frac{d^2 f(z)}{dz^2} \right]^2 dz + \\ &+ k^2 \cdot [f'(x)]^2 \cdot \int_0^c \left[\frac{df(z)}{dz} \right]^2 dz - \frac{\sigma \cdot h_2}{D_{2C}} \cdot k^2 \cdot [f'(x)]^2 \cdot \int_0^c \left[1 - (1 - \mathfrak{Z}) \frac{Z}{C} \right] \cdot f^2(z) dz \left. \right\}. \quad (11) \end{aligned}$$

Потенциальная энергия деформации элементарного участка стержня

$$\Gamma = D_{1C} \left\{ \phi [f''(x)]^2 \cdot \left[\int_0^b f^2(y) \cdot dy + \frac{h_2^3}{h_1^3} \cdot k^2 \int_0^c f^2(z) dz \right] + f(x) \cdot f''(x) \left[\int_0^b f(y) \cdot \frac{d^2 f(y)}{dy^2} \cdot dy + \frac{h_2^3}{h_1^3} \cdot k^2 \cdot \int_0^c f(z) \cdot \frac{d^2 f(z)}{dz^2} \cdot dz \right] + f \left[\int_0^b \left[\frac{d^2 f(y)}{dy^2} \right]^2 \cdot dy + \frac{h_2^3}{h_1^3} \cdot k^2 \cdot \int_0^c \left[\frac{d^2 f(z)}{dz^2} \right]^2 \cdot dz \right] + [f'(x)]^2 \cdot \left[\int_0^b \left[\frac{df(y)}{dy} \right]^2 \cdot dy + \frac{h_2^3}{h_1^3} \cdot k^2 \cdot \int_0^c \left[\frac{df(z)}{dz} \right]^2 \cdot dz \right] - \frac{\sigma h_1}{D_{1C}} \cdot [f'(x)]^2 \cdot \left[\frac{1+\mathfrak{I}}{2} \int_0^b f^2(y) \cdot dy + \frac{h_2}{h_1} \cdot k \cdot \int_0^c [1-(1-\mathfrak{I})Z/C] \cdot f^2(z) dz \right] \right\}. \quad (12)$$

Здесь $\phi = 0,25 + 0,75 \cdot \Phi_{K/\Phi_c}$.

Уравнение Эйлера (1) может быть преобразовано к виду

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial f(x)} - \frac{d}{dx} \left[\frac{\partial \Gamma}{\partial f'(x)} \right] + \frac{d^2}{dx^2} \left[\frac{\partial \Gamma}{\partial f''(x)} \right] = 0. \quad (13)$$

Найдя величины

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial f(x)}; \quad \frac{d}{dx} \left[\frac{\partial \Gamma}{\partial f'(x)} \right]; \quad \frac{d^2}{dx^2} \left[\frac{\partial \Gamma}{\partial f''(x)} \right]$$

из уравнения (12) с учетом (10') и подставив их в выражение (13), после некоторых преобразований получим уравнение

$$f'(x) + v \cdot f''(x) + r f(x), \quad (14)$$

где

$$r = \frac{1}{\phi} \sum_1 \int; \quad \sum_3 \int;$$

$$v = \frac{1}{\phi} \sum_1 \int \cdot \left[\frac{\sigma \cdot h_1}{D_{1C}} \cdot \sum_5 \int + \sum_2 \int - \sum_4 \int \right];$$

$$\sum_1 \int = \int_0^b f^2(y) \cdot dy + \frac{h_2^3}{h_1^3} \cdot k^2 \cdot \int_0^c f^2(z) \cdot dz = b/2 \cdot \left(1 + k^3 \cdot \frac{h_2^3}{h_1^3} \right);$$

$$\sum_2 \int = \int_0^b f(y) \cdot \frac{d^2 f(y)}{dy^2} \cdot dy + \frac{h_2^3}{h_1^3} \cdot k^2 \cdot \int_0^c f(z) \cdot \frac{d^2 f(z)}{dz^2} \cdot dz = -b/2 \cdot \pi^2 / b^2 \cdot \left[1 + k \cdot \frac{h_2^3}{h_1^3} \right];$$

$$\sum_3 \int = \int_0^b \left[\frac{d^2 f(y)}{dy^2} \right]^2 \cdot dy + \frac{h_2^3}{h_1^3} \cdot k^2 \cdot \int_0^c \left[\frac{d^2 f(z)}{dz^2} \right]^2 \cdot dz = b/2 \cdot \left(1 + \frac{h_2^3}{h_1^3} \cdot 1/k \right) \cdot \pi^4 / b^4;$$

$$\sum_4 \int = \int_0^b \left[\frac{df(y)}{dy} \right]^2 \cdot dy + \frac{h_2^3}{h_1^3} \cdot k^2 \cdot \int_0^c \left[\frac{df(z)}{dz} \right]^2 \cdot dz = b/2 \cdot \left(1 + \frac{h_2^3}{h_1^3} \cdot k \right) \cdot \pi^2 / b^2;$$

$$\sum_5 \int = \frac{1+\mathfrak{I}}{2} \int_0^b f^2(y) \cdot dy + \frac{h_2}{h_1} \cdot k^2 \cdot \int_0^c [1-(1-\mathfrak{I})Z/C] f^2(z) \cdot dz = b/2 \cdot \left(\frac{1+\mathfrak{I}}{2} + k^3 \cdot \frac{h_2}{h_1} \cdot \left(1 - \frac{1-\mathfrak{I}}{2} \cdot \frac{\pi^2 + 1}{\pi^2} \right) \right).$$

Учитывая (10'), уравнение (14) может быть преобразовано к виду

$$\left(\frac{m\pi}{a} \right)^4 - v \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + r = 0. \quad (15)$$

Решением этого уравнения будет

$$\sigma = \frac{D_{1C}}{h_1} \cdot \pi^2 / b^2 \cdot \left[\left(\frac{mb}{a} \right)^2 \cdot \phi \cdot \alpha + \left(\frac{a}{mb} \right)^2 \cdot \beta + 2\gamma \right], \quad (16)$$

где

$$\alpha = \frac{1 + \frac{h_2^3}{h_1^3} \cdot k^3}{\frac{1+\mathfrak{I}}{2} + k^3 \frac{h_2}{h_1} \left(1 - \frac{1-\mathfrak{I}}{2} \cdot \frac{\pi^2 + 1}{\pi^2} \right)}; \quad \beta = \frac{1 + \frac{h_2^3}{h_1^3} \cdot 1/k}{\frac{1+\mathfrak{I}}{2} + k^2 \frac{h_2}{h_1} \left(1 - \frac{1-\mathfrak{I}}{2} \cdot \frac{\pi^2 + 1}{\pi^2} \right)}; \quad \gamma = \frac{1 + \frac{h_2^3}{h_1^3} \cdot k}{\frac{1+\mathfrak{I}}{2} + k^3 \frac{h_2}{h_1} \left(1 - \frac{1-\mathfrak{I}}{2} \cdot \frac{\pi^2 + 1}{\pi^2} \right)} \quad (17)$$

Обозначив $\frac{mb}{a} = \lambda$, найдем минимум σ :

$$\frac{d\sigma}{d\lambda} = \frac{D_{1C}}{h_1} \cdot \pi^2 / b^2 \cdot \left[2\lambda \cdot \phi \cdot \alpha - \frac{2}{\lambda^3} \cdot \beta \right] = 0,$$

отсюда

$$\lambda^4 = \frac{\beta}{\varphi \cdot \alpha},$$

$$\lambda^2 = \sqrt{\frac{\beta}{\varphi \cdot \alpha}}. \quad (19)$$

Подставив (19) в (17), получим

$$\sigma_{кр} = \frac{D_{1c}}{h_1} \cdot \frac{\pi^2}{b^2} \cdot [2\sqrt{\varphi \cdot \alpha \cdot \beta} + 2\gamma] =$$

$$= \frac{\pi^2 E}{9} \left(\frac{h_1}{b}\right)^2 2\varphi_c [\sqrt{\alpha \cdot \beta} \cdot \sqrt{\varphi} + \gamma]. \quad (20)$$

Таким образом,

$$\sigma_{кр} = K \cdot \frac{\pi^2 E}{9} \left(\frac{h_1}{b}\right)^2, \quad (21)$$

где $K = 2\varphi_c [\sqrt{\varphi} \cdot \sqrt{\alpha \cdot \beta} + \gamma]$, α , β , γ – величины, зависящие от соотношения геометрических параметров сечения ($K = c/b$; h_2/h_1) и степени неравномерности загрузки сечения \mathfrak{Z} (17).

Введем коэффициент, учитывающий зависимость критических напряжений потери устойчивости от степени неравномерности загрузки сечения \mathfrak{Z} :

$$K_\sigma = \frac{\sigma_{\mathfrak{Z} \neq 1}}{\sigma_{\mathfrak{Z} = 1}} = \frac{1 + \mathfrak{Z} + \frac{h_2}{h_1} \cdot k^3 \left[1 - \frac{1 - \mathfrak{Z}}{2} \cdot \frac{\pi^2 + 1}{\pi^2}\right]}{1 + \frac{h_2}{h_1} k^3}. \quad (22)$$

Несущая способность стержня: при $\mathfrak{Z} = 1$

$$P_{\mathfrak{Z} = 1} = 2\sigma_{кр} \cdot [h_1 \cdot b + h_2 \cdot c] =$$

$$= 2\sigma_{кр} \cdot b \cdot h_1 \left(1 + \frac{h_2}{h_1} \cdot k\right); \quad (23)$$

при $\mathfrak{Z} \neq 1$

$$P_{\mathfrak{Z} \neq 1} = P_{\mathfrak{Z} = 1} \cdot \frac{1 + \mathfrak{Z}}{2 \cdot K_\sigma}. \quad (24)$$

Порядок расчета:

исходные данные h_1 ; h_2 ; b ; c .
 Диаграмма сжатия $\sigma_i = f(\epsilon_i)$.

1. Определяются k ; α_1 ; β_1 ; γ_1 при $\mathfrak{Z} = 1$:

$$k = c/b;$$

$$\alpha_1 = \frac{1 + \frac{h_2^3}{h_1^3} \cdot k^3}{1 + \frac{h_2}{h_1} \cdot k^3};$$

$$\beta_1 = \frac{1 + \frac{h_2^3}{h_1^3} \cdot 1/k}{1 + \frac{h_2}{h_1} \cdot k^3};$$

$$\gamma_1 = \frac{1 + \frac{h_2^3}{h_1^3} \cdot k}{1 + \frac{h_2}{h_1} \cdot k^3}.$$

2. Задаваясь значением $\sigma > \sigma_{шт}$, найдем по формуле (21) отношение b/h_1 , для которого это значение σ является критическим.

Строится график $\sigma_{кр} = f(b/h_1)$.

3. По графику определяется $\sigma_{кр}$ для конкретного b/h_1 .

$$4. \mathfrak{Z} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{min}}.$$

5. K_σ определяется по формуле (22).

$$6. \text{Запас устойчивости } \eta = \frac{\sigma_{кр}}{K_\sigma \cdot \sigma_{max}}.$$

7. Несущая способность определяется по формуле (23) или (24).

Используя вышеприведенные формулы, был проведен расчет для двух вариантов исполнения опорного кронштейна: из материалов АЛ23-1 и АЛ27-1 [3]. Принятые в расчете диаграммы $\sigma(\epsilon)$ приведены на рис. 2.

Геометрические параметры и величины, определяемые этими параметрами, по двум расчетным сечениям приведены в табл. 1.

Зависимости $\sigma_{кр}$ от b/h для рассмотренных вариантов сечений и материалов приведены на рис. 3.

Несущая способность определяется сечением V и равна 83 т для АЛ23-1 и 80 т для АЛ27-1.

Таблица 1

Материал	Сечение	h_1 , мм	h_2 , мм	c , мм	b , мм	k	α	β	γ
АЛ27-1	IV	10	10	108	158	0,683	1	1,865	1,270
	V	10	10	80	108	0,740	1	1,670	1,235
АЛ23-1	IV	12	10	108	158	0,683	0,965	1,590	1,160
	V	12	10	80	108	0,740	0,958	1,445	1,130

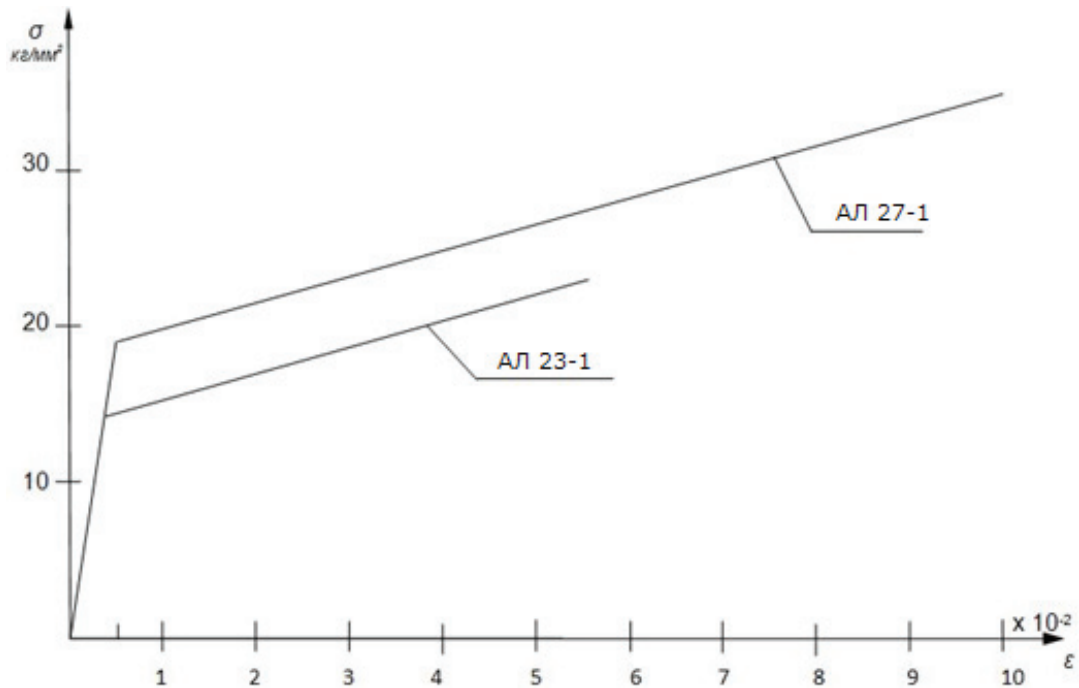


Рис. 2

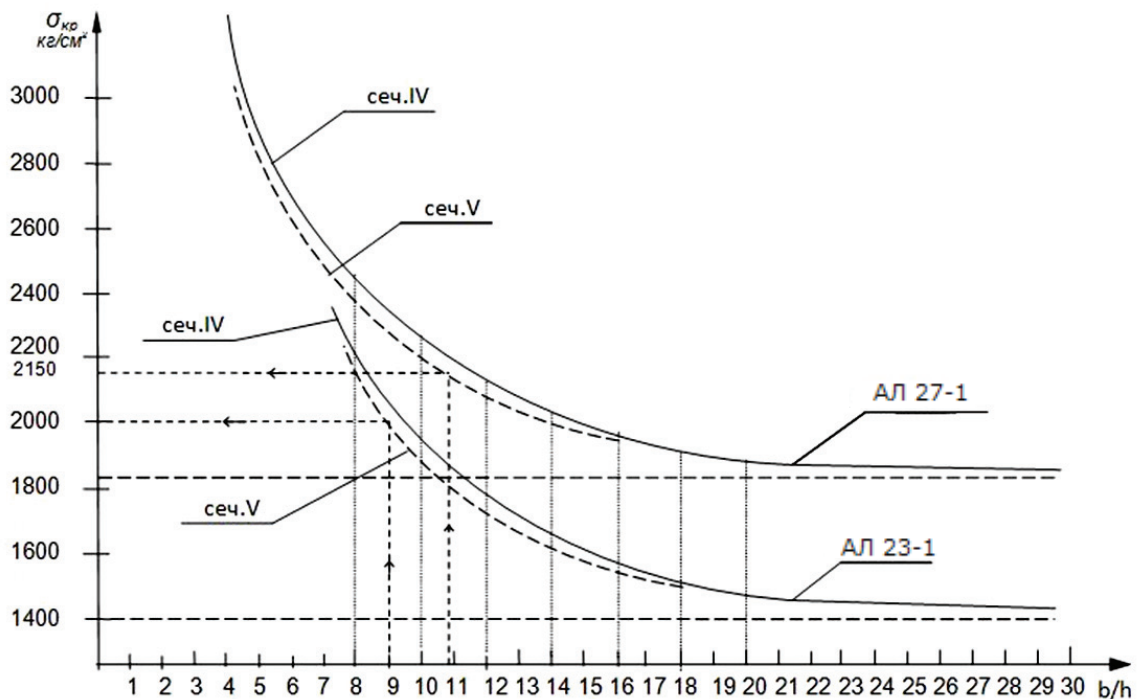


Рис. 3

Экспериментальной проверке подвергались кронштейны из АЛ23-1.

Несущая способность этих кронштейнов была в пределах 85–100 т. Превышение экспериментальных значений несущей способности над расчетными объясняется проведением расчетов по минимальным толщинам.

Библиографические ссылки

1. Кан С. Н. Строительная механика оболочек. М. : Машиностроение, 1966.
2. Вольмир А. С. Устойчивость деформируемых систем. М., 1969.
3. Технический отчет 33-436. КБПМ. 1967.

Статья поступила в редакцию
08.10.2012 г.