

В. Д. Вешуткин¹, А. Е. Жуков¹, А. М. Козлинский²
РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ БЕЗОПАСНОЙ РАБОЧЕЙ НАГРУЗКИ
УЗЛОВ КРЕПЛЕНИЯ КАБЕЛЬНЫХ ЛОТКОВ

¹*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,*
²*ООО "Профессиональные кабельные трассы", Н. Новгород*

Приведены методика и подробное описание расчетного определения допустимой нагрузки на узлы крепления кабельных лотков.

Ключевые слова: кабельный лоток, узел крепления, безопасная нагрузка, тонкостенный стержень, численные методы.

Для укладки кабельных трасс используются следующие типы кабельных лотков: сплошные, перфорированные, проволочные и лестничные (рис. 1). Конструкции узлов крепления лотков охватывают широкую номенклатуру изделий и способов: потолочное (палубное) крепление, крепление к стене (переборке) и нижнее крепление к полу или палубе (рис. 2). Определение безопасной рабочей нагрузки для рассматриваемых узлов представляет определенные трудности, так как конструкции являются тонкостенными и, как следствие, возможны различные виды разрушения, такие как нарушение прочности изделия в целом и отдельных его элементов, потеря устойчивости этих элементов или профиля в целом, срез болтов соединения, смятия тонкостенных стенок в зоне контакта, недопустимой деформации под действием нагрузки (превышение допустимого прогиба консоли).

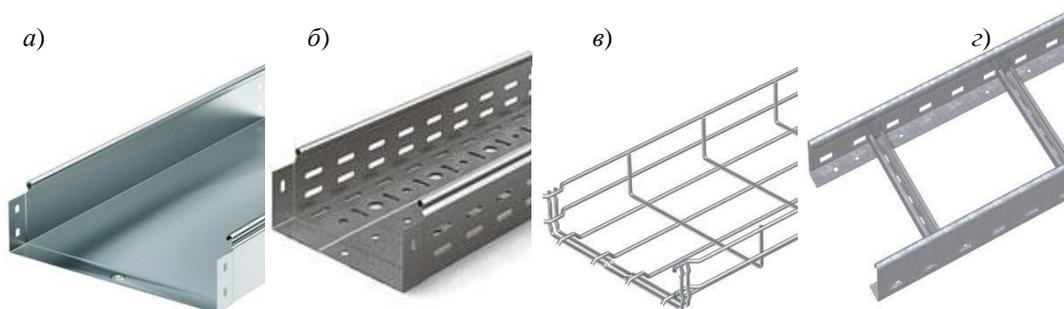


Рис.1. Типы кабельных лотков: а – сплошной, б – перфорированный, в – проволочный, г – лестничный

При расчете безопасной нагрузки, из возможных видов разрушения выбирается такой, который дает наименьшую разрушающую нагрузку. Для определения безопасной нагрузки, разрушающая нагрузка уменьшается с помощью коэффициента безопасности. Величина коэффициента безопасности зависит от вида разрушения и назначается различной для каждого вида разрушения. Для каждого типа узла предложена методика определения безопасной нагрузки с учетом особенностей конструкции. Для оценки использованы аналитические и численные методы (с использованием МКЭ).

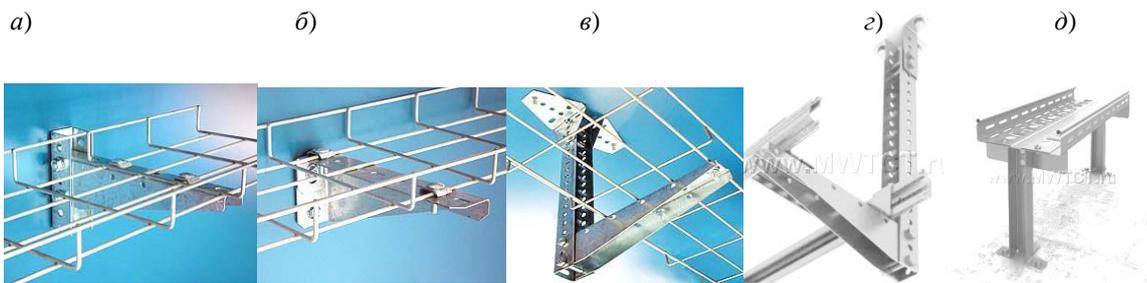


Рис.2. Способы крепления лотков: а, б – к стене; в, г – к потолку; д – к полу

1. Расчет безопасной рабочей нагрузки (БРН) консольных узлов крепления

Консольный узел рассматривался как балка переменного поперечного сечения, закрепленная на стойке, жестко прикрепленной к стене. БРН определялась при действии равномерно распределенной нагрузки различной ширины (в зависимости от ширины кабельного лотка) и изменялась от ширины равной 50 мм до максимальной ширины, размещаемой на консоли выбранной длины. Общий вид консоли показан на рис. 3, а схема закрепления и нагружения консоли на рис. 4. Консоль болтами крепится к стойке, а стойка жестко крепится к стене.



Рис. 3. Общий вид настенного кронштейна (консоли подвеса)

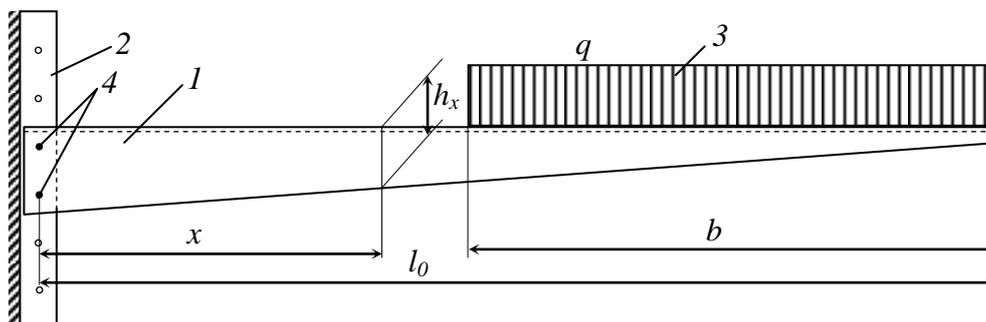


Рис. 4. Схема крепления и нагружения консоли: 1 – консоль; 2 – стойка; 3 – распределенная нагрузка от кабельного лотка; 4 – болты крепления

Целью расчета являлось определение допустимой интенсивности нагрузки q в Н/м и общей нагрузки равной $Q=qb$.

Безопасная нагрузка определялась с учетом коэффициентов запаса по каждому виду предельной нагрузки, как минимальная из возможных предельных нагрузок,

соответствующих различным видам разрушения конструкции узла подвеса. Коэффициенты запаса по отношению к критериям выхода из строя конструкции приняты следующие:

- по условию общей прочности консоли $n_1=1,7$;
- по условию прочности стенок опорного сечения $n_2=1,7$;
- по условию устойчивости стенки $n_3=1,9$;
- по условию прочности болта на срез $n_4=1,5$;
- по условию смятия стенок $n_5=1,0$;
- по условию жесткости (по прогибу конца) консоли $n_6=1,0$;

Расчетная нагрузка определится как наименьшая из всех нагрузок, определенных по разным критериям

$$[q] = q_{\min} = \begin{cases} [q_1] \\ [q_2] \\ [q_3] \\ [q_4] \\ [q_5] \\ [q_6] \end{cases} \text{ или } [Q] = Q_{\min} = \begin{cases} [Q_1] \\ [Q_2] \\ [Q_3] \\ [Q_4] \\ [Q_5] \\ [Q_6] \end{cases},$$

где равнодействующая распределенной нагрузки равна $[Q_i] = [q_i] \cdot b$.

При выполнении численных расчетов нагрузок были приняты следующие характеристики материала: $E=2 \cdot 10^5$ МПа; $\mu=0,3$; $\sigma_m = 240$ МПа.

Определение БРН из условия прочности консоли кронштейна

Расчетная схема консоли подвеса приведена на рис. 5.

Условие прочности при изгибе по технической теории изгиба балок для линейного напряженного состояния записывается в виде [1]

$$\sigma_x^{\max} \leq [\sigma], \quad (1)$$

где

$$\sigma_x^{\max} = \frac{M_y^{\max}}{I_y(x)} z(x)_{\max} \quad (2)$$

σ_x^{\max} – максимальные нормальные напряжения при действии рабочей нагрузки; M_y^{\max} – максимальный изгибающий момент; I_y – момент инерции площади поперечного сечения кронштейна (переменный по длине консоли); z_{\max} – расстояние от нейтральной оси до наиболее удаленной точки от этой оси (для поперечного сечения, показанного на рис. 7 $z_{\max} = z_0$). Допускаемые нормальные напряжения для данного критерия вычисляются по формуле

$$[\sigma] = \frac{\sigma_m}{n_1} \quad (3)$$

$[\sigma]$ – опасные напряжения, назначаемые в долях от предела текучести σ_m ;

n_1 – коэффициент безопасности ($n_1=1,7$).

Для приведенной на рис.5 схемы срезающая сила в произвольном сечении x определяется по формуле

$$V = -R_0 + \int_{x \geq a} q(x-a), \quad (4)$$

где

$$R_0 = qb. \quad (5)$$

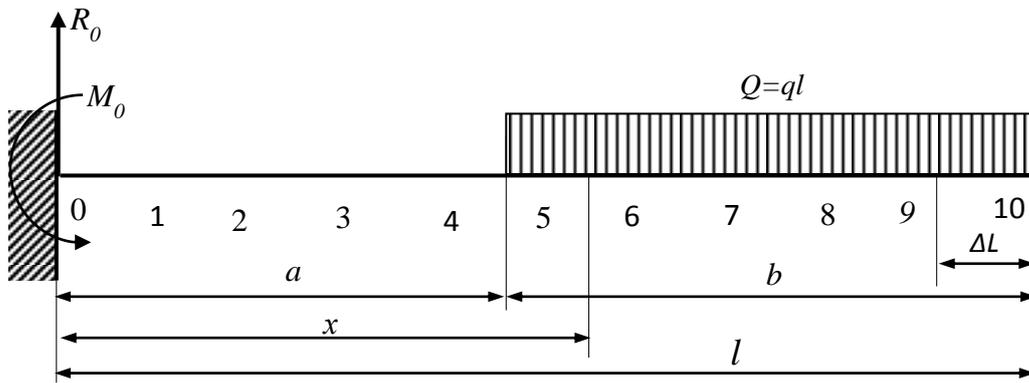


Рис. 5. Расчетная схема консольного подвеса (кронштейна)

Реактивный момент в заделке равен $M_0 = qb(a + b/2)$.

Тогда выражение для изгибающего момента примет вид

$$M = qb \left[a + b/2 - x + \left|_{x \geq a} \frac{(x-a)^2}{2b} \right. \right], \quad (6)$$

Разделив всю длину кронштейна на 10 равных участков, вычислим необходимые геометрические характеристики площади поперечного сечения в точках деления длины. Поперечное сечение показано на рис. 7. Учитывались стенки и прилегающие к отверстиям части верхней полки профиля. Полученные значения характеристик приведены в табл.1, а графики изменения моментов инерции и моментов сопротивления приведены на рис.6.

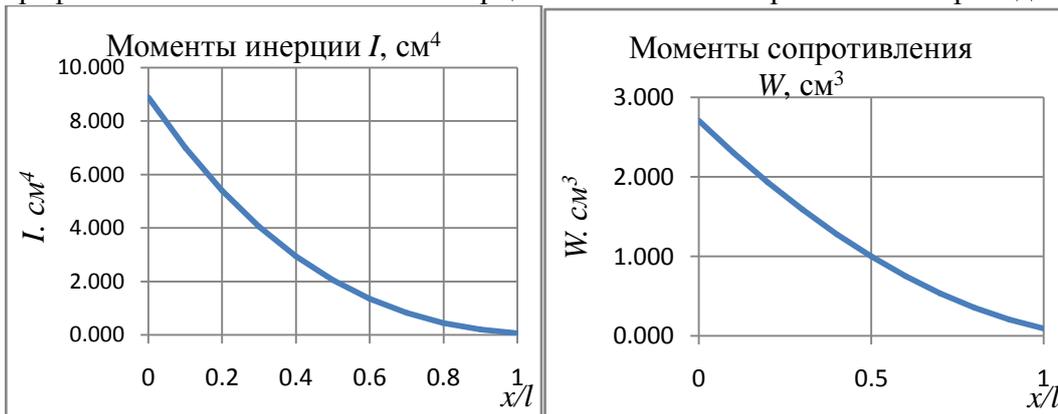


Рис.6. Распределение моментов инерции и моментов сопротивления по длине

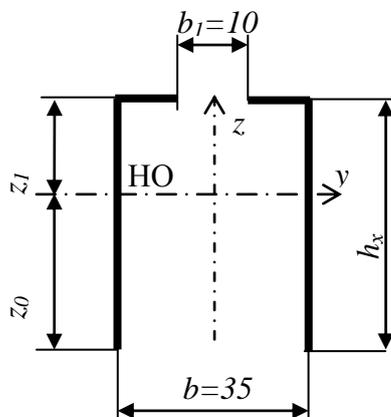


Рис.7. Схема поперечного сечения консоли

Таблица 1

№№ точек	x/l_0	h_x , мм	I_y , $см^4$	W , $см^3$
0	0	57,10	8,890	2,709
1	0,1	52,39	7,007	2,305
2	0,2	47,68	5,403	1,933
3	0,3	42,97	4,056	1,591
4	0,4	38,26	2,946	1,279
5	0,5	33,55	2,051	1,000
6	0,6	28,84	1,352	0,751
7	0,7	24,13	0,825	0,535
8	0,8	19,42	0,450	0,353
9	0,9	14,71	0,205	0,205
10	1,0	10,00	0,067	0,095

Нормальные напряжения в точках деления при действии единичной нагрузки $\bar{q} = 1$ будут равны (i – номер сечения, считая от заделки)

$$\sigma_i = \frac{M_i}{W_i} = \frac{\bar{q}b \left[a + b/2 - x_i + \left|_{x \geq a} \frac{(x_i - a)^2}{2b} \right. \right]}{W_i}. \quad (7)$$

Приравнявая в каждом сечении текущие нормальные напряжения допускаемым напряжениям, получим для каждого сечения допускаемую нагрузку

$$[Q_i] = q_i b = \frac{[\sigma] W_i}{\left[a + b/2 - x_i + \left|_{x \geq a} \frac{(x_i - a)^2}{2b} \right. \right]}. \quad (8)$$

Определяется минимальная нагрузка

$$[Q]_{\min} = \begin{cases} [Q_1] \\ \vdots \\ [Q_{10}] \end{cases} \text{ при } i = 1, \dots, 10. \quad (9)$$

Пример распределения нормальных напряжений по длине профиля К-600 (длина консоли 600 мм) в зависимости от длины распределения нагрузки b приведен на рис. 8. Распределение допустимой нагрузки по длине профиля К-600 при различной ширине лотка показано на рис. 9.

Определение БРН из условия прочности стенки при изгибе

Расчетным является момент в жесткой заделке, а верхний поясок профиля не успевает включиться в работу, и поэтому рассматривается сечение, состоящее из двух стенок с учетом отверстий в них. Расчетное сечение показано на рис. 10.

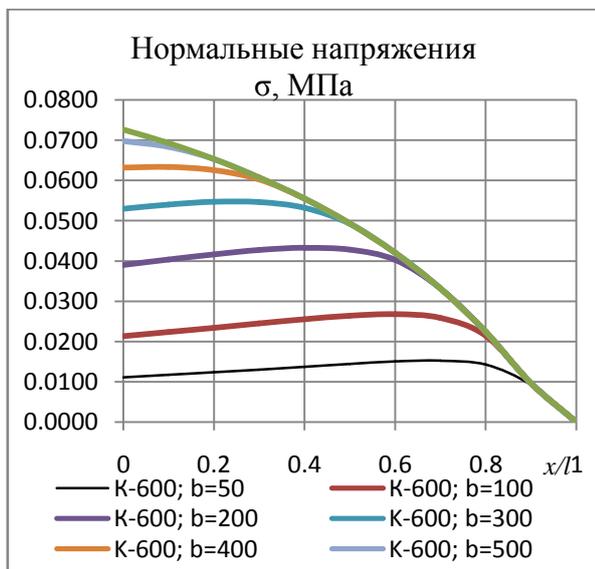


Рис. 8. Распределение нормальных напряжений от единичной интенсивности нагрузки по длине профиля К-600

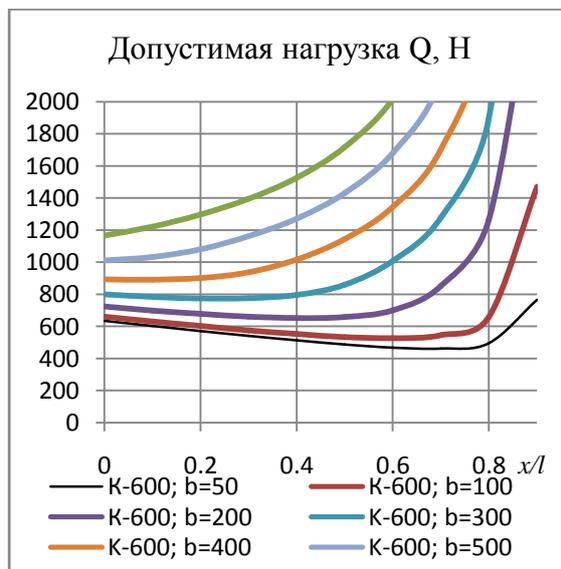


Рис. 9. Распределение допустимой нагрузки по длине профиля К-600 при различной ширине лотка

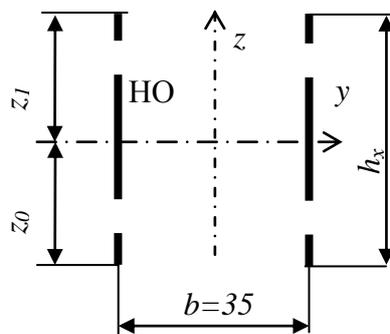


Рис. 10. Схема поперечного сечения консоли в заделке

Нормальные напряжения определяются по формуле (7) при $x=0$, тогда

$$\sigma_0 = [\sigma]_2 = \frac{M_0}{W_0} = \frac{[q]_2 b(a + b/2)}{W_0}. \quad (10)$$

Минимальная нагрузка определится по формуле

$$[Q]_2 = [q]_2 b = \frac{[\sigma]_2 W_0}{(a + b/2)}. \quad (11)$$

Определение БРН из условия устойчивости стенки

Аналитического решения для определения критической нагрузки устойчивости стенок такого профиля нет, поэтому определение таких нагрузок было выполнено численным методом.

Консоль представляет собой тонкостенный стержень с сечением, имеющим одну ось симметрии, подвергающийся изгибу в плоскости симметрии. Под действием эксплуатационных нагрузок возможна потеря устойчивости плоской формы стенок консоли.

Расчет консоли на устойчивость проводим методом конечных элементов. Для решения данной задачи используем тип элемента Shell3 — плоский оболочечный трёхузловой элемент с шестью степенями свободы в каждом узле. Общий вид геометрической модели консоли показан на рис. 11.

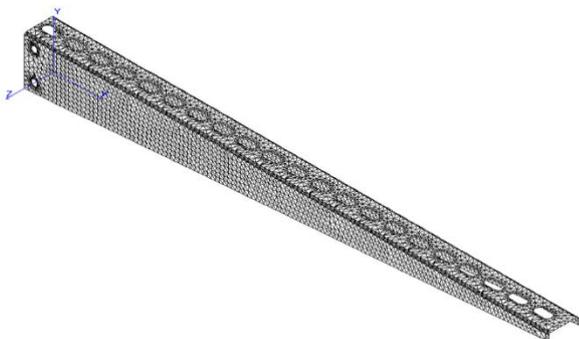


Рис. 11. Конечно-элементная модель консоли



Рис. 12. Закрепление и нагружение конструкции

Для расчета на устойчивость выбираем наиболее опасный случай — когда нагрузка приложена в крайней точке консоли — наиболее удаленной от точек закрепления, при этом плечо силы, а следовательно, изгибающий момент, будут максимальны (рис. 12).

В результате расчёта на устойчивость получены критические (эйлеровы) нагрузки, при которых происходит потеря устойчивости плоской формы стенок консоли. Эти нагрузки приведены в табл.2. Следует заметить, что существенное влияние на форму потери устойчивости, а, следовательно, на величину критической силы оказывает подтяжка стенки

кронштейна к стенке стойки. При использовании длинного болта (по ширине стойки) стенки стойки и кронштейна неподтянуты друг к другу. Если использовать распорную втулку между стенками кронштейна или короткие болты для стяжки стенок, то критическая нагрузка увеличивается. Так для консоли К-100 (типоразмер с наименьшей длиной) увеличение критической нагрузки составляет более 50%. Для консоли К-600 (типоразмер с наибольшей длиной) увеличение критической нагрузки составило всего 16%. Возможно проявляется влияние отношения высоты стенки к ее длине.

Таблица 2

Наименование консоли	Сподтяжкой стенок			Без подтяжки стенок (длинный болт)		
	P_3 , Н	M_3 , Нм	σ_3 , МПа	P_3^* , Н	M_3^* , Нм	σ_3^* , МПа
К-100	7184	359	359	3128	156	156
К-600	1998	1028	479	1680	864	403

Значения критических нагрузок получены для двух типоразмеров консоли и представлены в табл. 2. Форма потери устойчивости показана на рис. 13-14. Максимальное поперечное перемещение стенок для наиболее «слабой» конструкции (консоль К-600) составляет 1,5 мм, для консоли К-100 – 2,54 мм.

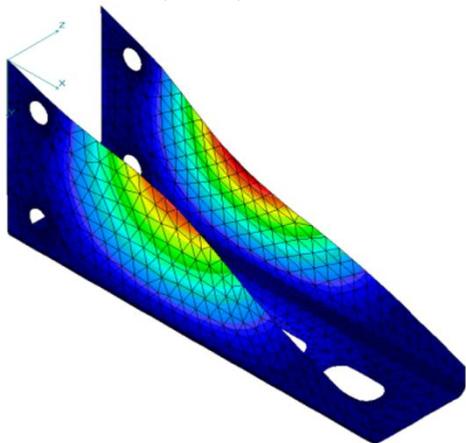


Рис. 13. Форма потери устойчивости консоли К-100

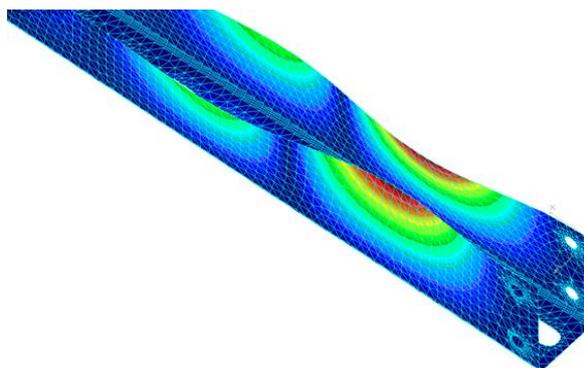


Рис. 14. Форма потери устойчивости консоли К-600

Определение БРН из условия прочности при срезе болта

Условие прочности болта при срезе записывается в виде

$$\tau_{cp} \leq [\tau]_{cp}, \quad (12)$$

где τ_{cp} – действующие касательные напряжения;

$[\tau]_{cp}$ – допускаемые касательные напряжения при срезе, которые определяются по формуле

$$[\tau]_{cp} = 0,5\sigma_m / n_4 = 0,5 \cdot 240 / 1,5 = 80 \text{ МПа} . \quad (13)$$

Срезающая сила в сечении расположения болтов равна

$$V_0 = qb, \quad (14)$$

где b – длина, на которой действует распределенная нагрузка (ширина лотка).

Будем считать, что срезающая сила уравнивается равными реакциями со стороны стенок определяемые выражением

$$R_{0y} = \frac{qb}{2} . \quad (15)$$

Момент в опорном сечении уравнивается парой сил R_{0x} с плечом c

$$M_0 = R_{0x}c,$$

откуда

$$R_{0x} = \frac{M_0}{c} = \frac{qb(a+b/2)}{c}. \quad (16)$$

Равнодействующая R_0 будет равна (рис.15)

$$R_0 = \sqrt{(R_{0x})^2 + (R_{0y})^2} = \sqrt{\left(\frac{qb}{2}\right)^2 + \left[\frac{qb(a+b/2)}{c}\right]^2} = \frac{qb}{2} \sqrt{1 + \left(2\frac{a+b/2}{c}\right)^2}. \quad (17)$$

Касательные напряжения среза

$$\tau_{cp} = \frac{R_0}{f_{cp}} = \frac{4R_0}{n\pi d^2} = \frac{4qb}{2n\pi d^2} \sqrt{1 + \left(2\frac{a+b/2}{c}\right)^2}, \quad (18)$$

где $n=2$ – число плоскостей среза одного болта.

Приравняв касательные напряжения среза допускаемым касательным напряжениям, получим выражение для определения допускаемой интенсивности нагрузки

$$[q]_4 = \frac{\pi d^2}{b} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(2\frac{a+b/2}{c}\right)^2}}. \quad (19)$$

Допускаемая нагрузка из условий среза будет определяться по формуле

$$[Q]_4 = qb = \frac{\pi d^2}{\sqrt{1 + \left(2\frac{a+b/2}{c}\right)^2}}. \quad (20)$$

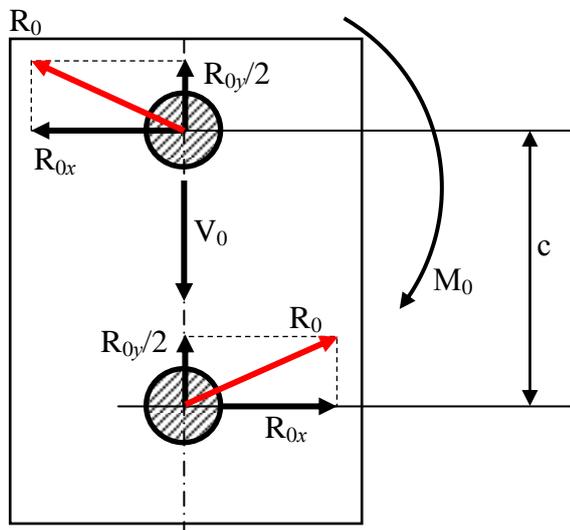


Рис. 15. Силы, действующие на тело болта

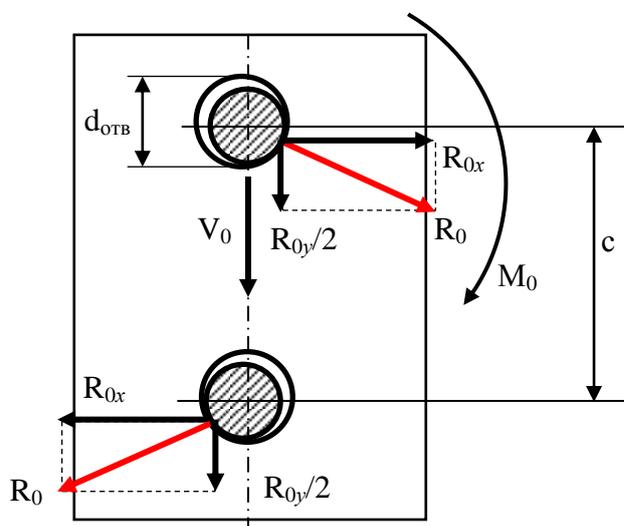


Рис. 16 Силы, действующие на стенку профиля при ее смятии в отверстии для болта

Определение БРН из условия прочности при смятии стенки в болтовом отверстии

Усилия, действующие на стенку профиля, передаваемые болтами показаны на рис. 16. Величины усилий определяются по формулам (15) – (17). Условие прочности при смятии

$$\sigma_{см} \leq [\sigma]_{см}, \quad (21)$$

где допускаемые нормальные напряжения на смятие равны

$$[\sigma]_{см} = \sigma_m / n_5 = 240 / 1,0 = 240 \text{ МПа} , \quad (22)$$

где $n_5=1$ – коэффициент безопасности по смятию.

Напряжения смятия

$$\sigma_{см} = \frac{R_0}{d_{ом\epsilon}t} = \frac{qb}{2d_{ом\epsilon}t} \sqrt{1 + \left(2 \frac{a+b/2}{c}\right)^2} . \quad (23)$$

Приравняв напряжения смятия и допускаемые напряжения, получим формулу для определения допустимой интенсивности равномерно распределенной нагрузки

$$[q]_5 = \frac{2[\sigma]_{см} d_{ом\epsilon}t}{b} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(2 \frac{a+b/2}{c}\right)^2}} . \quad (24)$$

Допускаемая нагрузка из условий смятия будет определяться по формуле

$$[Q]_5 = \frac{2[\sigma]_{см} d_{ом\epsilon}t}{\sqrt{1 + \left(2 \frac{a+b/2}{c}\right)^2}} . \quad (25)$$

Определение БРН из условия жесткости

Условие обеспечения достаточной жесткости

$$w_{\max} \leq [w] = \min \left\{ \begin{array}{l} l \\ 20 \\ 30\text{мм} \end{array} \right. . \quad (27)$$

Принимая начало координат на левом конце балки (рис. 2), после четырехкратного интегрирования дифференциального уравнения

$$(EIw'''' = q(x) \quad (28)$$

получим следующее выражение для определения элементов прогиба от изгиба балки переменного сечения

$$V = (EIw''')' = \int_0^x q(x)dx + V_0; \quad (29)$$

$$M = EIw'' = \int_0^x \int_0^x q(x)dx dx + V_0 x + M_0; \quad (30)$$

$$w' = \int_0^x \frac{1}{EI} \int_0^x \int_0^x q(x)dx dx dx + V_0 \int_0^x \frac{x}{EI} dx + M_0 \int_0^x \frac{dx}{EI} + \alpha_0; \quad (31)$$

$$w = \int_0^x \int_0^x \frac{1}{EI} \int_0^x \int_0^x q(x)dx dx dx dx + V_0 \int_0^x \int_0^x \frac{x}{EI} dx dx + M_0 \int_0^x \int_0^x \frac{dx dx}{EI} + \alpha_0 x + f_0 , \quad (32)$$

где V_0, M_0, α_0, f_0 – значения перерезывающей силы, изгибающего момента, угла поворота и стрелки прогиба балки в начале координат (на левом конце балки при $x=0$).

Учитывая, что значение изгибающего момента M для любого сечения балки известно, перепишем выражение (32) для w в виде

$$w = \frac{\bar{M}_0 L^2}{EI_0} \int_0^x \int_0^x \frac{M}{\bar{M}_0} \frac{I_0}{I} d\left(\frac{x}{L}\right) d\left(\frac{x}{L}\right) + \alpha_0 x + f_0, \quad (33)$$

где \bar{M}_0 и I_0 – введенные для удобства вычислений произвольные величины, имеющие размерность изгибающего момента и момента инерции поперечного сечения. Для определения начальных параметров α_0 и f_0 используются граничные условия на концах балки.

Для жестко заделанной балки при $x=0$ прогиб и угол поворота сечения равны нулю, то есть $w=f_0=0$, $w'=\alpha_0=0$. Тогда выражение (33) примет следующий вид

$$w = \frac{\bar{M}_0 L^2}{EI_0} \int_0^x \int_0^x \frac{M}{\bar{M}_0} \frac{I_0}{I} d\left(\frac{x}{L}\right) d\left(\frac{x}{L}\right). \quad (34)$$

Вычисления, связанные с использованием выражений (34) выполняются обычно в табличной форме по правилу трапеций. Длина балки при этом разбивается на n одинаковых участков, то есть принимается $\Delta(x/L)=1/n$. Для сечений балки на границах этих участков подсчитываются значения изгибающих моментов, определяются моменты инерции поперечных сечений,

вычисляются значения отношений $\frac{M}{\bar{M}_0}$ и $\frac{I_0}{I}$ и их произведения.

В таблице подсчитывается максимальный прогиб конца профиля \bar{w}_{\max} в сечении l_0 при действии единичной нагрузки $\bar{q}=1$. Затем определяется значение допустимой интенсивности по формуле

$$[q]_6 = \bar{q} \frac{[w]}{w_{\max}}, \quad (35)$$

а допускаемая безопасная нагрузка определится формулой

$$[Q]_6 = [q]_6 b. \quad (36)$$

2. Расчет БРН консольных стоек

Стойка представляется как балка постоянного поперечного сечения с жесткой заделкой одним концом, и другим концом без закрепления (свободный конец). К свободному концу прикладывается моментная нагрузка от прикрепленных консолей, а также продольная сила (сжимающая или растягивающая).

Поэтому определялась БРН в виде допустимого момента или допустимой продольной силы. Схема крепления и нагружения стойки приведена на рис. 17.

Безопасная нагрузка определялась с учетом коэффициентов запаса по каждому виду предельной нагрузки, как минимальная из возможных предельных нагрузок.

Коэффициенты запаса по отношению к различным формам разрушения приняты следующие:

при действии моментной нагрузки

- по условию общей прочности стойки $n_1=1,7$;
- по условию жесткости (по прогибу конца) стойки $n_2=1$
- по условию устойчивости стенки профиля $n_3=1,9$;
- по условию прочности болта на срез $n_4=1,5$;
- по условию смятия стенок стойки $n_5=1,0$;

при действии продольной силы

- по условию общей прочности стойки $n_1=1,7$;
- по общей устойчивости стержня $n_2=1,9$;
- по условию устойчивости стенки $n_3=1,9$;
- по условию прочности болта на срез $n_4=1,5$;
- по условию смятия стенок $n_5=1,0$;
- по условию жесткости (по прогибу и перемещению конца) стойки $n_6=1,0$.

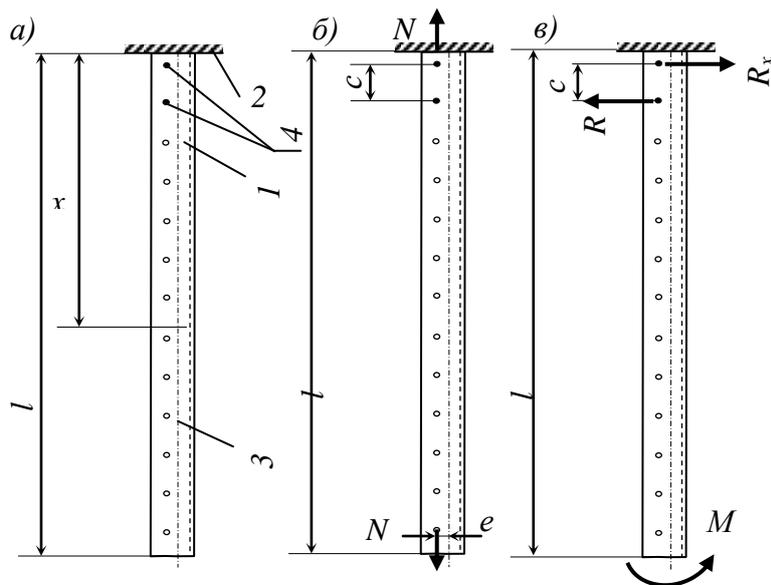


Рис. 17. Схемы крепления и нагружения стойки:
a – состав стойки; *б* – расчетная схема нагружения продольной силой; *в* – расчетная схема нагружения продольной моментом; *l* – стойка; 2 – жесткая заделка; 3 – нейтральная ось сечения; 4 – болты крепления;

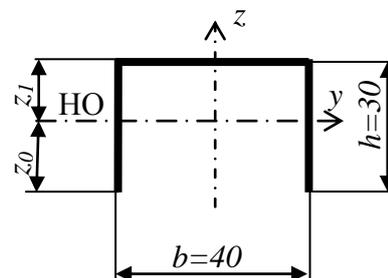


Рис. 18. Схема поперечного сечения стойки

Расчетная нагрузка определится как наименьшая из всех нагрузок, определенных по разным критериям:

$$\begin{array}{ll}
 \text{для моментной нагрузки} & \text{для продольной силы} \\
 [M] = M_{\min} = \begin{cases} [M_1] \\ [M_2] \\ [M_3] \\ [M_4] \\ [M_5] \end{cases} & [N] = N_{\min} = \begin{cases} [N_1] \\ [N_2] \\ [N_3] \\ [N_4] \\ [N_5] \\ [N_6] \end{cases}
 \end{array}$$

Определение БРН из условия прочности стойки при изгибе и растяжении при действии моментной нагрузки

Расчетные схемы стойки приведены на рис. 17. Поперечное сечение стойки на рис. 18. Толщина профиля принята 2 мм. В результате расчета получены следующие геометрические характеристики площади поперечного сечения: площадь сечения $A=2,00 \text{ см}^2$; отстояние нижней кромки профиля от НО $z_0=2,06 \text{ см}$; отстояние верхней кромки профиля от НО $z_1=0,94 \text{ см}$; момент инерции $I_y=1,843 \text{ см}^4$; момент сопротивления профиля $W_{\min}=0,895 \text{ см}^3$.

Условие прочности при изгибе по технической теории изгиба балок для линейного напряженного состояния записывается в виде [1]

$$\sigma_x^{\max} \leq [\sigma], \tag{37}$$

где

$$\sigma_x^{\max} = \frac{M_y^{\max}}{I_y} z_{\max}, \quad (38)$$

σ_x^{\max} – максимальные нормальные напряжения при действии рабочей нагрузки; M_y^{\max} – максимальный изгибающий момент; I_y – момент инерции площади поперечного сечения стойки; z_{\max} – расстояние от нейтральной оси до наиболее удаленной точки от этой оси (для поперечного сечения, показанного на рис.18, $z_{\max} = z_0$). Допускаемые нормальные напряжения для данного критерия вычисляются по формуле

$$[\sigma] = \frac{\sigma_m}{n_1} = \frac{240}{1,7} = 141 \text{ МПа}, \quad (39)$$

где $[\sigma]$ – опасные напряжения, назначаемые в долях от предела текучести σ_m ; n_1 – коэффициент безопасности ($n_1 = 1,7$).

Для схемы, приведенной на рис. 17, в, срезающая сила равна 0 в любом сечении профиля $V = 0$. Изгибающий момент постоянный по длине и равен M .

Приравняв действующие нормальные напряжения допускаемым напряжениям, получим из выражения (38) формулу для вычисления допускаемого момента

$$[M]_{\parallel} = [\sigma]_{\parallel} W_{\min}. \quad (40)$$

$[M]_{\parallel}$ – величина постоянная и не зависит от положения сечения стойки.

Определение БРН из условия прочности стойки при изгибе и растяжении при действии продольной нагрузки

Условие прочности при внецентренном действии продольной силы по технической теории изгиба балок для линейного напряженного состояния записывается [1] в виде (37), где нормальные напряжения определяются по формуле

$$\sigma_x^{\max} = \frac{M_y^{\max}}{I_y} z_{\max} + \frac{N}{A}. \quad (41)$$

Изгибающий момент появляется за счет эксцентриситета приложения силы и равен

$$M_y^{\max} = N e. \quad (42)$$

В пределе действующие напряжения должны быть равны допускаемым, тогда формула (41) примет вид:

$$[\sigma]_{\parallel} = \frac{N \cdot e}{W_{\min}} + \frac{N}{A} = N \left(\frac{e}{W_{\min}} + \frac{1}{A} \right) = \frac{N}{A} \left(\frac{A \cdot e}{W_{\min}} + 1 \right). \quad (43)$$

Допускаемая сила будет равна

$$[N]_{\parallel} = \frac{[\sigma]_{\parallel} A}{\left(\frac{A \cdot e}{W_{\min}} + 1 \right)}. \quad (44)$$

Определение БРН из условия общей устойчивости стойки от действия продольной силы

Допускаемая продольная сила определяется по следующей формуле

$$[N]_2 = \frac{N_{kp}}{n_2}, \quad (45)$$

где $N_{кр} = \sigma_{кр} A$; $n_2 = 1,9$ – коэффициент запаса по устойчивости; A – площадь поперечного сечения стойки; $\sigma_{кр}$ – критическое напряжение определяемое в зависимости от эйлерова напряжения по формулам [2]:

$$\sigma_{кр} = \sigma_э \quad \text{при} \quad \sigma_э \leq 0,6\sigma_m; \quad (46)$$

$$\sigma_{кр} = \left(1,12 - 0,312 \frac{\sigma_m}{\sigma_э} \right) \sigma_m \quad \text{при} \quad 0,6\sigma_m < \sigma_э \leq 2,6\sigma_m; \quad (47)$$

$$\sigma_{кр} = \sigma_m \quad \text{при} \quad \sigma_э \geq 2,6\sigma_m; \quad (48)$$

где эйлерово напряжение определяется по формуле

$$\sigma_э = \frac{200I_{\min}}{l^2 A}; \quad (49)$$

l – длина стойки в м;

$I_{\min} = 1,843 \text{ см}^4$ – минимальный момент инерции площади поперечного сечения стойки.

Определение БРН из условия жесткости стойки от действия моментной нагрузки

Условие жесткости [3]

$$w_{\max} \leq [w] = \min \left\{ \begin{array}{l} l \\ 20 \\ 30\text{мм} \end{array} \right. \quad (50)$$

Прогиб конца стойки определяется зависимостью

$$w = \frac{Ml^2}{2EI}, \quad (51)$$

откуда допускаемый момент равен

$$[M]_2 = \frac{2[w]EI}{l^2}. \quad (52)$$

Определение БРН из условия жесткости стойки от действия продольной силы

Продольная деформация определяется формулой

$$\Delta = \frac{Nl}{EA}; \quad (53)$$

прогиб конца стойки

$$w = \frac{Nel^2}{2EI}; \quad (54)$$

допустимая сила из условия ограничения продольной деформации

$$[N]_{6\Delta} = \frac{[\Delta]EA}{l};$$

допустимая сила из условия ограничения прогиба

$$[N]_{6w} = \frac{2[w]EI}{el^2}. \quad (55)$$

Определение БРН из условия устойчивости стенки при действии моментной нагрузки

Для приближенной оценки используем результаты численного расчета критической силы, полученные для консолей подвеса типа K .

Момент в заделке при потере устойчивости стенки для подвеса типа «К» равен

$$M_{0\gamma} = P_{\gamma} l_0. \quad (56)$$

Введем поправку на высоту стенки в зоне потери устойчивости, равную

$$k = \left(\frac{h}{h_x} \right)^{1,4}, \quad (57)$$

тогда момент в заделке при потере устойчивости стенки для стойки типа «С» будет равен

$$M_{\gamma} = k P_{\gamma} l_0. \quad (58)$$

где $h=30$ мм – высота стенки стойки (постоянная); h_x – высота стенки консоли типа «К» в середине зоны потери устойчивости. Результаты расчета критического момента в заделке для стойки типа «С» приведены в табл.3.

Таблица 3

Тип консоли	Критическая сила без подтяжки стенок P_{γ}^* , Н	Момент в заделке кронштейна M_0 , Нм по ф-ле (56)	Высота стенки кронштейна h_x , мм	Коэффициент k по ф-ле (57)	Критический момент в заделке стойки M_{γ} , Нм
К-100	3128	313	27,0	1,16	363
К-600	1680	1008	49,3	0,499	358

Определение БРН из условия устойчивости стенки при действии продольной силы

Напряжения потери устойчивости стенки для схемы рис. 19 составляют

$$\sigma_{\gamma} = k_{\sigma} \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)} \left(\frac{t}{b} \right)^2 = 0,9 k_{\sigma} E \left(\frac{t}{b} \right)^2 = 0,9 \cdot 0,46 \cdot 2 \cdot 10^6 \left(\frac{2}{30} \right)^2 = 368 \text{ МПа}. \quad (59)$$

Критическое напряжение $\sigma_{кр}$, определяемое в зависимости от эйлерового напряжения по формулам [2]:

$$\sigma_{кр} = \sigma_{\gamma} \text{ при } \sigma_{\gamma} \leq 0,6\sigma_m; \quad (60)$$

$$\sigma_{кр} = \left(1,63 - 0,8 \sqrt{\frac{\sigma_m}{\sigma_{\gamma}}} \right) \sigma_m \text{ при } 0,6\sigma_m < \sigma_{\gamma} \leq 1,6\sigma_m; \quad (61)$$

$$\sigma_{кр} = \sigma_m \text{ при } \sigma_{\gamma} \geq 1,6\sigma_m; \quad (62)$$

Учитывая формулы (60) – (62) получим

$$\sigma_{кр} = \left(1,63 - 0,8 \sqrt{\frac{240}{368}} \right) 240 = 236 \text{ МПа}.$$

$$[N]_{\text{в}} = \frac{A\sigma}{n_3} = \frac{2 \cdot 10^{-4} \cdot 236 \cdot 10^6}{1,9} = 24857 \text{ Н}.$$

Определение БРН из условия прочности болта на срез при действии моментной нагрузки

Условие прочности болта при срезе определяется формулой (12), где $\tau_{ср}$ – действующие касательные напряжения, определяемые выражением

$$\tau_{ср} = \frac{R_{0x}}{f_{ср}}; \quad (63)$$

$[\tau]_{ср}$ – допускаемые касательные напряжения при срезе, которые определяются по формуле (13)

Допускаемое усилие равно

$$[R_{0x}] = [\tau]_{cp} f_{cp} . \quad (64)$$

Площадь среза равна

$$f_{cp} = n \cdot \frac{\pi d^2}{4} = \pi d^2 = 2 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,6^2}{4} = 0,565 \text{ см}^2 ,$$

где $n = 2$ – число плоскостей среза.

Момент в опорном сечении уравнивается парой сил R_{0x} с плечом c

$$M_0 = R_{0x} c .$$

Откуда допускаемый момент равен

$$[M_0] = [\tau]_{cp} f_{cp} c = 80 \cdot 10^6 \cdot 0,565 \cdot 10^{-4} \cdot 30 \cdot 10^{-3} = 135,6 \approx 136 \text{ Нм} . \quad (65)$$

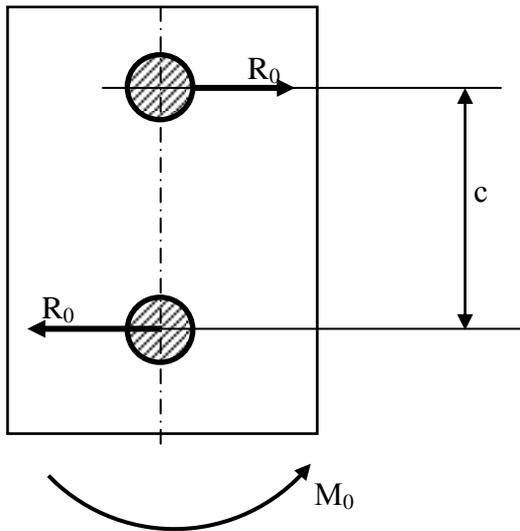


Рис. 19. Силы, действующие на тело болта от моментной нагрузки

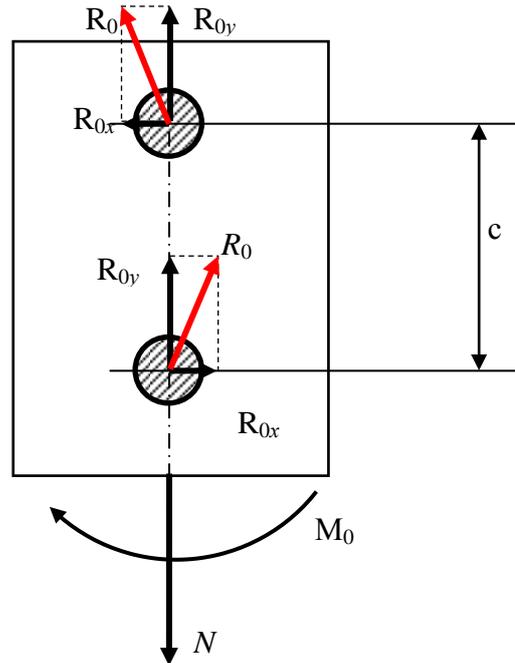


Рис. 20. Силы, действующие на тело болта при действии продольной силы

Определение БРН из условия прочности болта на срез при действии продольной силы

Условие прочности болта при срезе записывается в виде (12)

Будем считать, что продольная сила уравнивается равными реакциями со стороны стенок

$$R_{0y} = \frac{N}{2} . \quad (66)$$

Момент в опорном сечении уравнивается парой сил R_{0x} с плечом c :

$$M_0 = R_{0x} c .$$

В то же время $M_0 = Ne$, откуда

$$R_{0x} = \frac{M_0}{c} = \frac{Ne}{c} . \quad (67)$$

Равнодействующая R_0 будет равна (рис.20)

$$R_0 = \sqrt{(R_{0x})^2 + (R_{0y})^2} = \sqrt{\left(\frac{Ne}{2c}\right)^2 + \left(\frac{N}{2}\right)^2} = \frac{N}{2} \sqrt{\left(\frac{e}{c}\right)^2 + 1} = \frac{N}{2} \sqrt{\left(\frac{6,6}{30}\right)^2 + 1} = 0,512 N. \quad (68)$$

Касательные напряжения среза

$$\tau_{cp} = \frac{R_0}{f_{cp}} = \frac{0,512N}{f_{cp}}.$$

Приравняв касательные напряжения среза допускаемым касательным напряжениям, получим выражение для определения допускаемой продольной силы

$$[N]_4 = \frac{[\tau]_{cp} f_{cp}}{0,512} = \frac{80 \cdot 10^6 \cdot 0,565 \cdot 10^{-4}}{0,512} = 8828 \text{ Н}. \quad (69)$$

Определение БРН из условия прочности стенки на смятие при действии моментной нагрузки

Усилия, действующие на стенку профиля, передаваемые болтами показаны на рис. 21. Величина реактивного усилия определяются по формуле

$$R_{0x} = \frac{M_0}{c} = \sigma_{см} f_{см}. \quad (70)$$

Условие прочности при смятии определяется формулой (21), а допускаемые нормальные напряжения на смятие формулой (22), где $n_5=1$ – коэффициент безопасности по смятию.

Напряжения смятия

$$\sigma_{см} = \frac{M_0}{f_{см} c}. \quad (71)$$

Приравняв напряжения смятия и допускаемые напряжения, получим формулу для определения допустимого момента:

$$[M]_5 = [\sigma]_{см} f_{см} c = [\sigma]_{см} 2d_{отв} t c = 240 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot 7,3 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 30 \cdot 10^{-3} = 210 \text{ Нм}. \quad (72)$$

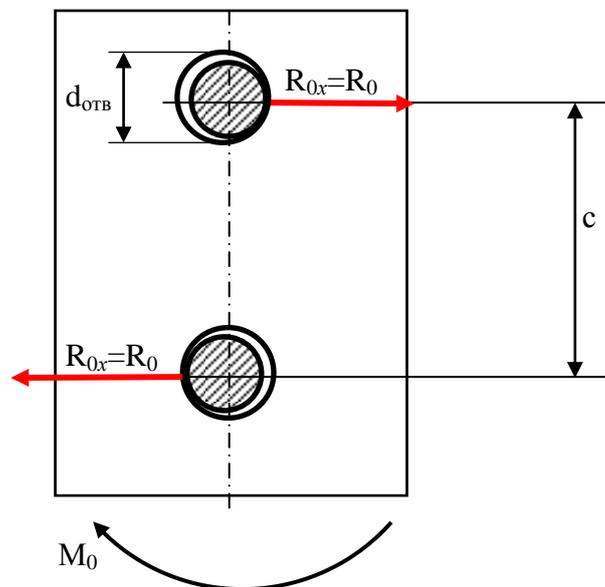


Рис. 21. Силы, действующие на стенку профиля при ее смятии в отверстиях для болта при моментной нагрузке

Определение БРН из условия прочности стенки на смятие при действии продольной силы

Равнодействующая определяется по формуле (68):

$$R_0 = 0,512 N .$$

Напряжения смятия

$$\sigma_{см} = \frac{R_0}{f_{см}} = \frac{0,512 N}{2dt} .$$

Откуда допускаемая продольная сила определится формулой

$$[N]_д = \frac{[\sigma]_{см} 2dt}{0,512} = \frac{240 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{0,512} = 11250 \text{ Н} .$$

Библиографический список

1. Давыдов, В.В. Прочность судов внутреннего плавания: справочник [Текст] / В.В. Давыдов [и др.]. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1978. – 520 с.
2. Российский Речной Регистр. Правила классификации и постройки судов внутреннего и смешанного плавания [Текст]. – М., 2008. Т. 1, 2.
3. Вольмир, А.С. Устойчивость деформируемых систем. Изд. 2-е, пер. и доп. [Текст] / А.С. Вольмир. – М.: Наука, 1967.–984с.
4. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник в 3-х т. Т 3[Текст] /под ред. И.А. Биргера и Я.Г. Пановко. – М.: Машиностроение, 1968. – 568с.