

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

С. А. БАГДАСАРЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ВНЕЦЕНТРЕННО СЖАТЫХ СТЕРЖНЕЙ И-ОБРАЗНОГО СЕЧЕНИЯ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Д 16-Т*

В 1964—65 годах в лаборатории Армянского НИИ строительных материалов и сооружений было произведено испытание внецентренно сжатых стержней прямоугольного, И-образного, швеллерного и таврового сечений из алюминиевого сплава Д 16-Т. Цель этих испытаний заключалась в выяснении влияния формы поперечного сечения на несущую способность сжатых элементов и определение степени соответствия расчетных данных с экспериментальными.

В данной статье освещаются результаты исследования внецентренно сжатых стержней И-образного сечения из алюминиевого сплава Д 16-Т; приводятся расчетные формулы для определения критической гибкости, составленные с учетом линейного упрочнения материала в области упруго-пластических деформаций на основе [2]; результаты экспериментального исследования сопоставлены с расчетными данными.

В основу расчета положены следующие допущения: во всех стадиях работы стержня сохраняется гипотеза плоских сечений; изогнутая ось стержня принимает форму полуволны синусоиды; прогибы стержня по сравнению с его длиной малы; напряжения по сечению распределяются согласно диаграмме σ — ϵ материала; диаграммы σ — ϵ при растяжении и сжатии одинаковы; влияние сдвигающих сил не учитывается; плоскость изгиба совпадает с плоскостью действия нагрузки.

Критическая гибкость внецентренно сжатого шарнирно опертого с обоих концов стержня согласно [2] определяется из следующего выражения:

$$\lambda_x^2 = \frac{\pi^2 E}{\varphi \varphi_n} \left(1 - \frac{m \varphi}{1 - \varphi} \right), \quad (1)$$

где

$$\varphi = \frac{P_{2x}}{\varphi_n F}; \quad m = \frac{e F}{W_x}.$$

* Научный руководитель проф. В. В. Пинаджян

В опасном сечении внецентренно сжатого стержня И-образного профиля к моменту истощения несущей способности могут возникнуть напряженные состояния, показанные на рис. 1. В зависимости от напряженного состояния опасного сечения по формулам, представленным в табл. 1, определяется коэффициент γ . Модуль упругости — E , предел текучести (предел пропорцио-

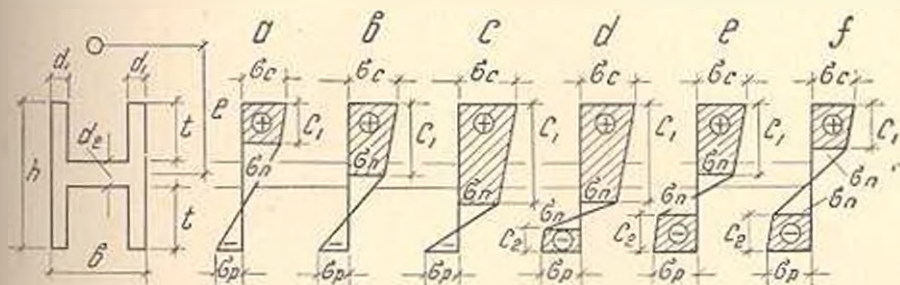


Рис. 1. Эпюры напряженных состояний сжатого стержня И-образного сечения.

нальности) — σ_p и коэффициент $\gamma = \frac{E_1}{E}$ определяются по линеаризованной диаграмме $\sigma - \epsilon$ сжатия материала.

В табл. 2. приведены результаты испытания на растяжение полос, вырезанных из полок заводских профилей И-образного сечения. В этой же таблице даны редуцированные коэффициенты, полученные ранее в [1] при сравнении физико-механических характеристик цилиндров при их испытании на сжатие и полос на растяжение. Предполагаемые характеристики материала И-образного сечения на сжатие, вычисленные с учетом редуцированных коэффициентов, даны в последней строке табл. 2.

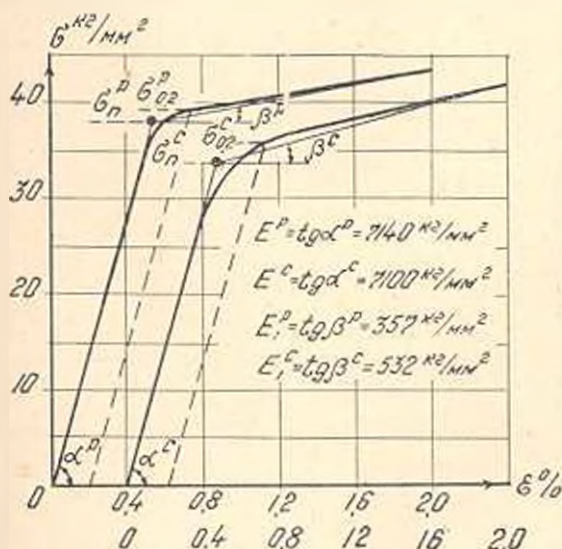


Рис. 2. Линеаризованные диаграммы напряжения-деформации при растяжении и сжатии.

Таблица 1

Расчетные формулы для стержней Н-образного сечения

№№ п/п	Напряжен- ное состоя- ние сечения	Высоты пластических зон	Коэффициент α
		в	г
1	a (рис. 1a)	$0 < c_1 \leq t$ $\frac{c_1}{h} = \alpha - \sqrt{\alpha^2 - \frac{1}{1-\psi} \frac{m\varphi}{1-\varphi} \frac{W_x}{d_1 h^2}};$ $\alpha = \frac{1}{2} + \frac{m\varphi}{1-\varphi} \frac{W_x}{hF};$	$\alpha = 1 - \frac{2c_1}{h} + \frac{2(1-\psi)d_1 c_1^2}{hF} \left[1 + \frac{1-\varphi}{m\varphi} \frac{hF(3h-2c_1)}{12J_x} \right];$
2	b (рис. 1b)	$t \leq c_1 \leq h-t$ $\frac{c_1}{h} = \alpha -$ $- \sqrt{\alpha^2 - \frac{t}{h} \left(1 - \frac{2d_1}{b}\right) \left(2\alpha - \frac{t}{h}\right) - \frac{2}{1-\psi} \frac{m\varphi}{1-\varphi} \frac{W_x}{bh^2}};$ $\alpha = \frac{1}{2} + \frac{m\varphi}{1-\varphi} \frac{W_x}{hF},$	$\alpha = 1 - \frac{2c_1}{h} + \frac{1-\psi}{2} \left[\frac{4d_1 c_1^2 + 2(b-2d_1)(c_1-t)^2}{hF} + \right.$ $+ \frac{(1-\varphi) \left[2d_1 c_1^2 \left(\frac{3}{2}h - c_1\right) + (b-2d_1)(c_1-t)^2 \left(\frac{3}{2}h - \right. \right.}{3m\varphi I_x}$ $\left. \left. - c_1 - 2t \right) \right]}{3m\varphi I_x} \left. \right]$

Таблица 1 (продолжение)

а	б	в	г
3	с (рис. 1с)	$h - t \leq c_1 \leq h$ $\frac{c_1}{h} = 1 - \alpha - \sqrt{\alpha^2 - \frac{\psi}{1-\psi} \frac{m\varphi}{1-\varphi} \frac{W_x}{d_1 h^2}};$ $\alpha = \frac{1}{2} - \frac{m\varphi}{1-\varphi} \frac{W_x}{hF};$	$\alpha = (1-\psi) \left\{ \frac{2d_1 (h-c_1)^2}{hF} + \frac{1-\varphi}{m\varphi} \left[1 - \frac{d_1 (h-c_1)^2 \left(\frac{h}{2} + c_1 \right)}{3I_x} \right] \right\} + \psi \left(1 - 2 \frac{c_1}{h} \right);$
4	д (рис. 1д)	$h - t \leq c_1 \leq h, \quad 0 \leq c_2 \leq t$ $(1-\psi) c_2^2 - \frac{F}{2d_1} (1-\varphi) c_2 - (1-\psi)(h-c_1)^2 +$ $+ \frac{F(1-\varphi)(h-c_1)}{2d_1} - \frac{\psi F}{d_1} \left(\frac{h}{2} - c_1 \right) = 0;$ $\alpha = \frac{h}{2} - \frac{m\varphi}{1-\varphi} \frac{W_x}{F};$ $\frac{\partial c_2}{\partial c_1} = \frac{\frac{F}{2d_1 h} (1-\varphi-2\psi) - 2(1-\psi) \left(1 - \frac{c_1}{h} \right)}{2(1-\psi) \frac{c_2}{h} - \frac{F}{2d_1 h} (1-\varphi)};$	$\alpha = \frac{(1-\varphi)(h-c_1-c_2)}{h} + \frac{(1-\psi)(1-\varphi)}{m\varphi} \left[1 - \frac{d_1 (h-c_1)^2 \left(\frac{h}{2} + c_1 \right) - d_1 c_2^2 \left(\frac{3}{2} h - c_2 \right)}{3I_x} \right];$

Таблица 1 (продолжение)

а	б	в	г
5	<i>e.</i> (рис. 1е)	$t \leq c_1 \leq h - t, \quad 0 \leq c_2 \leq t$ $(1 - \psi) c_2^2 - \frac{F c_2}{2d_1} (1 - \varphi) + \frac{F}{2d_1} (h - c_1) (1 - \varphi) - (1 - \psi) \times$ $\times \left[(h - c_1)^2 - (h - c_1 - t)^2 \left(1 - \frac{b}{2d_1} \right) \right] - \frac{\psi F}{d_1} \left(\frac{h}{2} - c_1 \right) = 0;$ $(h - c_1)^2 + \left(\frac{2d_1}{b} - 1 \right) t^2 + \frac{2\psi}{1 - \psi} \frac{m\varphi}{1 - \varphi} \frac{W_x}{b} -$ $- 2\alpha \left[h - c_1 + t \left(\frac{2d_1}{b} - 1 \right) \right] + \frac{2d_1}{b} (c_2^2 - 2\alpha c_2) \frac{\partial c_2}{\partial c_1} = 0;$ $\alpha = \frac{h}{2} - \frac{m\varphi}{1 - \varphi} \frac{W_x}{F};$ $\frac{\partial c_2}{\partial c_1} =$ $= \frac{\frac{F}{h} (1 - \varphi - 2\psi) + 2(1 - \psi) \left[\left(1 - \frac{c_1}{h} - \frac{t}{h} \right) (2d_1 - b) - \right.}{4d_1 (1 - \psi) \frac{c_2}{h} - \frac{F}{h} (1 - \varphi)}$ $\left. - 2d_1 \left(1 - \frac{c_1}{h} \right) \right]$ $\frac{\frac{c_2}{h} - \frac{F}{h} (1 - \varphi)}$	$\alpha = (1 - \varphi) \left(1 - \frac{c_1}{h} - \frac{c_2}{h} \right) + \frac{(1 - \psi)(1 - \varphi)}{m\varphi} \left\{ 1 - \right.$ $- \frac{2d_1 (h - c_1)^2}{3I_x} - \frac{\left(\frac{h}{2} + \frac{d_2}{2} - c_1 \right)^2 (b - 2d_1)}{3I_x} +$ $+ \frac{d_1 c_1^2 \left(\frac{3}{2} h - c_2 \right)}{3I_x} +$ $\left. + \frac{\left(\frac{h}{2} - c_1 \right) \left[2d_1 (h - c_1)^2 + (b - 2d_1) \left(\frac{h}{2} + \frac{d_2}{2} - c_1 \right)^2 \right]}{2I_x} \right\};$

Таблица 1 (продолжение)

а	б	в	г
6	f (рис. 1f)	$0 < c_1 \leq t, \quad 0 \leq c_2 \leq t$ $(1-\psi) c_2^2 - \frac{F(1-\varphi)c_2}{2d_1} + \frac{1}{2d_1} \left[F(1-\varphi)(h-c_1) - \right. \\ \left. - 2F\left(\frac{h}{2} - c_1\right) - (1-\psi) 2d_1 c_1^2 \right] = 0;$ $c_1^2 - 2\left(\frac{h}{2} + \frac{m\varphi}{1-\varphi} \frac{W_x}{F}\right) c_1 + \frac{1}{1-\psi} \frac{m\varphi}{1-\varphi} \frac{W_x}{d_1} + \\ + \left[c_2^2 - 2\left(\frac{h}{2} - \frac{m\varphi}{1-\varphi} \frac{W_x}{F}\right) c_2 \right] \frac{\partial c_2}{\partial c_1} = 0;$ $\frac{\partial c_2}{\partial c_1} = \frac{(1+\varphi) \frac{F}{h} - 4(1-\psi) d_1 \frac{c_1}{h}}{(1-\varphi) \frac{F}{h} - 4(1-\psi) d_1 \frac{c_2}{h}}.$	$z = (1-\varphi) \left(1 - \frac{c_1}{h} - \frac{c_2}{h} \right) + \\ + \frac{(1-\psi)(1-\varphi)}{6m\varphi I_x} [d_1 c_1^2 (3h - 2c_1) + d_1 c_2^2 (3h - 2c_2)].$

Принятые обозначения: F , I_x , W_x — площадь, момент инерции и момент сопротивления сечения относительно оси $x-x$.

Таблица 2

Физико-механические характеристики образцов из сплава Д 16-Т при испытании на растяжение и предполагаемые характеристики при сжатии

№№ п/п	Клеймо образца	σ_p кг/мм ²	$\sigma_{0,2}$ кг/мм ²	E тн/мм ²	σ_{sc} кг/мм ²	$\mu = \frac{\epsilon_p}{\epsilon_{sc}}$
1	11-1 р	37,0	39,5	7,15	38,2	0,050
2	11-2 р	37,2	39,6	7,10	38,1	0,050
3	12-1 р	36,9	39,3	7,13	37,9	0,050
4	12-2 р	37,0	39,4	7,14	38,0	0,040
5	13-1 р	36,8	39,2	7,15	37,6	0,050
6	13-2 р	36,9	39,4	7,17	38,0	0,050
7	14-1 р	37,1	39,7	7,16	38,3	0,060
8	14-2 р	37,0	39,3	7,16	37,9	0,060
9	15-1 р	37,3	39,6	7,14	38,2	0,050
10	15-2 р	37,2	39,6	7,13	38,2	0,050
11	16-1 р	36,8	39,3	7,12	38,1	0,050
12	16-2 р	37,0	39,3	7,13	37,9	0,050
среднее при растяжении		37,0	39,4	7,14	38,0	0,050
редукционные коэф- фициенты		$\frac{\sigma_p}{\sigma_{0,2}} = 0,825$	$\frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_{sc}} = 0,936$	$\frac{E^c}{E^p} = 0,994$	$\frac{\sigma_{sc}}{\sigma_p} = 0,897$	$\frac{\epsilon_p}{\epsilon_{sc}} = 1,50$
Физико-механические характеристики сплава при сжатии		30,5	36,9	7,10	31,1	0,075

На рис. 2 показаны линеаризованные диаграммы $\sigma - \epsilon$ сплава Д 16-Т при растяжении полос из полос 11-образного сечения и соответствующая диаграмма сжатия того же материала.

Для испытания стержней на внецентренное сжатие было изготовлено 18 образцов 11-образного сечения из сплава Д 16-Т гибкостями 40, 60 и 100. Геометрические характеристики сечения приведены на рис. 4.

Относительный эксцентриситет приложения нагрузки принимался равным $m = 0,5$; 1,0 и 3,0 для каждой гибкости. Торцы образцов были обработаны с точностью до 0,005 мм и их перпендикулярность к оси проверена угольником первого класса. Выгибы образцов до испытания составляли не более 1/1000 их длины. Для испытания были использованы те же пожевые шарнирные приспособления, что и для образцов прямоугольного сечения, описанные в [1]. Деформации крайних волокон внецентренно сжатого стержня определялись при помощи датчиков сопротивления с базой 20 мм. Прогны образцов в середине и в четверти длины, а также их укорочение определялись при помощи прогибомеров ПАО-6. Испытания образцов производились на гидравлических прессах ГМС-20 и ГРМ-1.

На рис. 3 показан образец во время испытания на внецентренное сжатие. В результате испытаний для каждого образца 11-образного сечения были получены следующие параметры: деформации край-

них волокон сечений в середине и в четверти расчетной длины, прогибы оси стержня в середине и в четверти, укорочение образца, критическая нагрузка.

Каждый образец перед испытанием тщательно центрировался так, чтобы показания датчиков по каждому сечению не отличались между собой более чем на 5%. После центрировки образец сдвигался от оси приложения нагрузки на величину необходимого эксцентриситета с точностью до 0,01 мм. Нагрузка к образцу прикладывалась ступенями в 4-5% от предполагаемой критической силы до появления пластических деформаций. Следующие ступени нагрузки составляли 1-2% от $P_{кр}$. Отсчеты по приборам брались после стабилизации деформаций. Точность измеряемой нагрузки составляла 1%. Результаты испытаний внецентренно сжатых стержней И-образного сечения приведены в табл. 3. Во всех стержнях, кроме 4-05-1, процесс исчерпания несущей способности не сопровождался местной потерей устойчивости полок.

Деформации крайних сжатых волокон в среднем сечении стержня 4-05-1, начиная с нагрузки, равной 0,98 $P_{кр}$, росли скачкообразно, причем одновременно со скачком деформации отмечалось временное падение нагрузки на прессе. Таких скачков наблюдалось два, по-видимому, вследствие неодновременной потери местной устойчивости обеих полок. После второго скачка произошла потеря устойчивости всего стержня.

На основе полученных в табл. 2 физико-механических характеристик материала при сжатии по формуле (1), были вычислены кривые в координатном поле $\sigma-\lambda$ для значений $m=0,5; 1,0$ и $3,0$. Расчет по напряженному состоянию f (рис. 1) производился на электронной вычислительной машине. Результаты расчетов приведены в табл. 3 и на рис. 4. Для сопоставления там же приведены кривые, вычисленные по формулам СНиП II-B.5-64 [3].

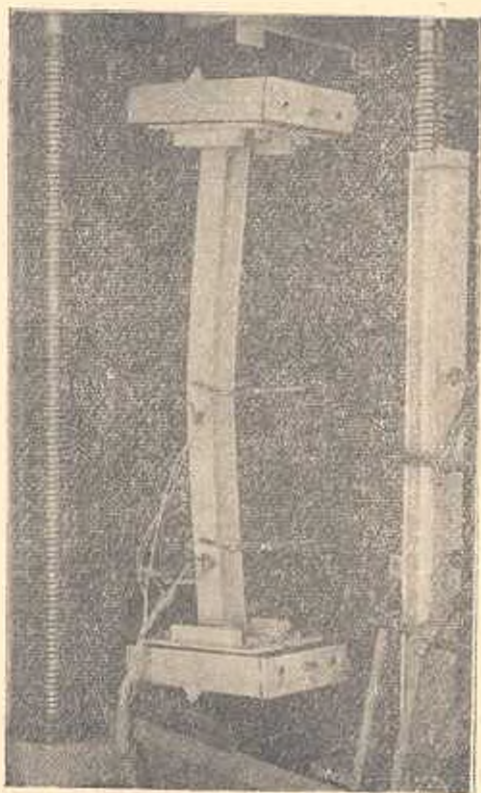


Рис. 3. Испытание стержня И-образного сечения на внецентренное сжатие.

Таблица 3

Результаты испытания внецентренно сжатых стержней II-образного сечения из сплава Д 16-Т

№№ пп	Клеймо образца	$l = \frac{l_p}{r_x}$	m	$P_{кр}$ и кг	$\sigma_{ср}$	$\sigma_{ср} = \frac{P_{кр}}{F_0}$	$\sigma_{ср}$	$\sigma_{ср}$ по СНиП	длина по формуле (1)	$\sigma_{ср}$	$\sigma_{ср}$
1	4-05-1	39,95	0,5	9200	20,40	0,600	0,603	0,601	0,590	1,003	1,022
2	4-05-2	39,98	0,5	9300	20,62	0,606					
3	4-1-1	39,97	1,0	7400	16,41	0,182	0,484	0,506	0,478	0,957	1,013
4	4-1-2	40,04	1,0	7480	16,60	0,487					
5	4-3-1	40,10	3,0	4830	10,70	0,315	0,310	0,333	0,292	0,931	1,062
6	4-3-2	39,96	3,0	4680	10,38	0,305					
7	6-05-1	59,95	0,5	6150	13,64	0,401	0,399	0,409	0,395	0,976	1,010
8	6-05-2	60,08	0,5	6120	13,59	0,398					
9	6-1-1	60,00	1,0	5260	11,66	0,343	0,312	0,349	0,337	0,980	1,014
10	6-1-2	60,03	1,0	5240	11,62	0,341					
11	6-3-1	59,98	3,0	3390	7,52	0,221	0,221	0,235	0,219	0,942	1,008
12	6-3-2	60,00	3,0	3400	7,54	0,221					
13	10-05-1	100,00	0,5	2890	6,41	0,188	0,187	0,198	0,185	0,944	1,012
14	10-05-2	99,93	0,5	2870	6,36	0,187					
15	10-1-1	100,05	1,0	2520	5,59	0,164	0,164	0,177	0,166	0,927	0,988
16	10-1-2	100,10	1,0	2540	5,64	0,165					
17	10-3-1	100,10	3,0	2060	4,58	0,131	0,135	0,132	0,131	1,023	1,030
18	10-3-2	100,06	3,0	2090	4,66	0,137					

Нетрудно заметить лучшую сходимость экспериментальных данных с результатами расчета по формуле (1), по сравнению с результатами, получаемыми по [3].

Разница между результатами СНиП и экспериментальными данными в диапазоне гибкостей 40—100 идет не в запас прочности в пределах 7%, в то время как результаты, полученные по формуле (1) в указанном диапазоне гибкостей, идут в запас прочности в пределах 6%. Во втором случае исключение составляет элемент гибкостью $\lambda = 100$ при $m = 1,0$, где имеется отклонение не в запас прочности в 1%.

На основании проведенного исследования можно прийти к следующим выводам:

1. Проведенное сравнение экспериментальных значений критических сил внецентренно сжатых стержней II-образного сечения из сплава Д 16-Т с результатами расчета по предложенной в [2] методике и по СНиП II-B-5-64 показало, что при $m = 0,5; 1,0$ и 3 в диапазоне гибкостей $\lambda = 40-100$ экспериментальные данные лучше согласуются с результатами, полученными по формуле (1). Наибольшая разница между ре-

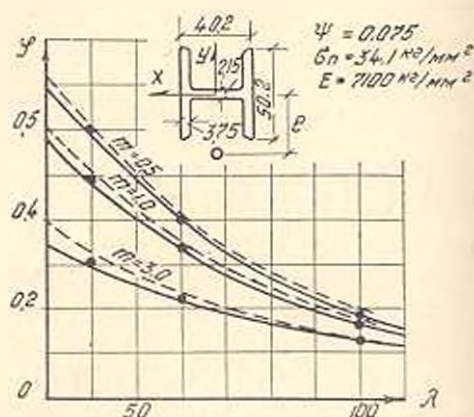


Рис. 4. Сопоставление экспериментальных результатов с расчетными. Сплошной линией показаны кривые, полученные по формуле (1); штрих линией кривые, полученные по СНиП II-B-5-64; кружочками показаны результаты экспериментов.

результатами, полученными по СНиП II—В.5—64 и экспериментальными данными в указанном диапазоне гибкостей и эксцентриситетов достигает 7% при $\lambda=40$, $m=3,0$ и $\lambda=100$, $m=1,0$, причем расчет по СНиП в этом случае дает отклонение не в запас прочности. Кривые СНиП дают отклонения в запас прочности до 2% по сравнению с экспериментальными данными только при $\lambda=40$, $m=0,5$ и $\lambda=100$, $m=3,0$.

2. Наибольшая разница между результатами расчета по формуле (1) и экспериментальными данными достигает 6% при $\lambda=40$, $m=3,0$, причем везде, кроме $\lambda=100$, $m=1,0$, расчет по предложенной методике идет в запас прочности.

При $\lambda=100$, $m=1,0$ расчет по формуле (1) идет не в запас всего на 1%, что находится в пределах возможной ошибки расчета и эксперимента.

Армянский НИИ строительного
и сооружений

Поступило 15.X.1965

И. В. РАЧУНЦЕВ

ԱՅՈՒՄԼԻԷ Դ16-Դ ՀԱՄԱՋՈՒՄՈՒԹՅԱՆ ՊԱՏՐԱՍՏԱԿԱՆ ԽՈՐՀԱՆԳ ՈՒՆԵՆՈՂ ԱՊԱԿԵՆՏՐՈՆ ՍԵՂՄԱՆ ՉՈՂԵՐԻ ԿՐԻՏԻԿԱԿԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ա Վ Փ Ո Փ Ո Վ

Հողածուր ընդհանուր էն աղյուսիկի Դ16-Դ համաձուլվածքից պատրաստված 11-ձևի կտրվածք ունեցող ապակենարոն սեղմված ձողերի կրիտիկական հեռությունը որոշելու հաշվարկային բանաձևեր:

Հրապերիմենտալ հետազոտությունների տվյալները բաղադրված են հաշվարկային և СНиП II—В.5—64-ից ստացվող արդյունքների հետ: Բաղադրված աղյուսիկները ընդհանուր էն օղ. 3 և ևկ. 4-ում: 40—100 հեռություն և 0,5, 1,0, 3,0 հարաբերական ապակենարոնացում ունեցող ձողերի համար արդյունքները հաշվարկային բանաձևերը տալիս են հրապերիմենտալ տվյալների գրեթե համընկնող արդյունքներ: СНиП II—В.5—64-ի կորեկով ստացվող արդյունքների մաքսիմալ տարբերությունը հրապերիմենտալ տվյալներից կազմում է 7%, ըստ որում СНиП-ի տվյալներով հաշվարկումը իջեցնում է ապակենարոնացումը պաշարը:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Խաչատրյան Շ. Ա. Экспериментальное исследование несущей способности сжатых стержней из алюминиевого сплава Д 16-Т. Известия АН Армянской ССР, серия технических наук, XVIII, № 3, 1965.
2. Пачаджан В. В. Некоторые вопросы предельного состояния сжатых элементов стальных конструкций. Изд-во АН АрмССР, Ереван, 1956.
3. Строительные нормы и правила. Часть II, раздел В, гл. 5. Алюминиевые конструкции. Нормы проектирования. Москва, 1965.