

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

В. В. Пинаджян

К расчету сжатых составных стальных стержней с раскосной соединительной решеткой

(Представлено А. Г. Назаровым 21 IV 1952)

Практика проектирования, строительства и эксплуатации сооружений выдвигает новые задачи, требующие дальнейшего развития и уточнения теории расчета строительных конструкций.

В 1941 году автор этой заметки участвовал в обследовании деформировавшейся фермы моста пролетом 87,6 м. Было установлено, что основной причиной повреждения фермы послужила конструктивная слабость диагоналей соединительной решетки сжатого раскоса. В таблице 1 даны основные характеристики деформировавшегося раскоса. В этой же таблице приведены данные по аналогичной и общеизвестной деформации моста через р. Припять, а также характеристики и результаты испытания двух составных стальных стержней по типу деформировавшихся раскосов.

Обычно критическая продольная сила для сжатых составных стержней с раскосной решеткой вычисляется на основании следующей формулы (¹):

$$N_{кр.} = \frac{\frac{\pi^2 T I}{l^2}}{1 + \frac{\pi^2 T I}{n E F_d \cos \beta \cdot \sin^2 \beta}}, \quad (1)$$

здесь T — обобщенный модуль продольного изгиба,

I — момент инерции монолитного сечения стержня относительно оси, перпендикулярной плоскости решетки.

Критическая сила, вычисленная по формуле (1), оказывается на много больше фактической несущей способности составных стержней, описанных в таблице 1. Несоответствие между теоретическими и опытными данными следует объяснить тем, что в выражении (1) не учитываются сжимающие силы, возникающие в диагоналях соединительной решетки от деформации сжатых ветвей составного стержня, начальная кривизна стержня, а также внецентренность передачи

Таблица 1

Наименование элемента	Х а р а к т е р и с т и к а		Обстоятельства, при которых произошла дефор- мация элемента	Характер деформации
	элемента в целом	соединительной решетки элемента		
1	2	3	4	5
Деформировав- шийся раскос стальной фермы пролетом 87,6 м ⁽⁵⁾ .	Прямолинейный составной стержень расчетной длиной $l = 13,3$ м из двух ветвей корытного сечения с решеткой треугольной системы с распорками. В средней части по длине элемента взамен трех диагоналей установлены планки. Площадь сечения раскоса $F = 351 \text{ см}^2$; число стенок решетки $n = 2$; момент инерции сечения относительно центральной главной оси, параллельной плоскости решеток $I_x = 101000 \text{ см}^4$; то же относительно оси, перпендикулярной плоскости решеток $I_y = 200000 \text{ см}^4$; гибкость при изгибе элемента в плоскости, перпендикулярной плоскости решеток $\lambda_x = 79$; то же при изгибе в плоскости решетки $\lambda_x = 56$; момент инерции сечения ветви раскоса относительно собственной центральной оси, перпендикулярной плоскости решеток $I_1 = 1120 \text{ см}^4$.	Диагонали и распорки соединительной решетки раскоса из уголков $60 \times 30 \times 6 \text{ мм}$ площадью сечения $F_d = 5,09 \text{ см}^2$; момент инерции сечения диагонали в плоскости изгиба $I_d = 2,29 \text{ см}^4$; расчетная длина диагонали $l_d = 83 \text{ см}$; гибкость диагонали $\lambda_d = 109$; $\sin \beta = 0,70$; $\cos \beta = 0,72$ (β — угол, составленный диагональю с ветвью раскоса); эксцентриситет приложения нагрузки к диагонали решетки $a = 0,7 \text{ см}$; относительный эксцентриситет $m = 0,9$; диагонали и распорки прикреплены к ветвям раскоса одинарными односрезными заклепками диаметром $d_3 = 16 \text{ мм}$.	Деформировав- шийся раскос имел начальный прогиб в плос- кости соедини- тельной решетки $e_n = 4 \text{ см}$. Выпу- чивание раскоса произошло при движении по мо- сту с большой скоростью тя- желовесного то- варного поезда; по расчету уси- лие в раскосе с учетом дина- мики в момент аварии состав- ляло 270 т.	Изгиб произо- шел в плоскости решетки раско- са. После про- хода поезда стре- ла прогиба рас- коса достигла 27 см; сжатые диагонали соеди- нительной ре- шетки выпучи- лись на величи- ну до 12 мм; в концевых уча- стках раскоса за- клепки, прикреп- ляющие растя- нутые диагонали к ветвям, ока- зались срезан- ными.

Деформировавшиеся раскосы стальной фермы моста через р. Припять у Мозыря (6,7).

Раскос длиной $l = 15,4$ м из двух ветвей с треугольной соединительной решеткой с распорками: $F = 381 \text{ см}^2$; $n = 2$; $I_x = 117.000 \text{ см}^4$; $I_y = 247.000 \text{ см}^4$; $\lambda_x = 87$; $\lambda_y = 60$; $I_1 = 1027 \text{ см}^4$.

Диагонали распорки из уголков $60 \times 30 \times 6$ мм; сечением $F_d = 5,09 \text{ см}^2$; $I_d = 2,99 \text{ см}^4$; $l_d = 114 \text{ см}$; $\lambda_d = 149$; $\sin \beta = 0,54$; $\cos \beta = 0,84$; $d = 0,72 \text{ см}$; $m = 0,9$; $d_3 = 18 \text{ мм}$.

Раскосы имели начальную кривизну. Выпучивание раскосов произошло при движении по мосту испытательного поезда. По расчету в момент аварии сжимающее усилие в раскосе не превышало 220 т.

При аварии стрела прогиб в плоскости решеток достигла в раскосе верхней фермы 146 см; нижней — 90 см; сжатые диагонали, решетки выпучились.

Стальные модели деформировавшихся раскосов моста через р. Припять у Мозыря (7).

$l = 3$ м; $F = 19 \text{ см}^2$; $n = 2$; $I_x = 250 \text{ см}^4$; $I_y = 587 \text{ см}^4$; $\lambda_x = 83$; $\lambda_y = 54$; $I_1 = 5 \text{ см}^4$.

Диагонали из уголков $13 \times 7 \times 1,2$; $F_d = 0,24 \text{ см}^2$; $I_d = 0,0081 \text{ см}^4$; $l_d = 24,5 \text{ см}$; $\lambda_d = 135$; $\sin \beta = 0,54$; $\cos \beta = 0,84$; $a = 0,16 \text{ см}$; $m = 0,8$; $d_3 = 5 \text{ мм}$.

При испытании на продольный изгиб составные стержни разрушились при нагрузке равной 22,5 т.

При сжимающем усилии в 14 т наблюдалось заметное выпучивание сжатых диагоналей решетки. При критической нагрузке выпучивание образцов произошло в плоскости решеток.

усилия от ветвей к элементам соединительной решетки. Приближенное выражение критической силы с учетом этих факторов можно установить на основе метода расчета конструкции по предельному состоянию.

Максимальная перерезывающая сила при изгибе сжатого стержня ^(2,3,4):

$$Q = \frac{\pi \cdot e}{l} N.$$

Усилие в диагонали составного стержня под действием перерезывающей силы, при угле наклона диагонали к ветви стержня β и числе стенок соединительной решетки n :

$$D_1 = \frac{Q}{n \cdot \sin \beta} = \frac{\pi \cdot e \cdot N}{n \cdot l \cdot \sin \beta}. \quad (2)$$

Стрелу прогиба сжато-изогнутого составного стержня, при наличии в стержне начального прогиба (или эксцентриситета), можно вычислить по формуле ⁽⁸⁾:

$$e = e_n \cdot \left(1 + \frac{A}{1 + \frac{\Sigma I_1}{I} A} \right), \quad (3)$$

где

$$A = \frac{\pi^2 I}{n \cdot l^2 \sin^2 \beta \cdot \cos \beta} \left[\frac{1}{F_d} + \frac{\alpha \cdot a^2}{8 \cdot (1 - \alpha)^2 \cdot I_d} \right]; \quad (4)$$

$\alpha = \frac{D}{D_3}$ — отношение усилия в диагонали к эйлеровой силе $D_3 = \frac{\pi^2 E I_d}{l_d^2}$.

В формуле (4) первый член в квадратных скобках выражает влияние деформации от продольного сжатия диагонали соединительной решетки, второй член — деформацию изгиба диагонали вследствие внецентренности передачи нагрузки. Сжимающее усилие в диагонали соединительной решетки под действием продольных сил ⁽²⁾

$$D_2 = \frac{F_d \cdot \cos^2 \beta}{F \left(1 + \frac{F_d}{F_p} \sin^2 \beta \right)} \cdot N. \quad (5)$$

Полное усилие в диагонали соединительной решетки составного стержня находим на основании (2) и (5):

$$D = D_1 + D_2 = \left[\frac{\pi \cdot e}{n \cdot l \cdot \sin \beta} + \frac{F_d \cdot \cos^2 \beta}{F \left(1 + \frac{F_d}{F_p} \sin^2 \beta \right)} \right] N. \quad (6)$$

Критическая величина продольной сжимающей силы определяется из (6) при условии $D = D_{кр}$:

$$N_{кр} = \frac{\pi \cdot e}{n \cdot l \cdot \sin \beta} + \frac{D_{кр} \cdot F_d \cdot \cos^2 \beta}{F \left(1 + \frac{F_d}{F_p} \cdot \sin^3 \beta \right)} \quad (7)$$

Таблица 2

Наименование элемента	Критическая сила в тоннах			$\frac{N_1^{**}}{N_{\phi}}$	$\frac{N_2}{N_{\phi}}$
	N_{ϕ} фактическая	N_1^{*} по формуле (1)	N_2 по формуле (7)		
Деформировавшийся раскос стальной фермы пролетом 87,6 м	270	$\frac{535}{605}$	280 $(D_{кр} = \varphi_{вн} \cdot F_d \cdot \sigma_T = 0,34 \times 5,09 \times 2,4 = 4,1 м < \frac{\pi d_1^3}{4} \times 0,9 \sigma_{в})$	1,95	1,04
Деформировавшиеся раскосы моста через р. Припять у Мозыря	220	$\frac{620}{570}$	193 $(D_{кр} = 2,94 м)$	2,60	0,88
Стальные модели деформировавшихся раскосов моста через р. Припять	22,5	$\frac{34}{33}$	21 $(D_{кр} = 0,16, м)$	1,45	0,93

В таблице 2 теоретические величины критической силы сопоставлены с опытными данными. Нетрудно заметить, что расчет по формуле (1) дает сильно преувеличенный результат. Точность совпадения опытных данных с формулой (7) можно признать удовлетворительной. Исследование показывает, что диагонали соединительной решетки составного стержня следует рассчитывать на суммарное действие поперечной силы, а также сжимающей силы, возникающей в диагоналях решетки от деформации ветвей стержня. При подборе сечения элементов соединительной решетки необходимо учитывать внецентренность передачи усилия от ветвей составного стержня к элементам решетки. При обследовании эксплуатируемых сооружений необходимо учитывать даже малые искривления сжатых составных элементов, так как они могут существенно понизить несущую способность конструкции.

Институт строительных материалов и сооружений
Академии наук Армянской ССР

* В числителе—критическая сила при изгибе элемента в плоскости решетки, в знаменателе—то же при изгибе в плоскости, перпендикулярной к плоскости решетки.

** Отношение минимальной величины N_1 к величине N_{ϕ} .

**Թերաններից բաղկացած, միացնող վանդակ ունեցող, սեղմված
բաղադրյալ պողպատե ձողերի հաշվումը**

Կառուցումների շահագործման փորձի տվյալների անալիզը ցույց է տվել, որ հան-
րահայտ (1) բանաձևով հաշված կրիտիկական ուժը թույլ միացնող վանդակ ունեցող
բաղադրյալ սեղմված ձողերի համար տալիս է մեծացրած արժեք:

Հետազոտությունները ցույց են տալիս, որ բաղադրյալ ձողերով միացված վանդակի
անկյունագծերը պետք է հաշվել ընդլայնական ուժի և առանցքային ճյուղերի կերպարա-
նափոխումից վանդակի անկյունագծերում առաջացած սեղմող ուժի միագումար ներգոր-
ծության տակ:

Հեղինակի կողմից առաջարկվում է, տվյալ դեպքում, կրիտիկական ուժը որոշել (7)
բանաձևով:

Л И Т Е Р А Т У Р А — Գ Ր Ա Կ Ա Ն Ո Ւ Թ Յ Ո Ւ Ն

¹ Ф. Блейх, Стальные сооружения, М. 1938. ² Н. С. Стрелецкий, Курс мостов, ч. II, в. 1, М., 1930. ³ И. М. Рабинович, Курс строительной механики стержневых систем, ч. II, М., 1940. ⁴ К. С. Завриев, Расчетные формулы прочности в особых случаях, М., 1935. ⁵ Н. Б. Лялин, В. В. Пинаджян, Деформация фермы моста, „Строительство железных дорог и путевое хозяйство“, № 9—10, 1941. ⁶ В. П. Ни-
колаев, Мозырская деформация, „Строительная промышленность“, № 9, 1925.
⁷ А. Д. Голов, Деформация раскосов ферм Мозырского моста, 1925. ⁸ В. В. Пина-
джян, Устойчивость составных деревянных стержней, Тбилиси, 1937.