УДК 624.07

© Д. В. Уразгильдеев, аспирант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: akin_ura@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-1-94-99

© D. V. Urazgildeev, post-graduate student
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: akin_ura@mail.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗГИБНО-КРУТИЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ И УСТОЙЧИВОСТИ КРИВОЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СТАЛЬНЫХ АРОК ДВУТАВРОВОГО СЕЧЕНИЯ

EXPERIMENTAL STUDY OF FLEXURAL-TORSIONAL DEFORMATIONS AND STABILITY OF CURVED ELEMENTS OF STEEL ARCHES WITH L-SHAPED CROSS-SECTION

Изложены методика и результаты экспериментальных исследований изгибно-крутильных перемещений, а также устойчивости криволинейных элементов стальных арок двутаврового сечения. Представлены графики зависимостей изгибно-крутильных перемещений от нагрузки при трех различных схемах загрузки, полученных в ходе эксперимента. Определены предельные нагрузки на стержневые элементы арок. Проведено сопоставление результатов эксперимента с теоретическим исследованием.

Ключевые слова: экспериментальное исследование, тонкостенные стержни с криволинейной осью, изгибно-крутильные деформации, устойчивость по изгибно-крутильной форме.

The method and results of experimental studies of flexural and torsional displacements, as well as the stability of curved elements of steel arches with I-shaped cross-section are presented. The author presents graphs of the dependence of flexural-torsional movements on the load for three different loading schemes obtained during the experiment. The limit loads on the core elements of the arches were obtained. The results of the experiment were compared with the theoretical study.

Keywords: experimental study, thin-walled rods with a curved axis, flexural-torsional deformations, stability in the flexural-torsional form.

Деформирование стержней с криволинейной осью по сравнению с прямолинейными стержнями имеет ряд особенностей. Изгиб таких стержней из плоскости начальной кривизны оси всегда сопровождается кручением. При этом направление действующих изгибающих моментов в плоскости кривизны весьма существенно влияет на величину и форму изгибно-крутильных деформаций. Поэтому особый интерес представляет экспериментальное исследование изгибно-крутильных деформаций и устойчивости стержневых элементов стальных арок. Известные в этой области экспериментальные работы [1–6] относятся к ряду частных случаев, когда элементы арок загружают либо равномерно распределенной, либо сосредоточенной нагрузками.

Целью данного эксперимента является исследование особенностей изгибно-крутильного

деформирования и устойчивости стержневых элементов сплошностенчатых арок двутаврового сечения, нагруженных силой с равными концевыми двухосными эксцентриситетами, действующей по линии хорды.

Эксперимент проводился в механической лаборатории СПбГАСУ. Для испытаний криволинейных стальных стержней на сжатие с двухосным эксцентриситетом была выбрана универсальная испытательная машина Instron 5982 с максимальной возможной нагрузкой 100 кН.

В качестве образцов для испытания были изготовлены сварные двутавры криволинейного очертания из стали С245 по ГОСТ 27772–88. Все образцы были подвержены термическому отпуску для снижения сварочных напряжений. Всего было изготовлено три образца гибкостью 100. Внешний вид и геометрические размеры испы-

тательного образца показаны на рис. 1. Нагрузка на стержни передавалась при помощи специального приспособления, представляющего собой ножевой шарнир, в котором концевые сечения могли свободно поворачиваться в двух главных плоскостях, но не могли закручиваться. Данная опорная конструкция наилучшим образом соответствовала граничным условиям, принятым в теоретическом исследовании [7, 8].

Всего было проведено 12 испытаний, 9 из них заключались в исследовании деформирования стержневых элементов арок при упругой работе материала при трех различных схемах загрузки (рис. 2). Во всех трех загрузках учитывался случайный эксцентриситет из плоскости начальной кривизны $e_x = 3$ мм. Еще три испытания были посвящены исследованию устойчивости криволинейных элементов за пределом упругости по схеме загрузки, показанной на рис. 2, а.

В качестве измерительных приборов использовались: прогибомеры для определения перемещений и угла закручивания среднего и опорных сечений; тензорезисторы для определения продольных деформаций крайних волокон двутавра в среднем и опорных сечениях (рис. 3).

Рис. 1. Геометрические размеры стержня

Рис. 2. Схемы загрузки стержней при эксцентриситетах: а — $e_y = +60$ мм, $e_x = 3$ мм; б — $e_y = -60$ мм, $e_x = 3$ мм; в — $e_y = 0$, $e_x = 3$ мм

Процесс испытания первого этапа эксперимента при упругой работе материала можно описать следующим образом: ступенчатое нагружение образцов до момента возникновения в среднем сечении напряжений, соответствующих пределу пропорциональности по показаниям тензостанции. Фиксация показаний прогибомеров на каждом шаге нагружения. Второй этап эксперимента, связанный с определением предельной нагрузки на стержневой элемент арки, состоял из следующих шагов: поэтапное нагружение стержня и снятие показаний всех прогибомеров; после наступления упругопластической стадии работы материала — уменьшение шага нагрузки, снятие показаний приборов после стабилизации перемещений; регистрация предельной нагрузки. Потеря устойчивости фиксировалась в момент значительного увеличения перемещений при небольшом повышении нагрузки.

На рис. 4–6 представлены зависимости изгибно-крутильных перемещений u и θ среднего сечения стержня от нагрузки при упругой работе материала для трех схем загрузки. Сплошные линии соответствуют результатам эксперимента, а пунктирные построены по результатам теоретического исследования [7]. На полученных гра-

Рис. 3. Общий вид испытательной установки со смонтированным в проектное положение образцом

Рис. 4. Графики зависимости бокового смещения u и угла закручивания θ от нагрузки для схемы нагружения 2а: а — для образца № 1; б — для образца № 2; в — для образца № 3

фиках видно, что значения изгибно-крутильных деформаций экспериментальных образцов весьма близки к теоретическим, расхождение составило не более 12 %.

Вторая часть эксперимента заключалась в определении предельной нагрузки на стержень по схеме на рис. 2, а. На рис. 7 представлены зависимости бокового смещения u и угла закручивания θ от уровня нагружения за пределом упругой работы материала.

Значения предельных нагрузок, полученных теоретическим и экспериментальным исследованиями, сведены в таблицу. Как видно из нее, рас-

хождение по предельным силам между теорией и экспериментом не превышает 7 %.

По результатам эксперимента можно сделать следующие выводы. Характер деформирования экспериментальных образцов по форме весьма близок к значениям по теоретическим исследованиям. Расхождение результатов эксперимента и теории по значениям изгибно-крутильных деформаций не превышает 12 %. Результаты по предельным силам также являются удовлетворительными: разница эксперимента и теории составила не более 7 %.

Рис. 5. Графики зависимости бокового смещения u и угла закручивания θ от нагрузки для схемы нагружения (рис. 2, б): а — для образца № 1; б — для образца № 2; в — для образца № 3

Рис. 6. Графики зависимости бокового смещения u и угла закручивания θ от нагрузки для схемы нагружения (рис. 2, в): а — для образца № 1; б — для образца № 2; в — для образца № 3

Рис. 7. Графики зависимости бокового смещения u и угла закручивания θ от нагрузки для схемы нагружения (рис. 2, а) за пределом упругости

Значения предельных нагрузок, полученных теоретическим и экспериментальным исследованиями по схеме нагружения (см. рис. 2, а)

Экспериментальный образец	$F_{\text{эксп}}, \text{кН}$	$F_{\text{теор}}, \text{кН}$	Разница по $F, \%$
№ 1	78,83	82,3	4,2
№ 2	76,5		7,1
№ 3	79,09		3,9

Библиографический список

1. Белый Г. И. Некоторые вопросы деформационного расчета и устойчивости тонкостенных стержней с плоской криволинейной осью: дис. ... канд. техн. наук. Л., 1973. 130 с.
2. Динник А. Н. Устойчивость арок. М.: Гостехтеориздат, 1946. 128 с.
3. Stüssi F. Lateral buckling and vibration of arches. Zurich: IABSE Publications, 1944. Vol. 7. Pp. 327–343.
4. Klöppel K., Protte W. Ein Beitrag zum Kipp-Problem des kreisförmige gekrümmte Stabes // Stahlbau. 1961. Vol. 30 (1). Pp. 1–15.
5. Papangelis J. P., Trahair N. S. Flexural-torsional buckling tests on arches // J Struct Eng ASCE. 1987. Vol. 113 (7). Pp. 1433–1443.
6. La Poutre D. B. Stability experiments on circular steel arches: research report No O-2004.3. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2004. 165 p.
7. Белый Г. И., Уразгильдеев Д. В. К расчету на устойчивость криволинейных стержневых элементов сплошностенчатых стальных арок по изгибно-крутильной форме // Вестник гражданских инженеров. 2018. № 2 (67). С. 54–59.
8. Уразгильдеев Д. В. Устойчивость по изгибно-крутильной форме стержневых криволинейных эле-

ментов стальных арок за пределом упругости // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 6 (77). С. 123–129.

References

1. Belyy G. I. *Nekotorye voprosy deformatsionnogo rascheta i ustoychivosti tonkostennykh sterzhney s ploskoy krivolineynoy os'yu*. Diss. kand. tekhn. nauk [Some issues of deformation calculation and stability of thin-walled rods with a flat curved axis. PhD in Sci. Tech. diss.]. Leningrad, 1973, 130 p.
2. Dinnik A. N. *Ustoychivost' arok* [Stability of arches]. Moscow, Gostekhteorizdat Publ., 1946, 128 p.
3. Stüssi F. *Lateral buckling and vibration of arches*. Zurich, IABSE Publ., 1944, vol. 7, pp. 327–343.
4. Klöppel K., Protte W. Ein Beitrag zum Kipp-Problem des kreisförmige gekrümmte Stabes. *Stahlbau*, 1961, vol. 30 (1), pp. 1–15.
5. Papangelis J. P., Trahair N. S. Flexural-torsional buckling tests on arches. *J Struct Eng ASCE*, 1987, vol. 113 (7), pp. 1433–1443.
6. La Poutre D. B. *Stability experiments on circular steel arches*. Research report No O-2004.3. Eindhoven, Technische Universiteit Eindhoven Publ., 2004, 165 p.
7. Belyy G. I., Urazgil'deev D. V. *K raschetu na ustoychivost' krivolineynykh sterzhnevyykh elementov sploshnostenchatykh stal'nykh arok po izgibno-krutit'noy forme* [About stability calculation of curved bar elements of steel arches of continuous section by the flexure-torsion form]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2018, no. 2 (67), pp. 54–59.
8. Urazgil'deev D. V. *Ustoychivost' po izgibno-krutit'noy forme sterzhnevyykh krivolineynykh elementov stal'nykh arok za predelom uprugosti* [Bending-torsion stability of rod curvilinear elements of steel arches beyond the elasticity limit]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2019, no. 6 (77), pp. 123–129.