УДК 528.088 + 624.6.072.327.2

В.А.КОУГИЯ, *д-р техн. наук, профессор, mailto:kou@VK3672.spb.edu*
О.П.СЕРГЕЕВ, *канд. техн. наук, доцент, kig@pgups.edu*
Петербургский государственный университет путей сообщения

V.A.KOUGIYA, *Dr. in eng. sc., professor, mailto: kou@VK3672.spb.edu*
O.P.SERGEEV, *PhD in eng. sc., associate professor, kig@pgups.edu*
Petersburg State Transport University

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ СБОРКИ НА ОТКЛОНЕНИЯ ОТ ПРОЕКТНЫХ РАЗМЕРОВ АРКИ

Арочные мосты с подвесками из вант построены через р.Охта в Санкт-Петербурге и через р.Ишим в Астане (Республика Казахстан). Каждая полуарка собиралась из отдельных блоков от опорного блока на затяжке арки. Приведены формулы для расчета точности стыковки полуарок в зависимости от точности изготовления и размеров ее элементов, от формы и размеров арочного пролетного строения. Даны примеры расчета для строительства арочного моста через р.Ишим в Астане.

Ключевые слова: погрешности, арочный мост, монтаж полуарок.

ANALYSIS OF THE EFFECT OF ASSEMBLY ERRORS ON DEVIATIONS FROM DESIGN ARCH SIZES

Arched bridges with suspension brackets of cables are built over the river Ohta in Saint Petersburg and the river Ishim in Astana (Kazakhstan). Each semi-arch was carried out of separate units from supporting block of the arch tightening. There are given the formulas for calculating the precision of semi-arch jointing depending on the fabrication accuracy and dimensions of its elements, on the shape and size of the arch span. Calculation examples are given for the arch bridge construction over the river Ishim in Astana.

Key words: accuracy, arch bridge, building-up of semi arch.

Строительство арочных мостов с подвесками из вант через р.Охта в Санкт-Петербурге и через р.Ишим в Астане (Казахстан) велось методом монтажа полуарок, т.е. каждая полуарка собиралась последовательно из отдельных блоков от опорного блока на затяжке арки. Наиболее ответственным этапом строительства этих мостов являлась стыковка полуарок. На точность стыковки полуарок влияют погрешности изготовления элементов арки и погрешности ориентирования полуарок в ходе их монтажа, которые зависят от зазоров в стыках элементов арки. Точности стыковки полуарок на примере моста через р.Ишим в Астане посвящена данная статья.

Элементы арки соединяются с помощью накладок и болтов, проходящих через высверленные в элементах и накладках отверстия. Полуарка состоит из семи элементов. Две полуарки встречаются в верхней точке 7 (см. рисунок). Рассмотрим возможные отклонения в верхней точке полуарки от ее проектного положения, вызванные погрешностями изготовления элементов и накладок и их сборки.

В результате неточного положения высверленных под болты отверстий и люфтов возникают погрешности в расстояниях между группой отверстий на концах элементов и накладок и в углах их поворота. Кроме того, неизбежны погрешности установки

опорного элемента полуарки в плане, по высоте и в наклоне.

Направим ось абсцисс x параллельно оси моста, а ось y – отвесно вверх. Рассмотрим осевую линию элементов полуарки. Координаты верхней точки этой линии

$$x_7 = x_0 + l_1\cos\nu_1 + l_2\cos\nu_2 + l_3\cos\nu_3 + l_4\cos\nu_4 + \\ + l_5\cos\nu_5 + l_6\cos\nu_6 + l_7\cos\nu_7, \quad (1)$$

$$y_7 = y_0 + l_1\sin\nu_1 + l_2\sin\nu_2 + l_3\sin\nu_3 + l_4\sin\nu_4 + \\ + l_5\sin\nu_5 + l_6\sin\nu_6 + l_7\sin\nu_7, \quad (2)$$

где x_0, y_0 – координаты точки 0, фиксирующей начало линии; l_i – длина отрезка, равная длине i-го элемента с зазором; ν_i – средний угол наклона i-го элемента (i = 1, 2, …, 7).

В аргументах x_0, y_0, l_i, ν_i формул (1) и (2) содержатся погрешности, вызывающие отклонения координат конца полуарки от проектных значений. Продифференцируем формулы по перечисленным переменным:

$$dx_7 = dx_0 + \sum_{i=1}^{7}\cos\nu_i dl_i - \sum_{i=1}^{7} l_i \sin\nu_i d\nu_i ;$$

$$dy_7 = dy_0 + \sum_{i=1}^{7}\sin\nu_i dl_i + \sum_{i=1}^{7} l_i \cos\nu_i d\nu_i .$$

Будем считать дифференциалы погрешностями соответствующих параметров. Обозначим δ_i долю погрешности в направлении i-го элемента арки, возникающую в месте его крепления. Тогда можем записать

$$d\nu_1 = \delta_1;\ d\nu_2 = \delta_1 + \delta_2;\ d\nu_3 = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3;\ \ldots;$$

$$d\nu_7 = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4 + \delta_5 + \delta_6 + \delta_7.$$

Переходя к средним квадратическим погрешностям, напишем

$$m x_7^2 = m x_0^2 + \sum_{i=1}^{7}(\cos\nu_i)^2 m l_i^2 + \sum_{i=1}^{7}(l_i\sin\nu_i)^2 m\nu_i^2 ;$$

$$m y_7^2 = m y_0^2 + \sum_{i=1}^{7}(\sin\nu_i)^2 m l_i^2 + \sum_{i=1}^{7}(l_i\cos\nu_i)^2 m\nu_i^2 ,$$

где $m\nu_1^2 = m\delta_1^2$; $m\nu_2^2 = m\delta_1^2 + m\delta_2^2$; $m\nu_3^2 = m\delta_1^2 + m\delta_2^2 + m\delta_3^2$; …; $m\nu_7^2 = m\delta_1^2 + m\delta_2^2 + m\delta_3^2 + m\delta_4^2 + m\delta_5^2 + m\delta_6^2 + m\delta_7^2$; mx_0, my_0 – средние квадратические отклонения места крепления первого элемента; ml – средняя квадратическая погрешность длины элемента

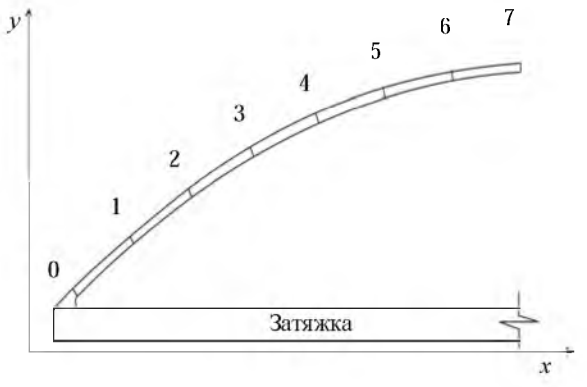


Схема плоской модели полуарки

арки; $m\nu_i$, $m\delta_i$ – средние квадратические погрешности в углах наклона и в углах связи между элементами.

Полагая равными средние квадратические погрешности в углах связи между элементами и обозначив их $m\delta$, напишем

$$m\nu_1^2 = m\delta_1^2;\ m\nu_2^2 = m\delta_1^2 + m\delta^2;$$

$$m\nu_3^2 = m\delta_1^2 + 2m\delta^2;\ \ldots;\ m\nu_7^2 = m\delta_1^2 + 6m\delta^2.$$

Или в общем виде

$$m\nu_i^2 = m\delta_1^2 + (i-1)m\delta^2.$$

Получим формулы средних квадратических погрешностей координат точки в верхнем конце полуарки, характеризующие возможные отклонения ее от проектного положения:

$$m x_7^2 = m x_0^2 + \left[\sum_{i=1}^{7}(\cos\nu_i)^2\right] ml^2 + \\ + \sum_{i=1}^{7}\left[(l_i\sin\nu_i)^2\left(m\delta_1^2 + (i-1)m\delta^2\right)\right]; \quad (3)$$

$$m y_7^2 = m y_0^2 + \left[\sum_{i=1}^{7}(\sin\nu_i)^2\right] ml^2 + \\ + \sum_{i=1}^{7}\left[(l_i\cos\nu_i)^2\left(m\delta_1^2 + (i-1)m\delta^2\right)\right]. \quad (4)$$

Полагаем, что учитываемые погрешности распределены по нормальному закону, тогда величины mx_7, my_7 указывают доверительные интервалы $\pm mx_7$, $\pm my_7$, вероятность попадания в которые равна примерно 67 %. Предельные значения отклонений конца полуарки от проектного положения с доверительной вероятностью 99,7 % равны сред-

ним квадратическим погрешностям, умноженным на 3: $\Delta x_7 = 3mx_7$, $\Delta y_7 = 3my_7$.

Численную оценку возможных отклонений исследуемой конструкции от проекта выполним на математической модели полуарки (табл.1). При этом сделаем допущение, что параболическая арка имеет форму окружности. Принципиально такое допущение на точности расчетов не скажется.

Таблица 1

Средние наклоны и длины элементов арки

Номер i	Наклон $\nu°$	Длина l, мм
1	38,2	11710
2	32,4	11000
3	26,5	11000
4	20,6	11000
5	14,7	11000
6	8,8	11000
7	2,9	11000

Проведем хорду от начала первого блока (точка 0 на рисунке) до конца седьмого блока (точка 7); угол ее наклона $\nu_0 = 20{,}6°$. Наклон конца 7-го элемента равен нулю. Наклон середины 4-го элемента равен наклону хорды $\nu_4 = \nu_0 = 20{,}6°$. Поворот дуги на длине одного элемента $\Delta\nu = (\nu_4 - 0)/3{,}5 = 5{,}9°$. Наклон середины первого элемента $\nu_1 = \nu_0 + 3\Delta\nu = 38{,}2°$.

Рассчитаем погрешности сборки полуарки. Оценки погрешностей сборки будем характеризовать смещениями верхнего конца полуарки по направлению осей x и y. Вычисления выполним по формулам (3) и (4).

В первом приближении $m\delta_1$ и $m\delta$ вычисляются как отношения точности крайних отверстий под болты к расстоянию между ними. Например, при точности положения отверстий 0,01 мм и расстоянии между болтами 1000 мм имеем $m\delta = 10^{-5}$ радиан.

Пример расчета. При исходных данных: $mx_0 = 6$ мм, $my_0 = 3$ мм, $m\delta_1 = 1$ мм/1000 мм, – получим средние квадратические погрешности координат конца полуарки mx_7, my_7 и ее отклонения Δx, Δy, приведенные в табл.2.

Таблица 2

Погрешности сборки, мм

Исходные данные	mx_7	my_7	Δx	Δy
$m_l = 0{,}1$ мм, $m\delta = 0{,}1$ мм/1000 мм	6	3	18	90
$m_l = 0{,}3$ мм, $m\delta = 0{,}3$ мм/1000 мм	6	33	18	100
$m_l = 1$ мм, $m\delta = 1$ мм/1000 мм	7	58	20	175

При $\Delta l = 3ml = 1$ мм предельные отклонения конца полуарки от проектного положения составят: по направлению оси пролета $\Delta x = 20$ мм, по высоте $\Delta H = 100$ мм. Отсюда можно принять $m_l = 0{,}3$ мм, $\Delta l = 1$ мм с учетом возможности рихтовок при стыковке блоков арки.

Предложенная методика позволяет рассчитать точность стыковки полуарок или допуски на отклонения ее элементов от проектного положения.