

ДИНАМИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ БАЛКОНА ЗРИТЕЛЬНОГО ЗАЛА

Бондарович Л.А.

*Старший научный сотрудник кафедры «Испытания сооружений» МГСУ,
профессор, кандидат технических наук*

Сафина Л.Х.

*Доцент кафедры «Испытания сооружений» МГСУ,
кандидат технических наук*

Шувалов А.Н.

*Профессор кафедры «Испытания сооружений» МГСУ,
кандидат технических наук*

Конструкции балконов зрительных залов при активном поведении зрителей (посадка, подъем, топание ногами, подпрыгивание и т.п.) подвергаются динамическому и циклическому воздействиям, результатом которых в расчетных сечениях могут иметь место высокие значения напряжений и усталостные повреждения. Кроме того, гипотетически возможно возникновение резонанса элементов балкона, что также может привести к увеличению в них внутренних усилий по сравнению со статическими.

Соответствие параметров напряженно-деформированного состояния конструкций балкона при статическом и динамическом нагружениях, а также оценку их усталостной прочности от динамического воздействия зрителей проводили для балкона шириной 7,8 м, площадью 300 м², рассчитанного на 330 посадочных мест (рис.1).

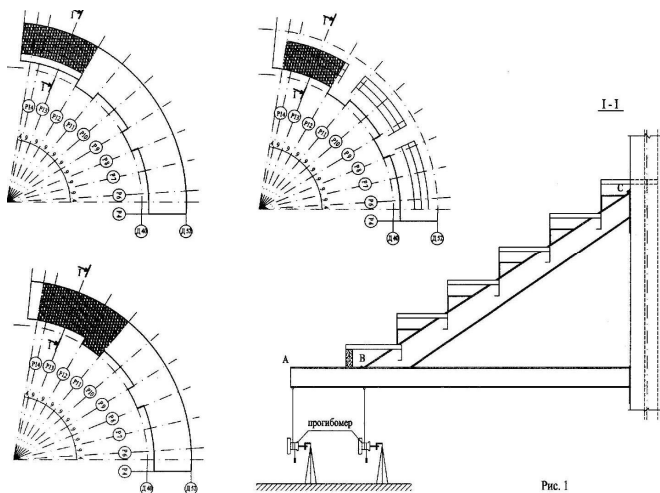


Рис. 1

Рис. 1

Несущие конструкции балкона – стальные стропильные системы (сталь класса С245) из главных двутавровых балок I 40, установленных с шагом 4 м, и второстепенных балок I 30, I 20. Узел крепления верхнего пояса стропильной системы к колонне – жесткий, нижнего пояса к колонне и верхнего пояса с нижним – шарнирные.

Испытание балкона проводили в режиме статического и динамического силового воздействия по трем схемам нагружения и двум уровням статической временной нагрузки.

Первая схема (I): заполнение трибуны одного сектора (на рис. 1 заштрихован) временной распределенной нагрузкой:

$$q^1_{\text{вр}} = 50 \text{ кГс/м}^2, q^2_{\text{вр}} = 100 \text{ кГс/м}^2.$$

Вторая схема (II): заполнение консольной части сектора и нижней половины трибуны одного сектора. Уровни нагрузки:

$$q^1_{\text{вр}} = 50 \text{ кГс/м}^2, q^2_{\text{вр}} = 100 \text{ кГс/м}^2.$$

Третья схема (III): заполнение консоли, трибуны и прохода. Уровни нагрузки:

$$q^1_{\text{вр}} = 50 \text{ кГс/м}^2, q^2_{\text{вр}} = 100 \text{ кГс/м}^2.$$

Для создания динамического воздействия зрители осуществляли резкий подъем и посадку в кресла, топание ногами и прыжки на месте. Определение перемещений (прогибов) стропильной системы балкона при статическом нагружении осуществляли механическими прогибомерами с ценой деления 0,01 мм в точках «А» и «В». Относительные деформации измеряли с помощью рычажных тензометров с базой 20 мм и ценой деления 50 е.о.д. в точках «В» и «С» – в сечениях, где по результатам численных расчетов с использованием программного комплекса «ЛИРА» имеют место наибольшие нормальные напряжения. Переход от измеренных деформаций к напряжениям осуществляли по закону Гука.

Определение динамических перемещений (амплитуд колебаний) выполняли с помощью индукционного электродинамического преобразователя СМ-3. Использование этого преобразователя в комплекте с магнитоэлектрическим самописцем Н-338 позволяет измерять амплитуды колебаний величиной от 1×10^{-6} до 3000×10^{-6} м в диапазоне частот от 0,4 до 100 Гц с записью процессов на бумажной ленте. Предварительно проводили индивидуальную динамическую градуировку преобразователя в комплекте с самописцем при гармонических колебаниях на специальном вибростенде УРС-20/6000.

Индукционный преобразователь СМ-3 устанавливали непосредственно на металлическую балку стропильной системы (нижний пояс) в точке «В». Такое место установки преобразователя позволило сравнить значения параметров напряженно-деформированного состояния конст-

рукций стропильной системы, нагруженной как статическим, так и динамическим силовым воздействием, и определить для нее динамический коэффициент, равный отношению максимальных перемещений от временной испытательной нагрузки при динамическом воздействии к перемещениям от временной статической нагрузки:

$$K_{\text{дин}} = Y_{\text{д}}^{\text{вр}} / Y_{\text{стат}}^{\text{вр}}.$$

Основные результаты статических испытаний приведены в табл.1. Из представленных результатов следует, что при третьем варианте статического нагружения балкона стропильные системы находятся в наиболее напряженном состоянии, при этом наибольшие перемещения от нагрузки имеют место в точке «А» и составляют $Y_{\text{А}}^{\text{III}} = 0,52$ мм при уровне временной распределенной нагрузки $q_{\text{вр}}^2 = 100$ кГс/м².

При испытании балкона по третьему варианту нагружения значения измеренных напряжений от временной нагрузки $q_{\text{вр}}^2 = 100$ кГс/м² в точках «В» и «С» близки по значениям и достигают величины $\sigma = 15,75$ МПа.

Результаты динамических испытаний балкона представлены на рис.2 и в табл.1 и 2.

Анализ полученных данных показывает, что при всех схемах и уровнях динамического нагружения балкона частота собственных колебаний стропильной системы находится в диапазоне 12,5-16,6 Гц, поэтому «раскачать» его до возникновения состояния резонанса практически невозможно. Амплитуда максимальных динамических перемещений в точке «В» при уровне $q_{\text{вр}}^2 = 100$ кГс/м² находится в пределах $A_{\text{дин}}^{\text{max}} = 0,35 \dots 0,54$ мм. Как видно из результатов, приведенных в табл.1 и 2, отношения динамических перемещений к статическим для одной и той же точки исследования при всех вариантах нагружения балкона, близки $K_{\text{дин}} = 1,92 \dots 2,20$. Предполагая, что динамический коэффициент для стропильной системы имеет то же значение, можно определить величину максимальных динамических напряжений $\sigma_{\text{дин}}^{\text{max}}$ в наиболее нагруженном сечении (по данным численного расчета – сечение «С»):

$$\sigma_{\text{дин}}^{\text{max}} = \sigma_{\text{п}}^{\text{стат}} + K_{\text{дин}} \times \sigma_{\text{вр}}^{\text{стат}},$$

где $\sigma_{\text{п}}^{\text{стат}}$ – нормальные напряжения от постоянной нагрузки $q_{\text{пост}} = 300$ кГс/м²;

$\sigma_{\text{вр}}^{\text{стат}}$ – нормальные напряжения от временной нагрузки $q_{\text{вр}} = 100$ кГс/м².

Результаты определения нормальных напряжений при динамическом нагружении приведены в табл.2, где также приводятся значения максимальной амплитуды колебаний и минимальной величины динамических напряжений в точке «С», необходимых для оценки усталостной

прочности стропильной системы балкона при динамическом воздействии. В табл.2 также представлен коэффициент асимметрии цикла, равный $\rho = \sigma_{\min}^{\text{дин}} / \sigma_{\max}^{\text{дин}} = 0,538$. Данные табл.2 позволяют выполнить оценку усталостной прочности металлических конструкций балкона по СНиП II-23-81* «Стальные конструкции».



Рис.2. Виброграмма вертикальных перемещений стропильной системы в точке «В»

(вариант загрузки I, $q_{\text{вр}}^2 = 100 \text{ кг/м}^2$, скорость лентопротяжки 50 мм/с, $A_{\text{max}}^{\text{дин}} = 0,35\text{мм}$, $f_0 = 13,5 \text{ Гц}$)

Таблица 1

Перемещения конструкций балкона при статическом и динамическом воздействиях

Схема загрузки	Уровни временной нагрузки, $Q_{\text{вр}}$, кг/м ²	Перемещения в точке «В» от статической нагрузки $Y_{\text{стат}}$, мм	Перемещения в точке «А» от статической нагрузки $Y_{\text{стат}}$, мм	Напряжения от статической временной нагрузки в точке «В» σ , МПа	Напряжения от статической временной нагрузки в точке «С» σ , МПа	Амплитуды перемещений от динамической нагрузки $Q_{\text{вр}}$ в точке «В» $A_{\text{max}}^{\text{дин}}$, мм	Частота собственных колебаний f_0 , Гц	Динамический коэффициент $K_{\text{дин}} = (Y_{\text{стат}} + A_{\text{max}}^{\text{дин}}) / (Y_{\text{стат}}^{\text{вр}})$
Первая схема (I)	50	0,17	0,31	5,25	5,25	0,17	14,0	2,00
	100	0,34	0,67	10,5	10,5	0,35	13,5	2,03
Вторая схема (II)	50	0,18	-	-	-	0,17	16,6	1,94
	100	0,39	-	-	-	0,36	12,5	1,92
Третья схема (III)	50	0,23	0,27	10,5	10,5	0,26	15,5	2,13
	100	0,45	0,52	15,75	15,75	0,54	12,5	2,20

Таблица 2

Напряженное состояние в точке «С» балкона при динамическом воздействиях

Схема загрузки-ния	Напряжения от временной нагрузки $q_{вр} = 100 \text{ кГс/м}^2$ $\sigma_{вр}$, МПа Напряжения от постоянной нагрузки $q_{пост} = 300 \text{ кГс/м}^2$ $\sigma_{пост}$, МПа Напряжения от полной нагрузки $q_{п} = 400 \text{ кГс/м}^2$ $\sigma_{п}$, МПа Максимальные динамические напряжения $\sigma_{max} = \sigma_{стат} + K_{дин} \times \sigma_{вр}$, МПа Амплитуды напряжений $\sigma_A = \sigma_{дин}^{max} - \sigma_{дин}^{min}$, МПа Минимальные динамические напряжения $\sigma_{min} = \sigma_{стат} - \sigma_A$, МПа Коэффициент асимметрии $\rho = \sigma_{дин}^{min} / \sigma_{дин}^{max}$ Максимальные напряжения по СНиП II-23-81* $\sigma_{max} = \alpha \cdot R_y \cdot \gamma_v$, МПа	15,75 – экспериментальное 50,1 66,8 50,1+2,2×16,7=86,84 86,84-66,8=20,04 66,8-20,04=46,76 46,76/86,84=0,538 0,77×75×3,02=174,5 – для шестой группы, 0,77×45×3,02=104,7 – для четвертой группы	Третий вариант загрузки-ния (III) 16,7 – расчетное
--------------------	--	---	---

Результаты проверки усталостной прочности при наихудшем варианте загрузки балкона (третья схема загрузки III) при уровне временной нагрузки $q_{вр}=100 \text{ кГс/м}^2$ (нагрузка, соответствующая фактическому нагружению балкона) приведены в табл.2.

Условие усталостной прочности

$$\sigma_{max}^{дин} \leq \alpha \cdot R_y \cdot \gamma_v,$$

где $\sigma_{max}^{дин}$ – максимальные динамические напряжения в конструкции;
 α – коэффициент, учитывающий количество циклов нагружения, при $N > 3,9 \times 10^6$ циклов нагружения $\alpha=0,77$;

R_y – расчетное сопротивление усталости, принимаемое по СНиП II-23-81* $R_y=45\dots 75$ МПа для групп элементов 4 и 6;

γ_v – коэффициент, зависящий от асимметрии цикла нагружения ρ ,

$$\gamma_v = 2,0 / (1,2 - \rho).$$

Как видно из табл.2, усталостная прочность стропильной системы исследуемого балкона обеспечена. Анализ полученных результатов показывает, что при динамическом нагружении балкона зрительного зала, возникающем при активном поведении зрителей (прыжки, подъем, топание ногами и т.п.), конструкции балкона подвергаются циклическому силовому воздействию. При фактическом заполнении балкона, соответствующем числу посадочных мест ($q_{вп}=100$ кгс/м²), максимальные динамические напряжения достигают величины $\sigma_{\max}^{\text{дин}} = 87$ МПа при коэффициенте асимметрии цикла нагружения $\rho = 0,538$. Величина максимальных динамических напряжений в стропильной системе (узел сопряжения наклонной балки с колонной) меньше расчетных на выносливость, следовательно, металлические конструкции испытанного балкона могут быть использованы для дальнейшей эксплуатации.