

УДК 624.072.2:69

Е. В. ГОРОХОВ, В. Н. ВАСЫЛЕВ, А. Н. МИРОНОВ, А. С. ЩЕРБИНА

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ЭЛЛИПСНОЙ БАЛКИ

Аннотация. С целью обеспечения пожарной безопасности в 1838–1839 годах при реконструкции Зимнего дворца были использованы новые железные эллипсные балки составного сечения пролетом до 15 м. Эллипсная балка, разработанная инженером М. Е. Кларком, является прообразом современной двутавровой тонкостенной балки. Четырехслойная с листов 0,8 мм двухстенчатая эллипсная стенка и система центральных распорок обеспечивали ее устойчивость. При изготовлении балок использовались заклепочные, болтовые соединения и кузнечная технология обработки железных конструкций. В баках предусмотрен строительный подъем. Готовые балки перед установкой в проектное положение подвергались пробе (статическим испытаниям). В статье отражены результаты исследования напряженно-деформированного состояния эллипсной балки и тонкостенной двутавровой балки одинаковой геометрии с использованием современных программных комплексов. Расчет моделей производился в геометрически линейной постановке задачи при упругой работе материала.

Ключевые слова: Зимний дворец, реконструкция, эллипсная балка, строительный подъем, тонкостенная балка, кузнечная технология изготовления металлоконструкций, заклепка, болт, статические испытания, численные исследования.

255 лет назад (1754) в Санкт-Петербурге началось строительство Зимнего дворца – главного императорского дворца России. В вечернее время 17 декабря 1837 года в Зимнем дворце начался масштабный пожар, длившийся более тридцати часов. В результате пожара полностью выгорели второй и третий этажи. На реставрацию сгоревшего дворца ушло свыше двух лет.

Восстановление проходило во время правления Николая I, который считал первостепенной задачей обеспечение пожарной безопасности здания. Первым шагом на пути к этому был переход от деревянных стропильных конструкций к железным.

В 1838–1839 годах были смонтированы новые железные конструкции чердачных пространств [1]. Это были одни из первых железных конструкций, применяемых в России для покрытий и перекрытий. Использовалась эллипсная балка (рис. 1а) для уникальных по тем временам междуэтажным сводчатым перекрытиям пролетом 15 м, выполненных из специальных гончарных горшков из огнеупорной керамики. Эллипсная балка является прообразом современной двутавровой тонкостенной балки [2].

Конструкция эллипсной балки была разработана директором Александровского завода, инженером М. Е. Кларком. Для определения предельной нагрузки (P) на эллипсные балки использовалась формула Навье, которая учитывала: пролет балки (L), предел упругости материала балки при изгибе (R_y), момент инерции поперечного сечения относительно горизонтальной оси, проходящей через центр тяжести поперечного сечения (m), максимальное расстояние от центра тяжести сечения до наружной грани поясного уголка (z).

Эллипсные балки были изготовлены Казёнными мастерскими под руководством инженера И. К. Кроля. Производители металлоконструкций на момент изготовления конструкций для Зимнего дворца в своем арсенале имели листовой прокат, кузнечную технологию, болтовые и заклепочные соединения. Поэтому используемый в эллипсной балке уголок изготавливался путем гибки полосы, так как первые прокатные уголки в России были прокатаны в 50-е годы XIX века.

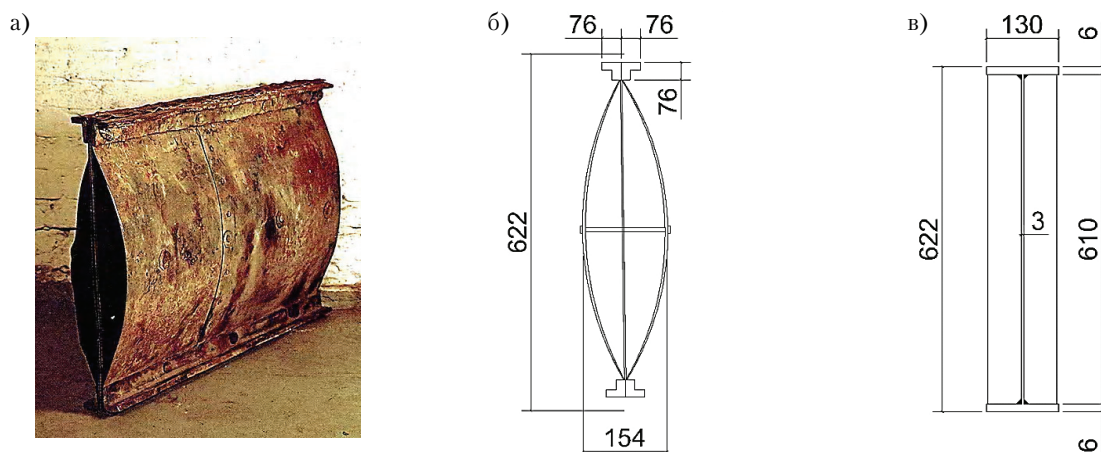


Рисунок 1 – Эллипсная балка: а) фрагмент эллипсной балки; б) поперечное сечение эллипсной балки; в) тонкостенная сварная двутавровая балка

Стенка балки состоит из четырех листов железа толщиной 0,8 мм, которая укрепляется с обеих сторон системой изогнутых листов, образующих форму эллипса.

Средние листы балки (700×1 400 мм) соединялись по длине между собой с помощью фальцев по шаблону для придания листам того выгиба, который должна иметь балка по длине, т. е. был предусмотрен строительный подъем $1/110L$. Боковые листы также выгибались в процессе их соединения холодными заклепками из мягкого болтового железа $n10$ мм. Форма эллипса предварительно придавалась листам на чугунной плите, на которой они и скреплялись. Соединенные фальцами листы вертикальной стенки соединяются между собой заклепками $n10$ мм по центру листов вдоль всей длине с шагом 450 мм.

По центру сечения стенки и в боковых листах пробивались отверстия, в которые устанавливались болты, на них надевались трубки, свернутые из листового железа. Распорные трубки придавали вертикальной стенке и боковым эллипсообразным листам необходимую неизменяемость и устойчивость. Сборка балки производилась в вертикальном положении. Предварительно собранная стенка и боковые листы соединялись между собой заклепками $n10$ мм с шагом 450 мм по верхнему и нижнему поясу с железными гнутыми уголками.

Готовые балки перед установкой в проектное положение подвергались пробе (статическим испытаниям). Опорная часть балки устанавливались между стойками, которые удерживали ее в процессе загрузки от потери устойчивости из плоскости. На балку надевались два или три хомута из полового железа, на которые укладывались доски с необходимым числом гирь, расположенных равномерно по всей длине досок (рис. 2).

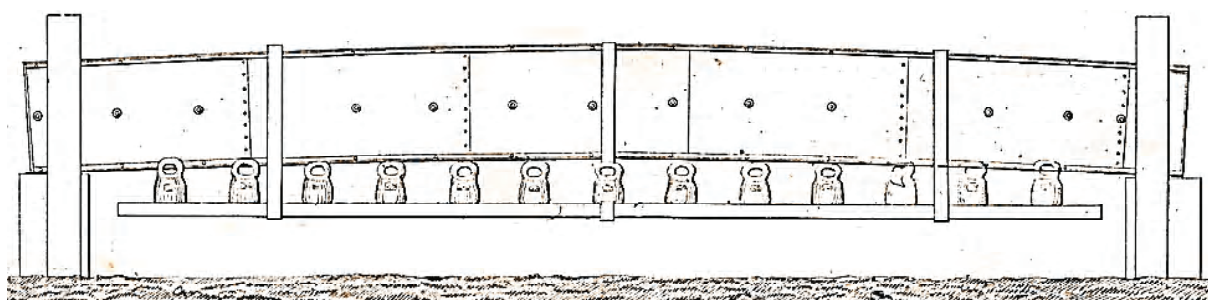


Рисунок 2 – Испытание эллиптических балок.

В процессе испытаний доски загружались равномерно распределенной нагрузкой – на каждую сажень (2 130 мм) по 50 пудов (800 кг), т. е. 375 кг/м. Под нагрузкой балка выдерживалась четверо суток.

Одной из задач, решаемых нами, являлось исследование напряженно-деформированного состояния эллиптической балки и тонкостенной двутавровой балки с геометрией эллиптической балки, предварительно рассчитанной и законструированной по рекомендациям [2], с использованием современных программных комплексов.

Для выполнения этих задач была создана аналитическая расчетная модель конструкции балки в ПК Лира на основе идеализации континуальной среды методом конечных элементов (МКЭ). При создании аналитической модели конструкции были учтены все необходимые факторы, чтобы модель была максимально близка к реальной конструкции исследуемого объекта. Расчетная модель эллиптической балки создавалась из КЭ типа 44 (четырёхугольный конечный элемент оболочки) с шагом разбиения 50 мм для всех структурных составляющих балки (рис. 3). Далее работа с расчетной моделью заключалась в моделировании граничных условий ее реального закрепления и приложения нагрузки (в данном случае значение нагрузки, прикладываемой при испытании эллиптической балки).

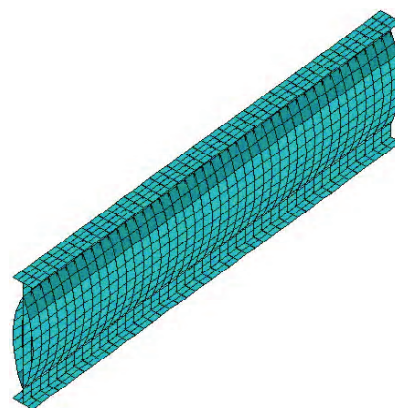


Рисунок 3 – Фрагмент КЭ модели эллиптической балки.

Расчет модели производился в геометрически линейной постановке задачи при упругой работе материала. По результатам расчета определены: прогиб балки под нагрузкой (рис. 4), величины наибольших нормальных напряжений (рис. 5), величины наибольших касательных напряжений (рис. 6) и наименьший коэффициент запаса устойчивости балки. Сводные результаты расчета представлены в таблице.

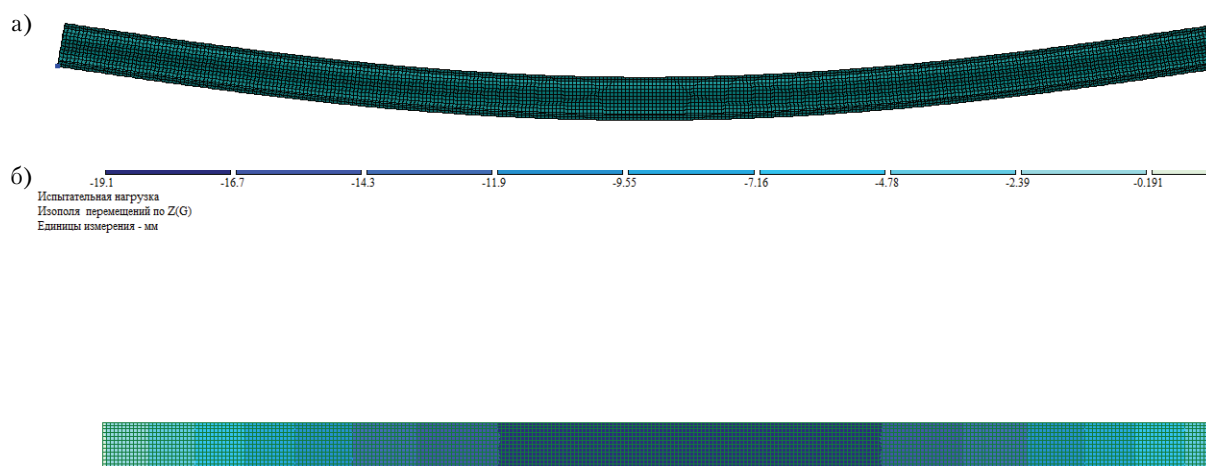


Рисунок 4 – Деформация эллиптической балки под испытательной нагрузкой: а) деформированная схема, б) изополя прогибов по длине балки.

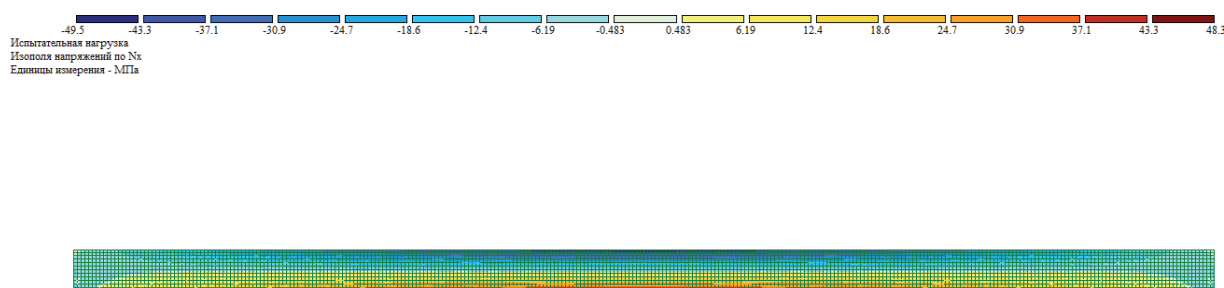


Рисунок 5 – Изополя распределения нормальных напряжений σ по длине эллиптической балки.

Величина прогиба в тонкостенной балке, определенная в ПК Лира, превышает нормируемую величину, предъявляемую к конструкциям такого рода ($f = 8,1 \text{ см} > 1/250L = 6,1 \text{ см}$). Для эллиптической балки – условие по прогибу выполняется.

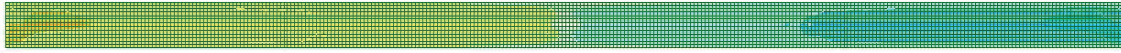
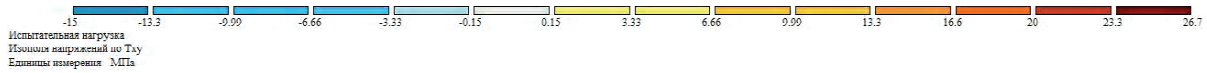


Рисунок 6 – Изополя распределения касательных напряжений τ по длине эллипсной балки.

Таблица – Результаты расчета балок в ПК «Лира»

Величина	Эллиптическая балка	Тонкостенная балка
Расчетное сопротивление R_y , МПа	180	230
Нормальные напряжения в середине пролета σ , МПа	48,3 (69,8)	197 (167)
Прогиб f , см	1,91 (3,2)	8,1 (6,3)
Коэффициент устойчивости	1,1	1,5
Теоретический вес, кг	1 000	500

* R_y – для эллипсной балки принят по [3], а для тонкостенной – по [4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ольховский, Н. И. Описание железных балок и стропил, устроенных в Зимнем дворце при возобновлении его [Текст] / Составлено Корпуса горных инженеров подпоручиком Ольховским. – Из Горного Журнала книжки X, 1839 года. – Санкт-Петербург : тип. И. Глазунова и К, 1839. – 62 с.
2. Руководство по проектированию стальных тонкостенных балок [Текст] : Утв. 15/VI-1977 г. / Госстрой СССР; Главпроектстройпроект; Союзметаллостройинии проект; Центр. науч.-исслед. и проектный ин-т строит. металлоконструкций; ЦНИИПроектстальконструкция. – [Б. м.] : [б. и.], [19]. – 28 с. : ил.; 22 см.
3. Перельмутер, А. В. Очерки по истории металлических конструкций [Текст] / А. В. Перельмутер. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Москва : СКАД Софт : Изд. дом АСВ, 2015. – 255 с. : ил., цв. ил., портр.; 22 см.; ISBN 978-5-903683-31-4 : 2000 экз.
4. СП 16.13330.2017.Стальные конструкции [Текст] = Steelstructures : свод правил : издание официальное : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 27 февраля 2017 г. № 126/пр : [взамен 16.13330.2011] : введ. 2017-08-28 / АО «НИЦ "Строительство"», [принят] Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. – Москва : Стандартиформ, 2017. – V, 142, [1] с. : ил., табл.; 29 см.

Получена 15.05.2020

Є. В. ГОРОХОВ, В. М. ВАСИЛЄВ, А. М. МИРОНОВ, А. С. ЩЕРБИНА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН МЕТАЛЕВОЇ ЕЛІПСНОЇ БАЛКИ ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

Анотація. З метою забезпечення пожежної безпеки в 1838–1839 роках при реконструкції Зимового палацу були використані нові залізні еліпсні балки складеного перерізу прольотом до 15 м. Еліпсна балка, розроблена інженером М. Є. Кларкомі, є прообразом сучасної двотаврової тонкостінної балки. Чотиришарова з листів 0,8 мм двохстінчата еліпсна стінка і система центральних розпірок забезпечували її стійкість. При виготовленні балок використовувалися заклепувальні, болтові з'єднання та ковальська технологія оброблення залізних конструкцій. У балках передбачено будівельний підйом. Готові балки перед установленням в проектне положення піддавалися пробі (статичним випробуванням). У статті відображені результати дослідження напружено-деформованого стану еліпсної балки і тонкостінної двотаврової балки однакової геометрії з використанням сучасних програмних комплексів. Розрахунок моделей проводився в геометрично лінійній постановці завдання при пружній роботі матеріалу.

Ключові слова: Зимовий палац, реконструкція, еліпсна балка, будівельний підйом, тонкостінна балка, ковальська технологія виготовлення металоконструкцій, заклепка, болт, статичні випробування, чисельні дослідження.

EVGENIY HOROKHOV, VOLODYMYR VASYLEV, ANDREY MIRONOV,
ANASTASIIA SHCHERBINA
TENSELY-DEFORMED STATE OF METALLIC ELLIPSE BEAM
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract. With the purpose of providing of fire safety in 1838–1839 for the reconstruction of the Winter palace the new ferrous ellipse beams of component section were used by flight a to 15 m. An ellipse beam is worked out by an engineer M.E. By Clark and is the prototype of the modern flange thin-walled beam. A four-layer ellipse wall with 0.8 mm sheets and a system of central struts ensured its stability. For making of beams riveting, screw-bolt connections and blacksmith's technology of treatment of ferrous constructions were used. The building getting up is envisaged in tanks. The prepared beams before setting in project position were exposed to the test (to the static tests). The results of research of the tensely-deformed state of ellipse beam and thin-walled flange beam of identical geometry are reflected in the article, with the use of modern programmatic complexes. The calculation of models was produced in the geometrically linear raising of task, during resilient work of material.

Key words: Winter Palace, reconstruction, ellipse beam, building rise, thin-walled beam, blacksmithing technology for manufacturing metal structures, rivet, bolt, static tests, numerical studies.

Горохов Евгений Васильевич – доктор технических наук, профессор; заведующий кафедрой металлических конструкций и сооружений ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Президент ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Иностраный член Российской Академии строительства, Член Международного комитета по изучению воздействия ветра на здания и сооружения. Научные интересы: эксплуатационная надежность строительных металлических конструкций, климатические нагрузки на строительные конструкции.

Васyleв Владимир Николаевич – кандидат технических наук; профессор кафедры металлических конструкций и сооружений ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: экспериментально-теоретическое исследование работы опор линий электропередачи, строительных конструкций и сооружения; технология изготовления строительных конструкций.

Миронов Андрей Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры металлических конструкций и сооружений ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: усталостная прочность металлических конструкций, концентрация напряжений в узлах ферм с применением широкополочных двутавров и гнутосварных замкнутых профилей, напряженно-деформированное состояние сталежелезобетонных конструкций, в том числе трубобетонных конструкций.

Щербина Анастасия Сергеевна – магистрант кафедры металлических конструкций и сооружений ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: экспериментально-теоретическое исследование работы строительных конструкций и сооружения.

Горохов Євген Васильович – доктор технічних наук, професор; завідувач кафедри металевих конструкцій і споруд ДДУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Президент ДДУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Іноземний член Російської Академії будівництва, член Міжнародного комітету з вивчення впливу вітру на будівлі і споруди. Наукові інтереси: експлуатаційна надійність будівельних металевих конструкцій, кліматичні навантаження на будівельні конструкції.

Василев Володимир Миколайович – кандидат технічних наук; професор кафедри металевих конструкцій і споруд ДДУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: експериментально-теоретичне дослідження роботи опор ліній електропередачі, будівельних конструкцій і споруди; технологія виготовлення будівельних конструкцій.

Миронов Андрій Миколайович – кандидат технічних наук, доцент кафедри металевих конструкцій і споруд ДДУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: втомна міцність металевих конструкцій, концентрація напружень в вузлах ферм із застосуванням широкополочних двотаврів і гнутосварних замкнутих профілів, напружено-деформований стан сталезалізобетонних конструкцій, у тому числі трубобетонних конструкцій.

Щербіна Анастасія Сергіївна – магістрант кафедри металевих конструкцій і споруд ДДУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: експериментально-теоретичне дослідження роботи будівельних конструкцій та споруди.

Horokhov Evgeniy – D. Sc. (Eng.), Professor; Head of the Metal Structures and Constructions Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. President, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Foreign Member of the Russian Academy of Civil Engineering, Member of the International Committee for the Study of the Impact of Wind on Buildings and Structures. Scientific interests: operational reliability of metal structures, climatic loads on building structures.

Vasylev Volodymyr – Ph. D. (Eng.); Professor; Metal Structures and Constructions Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: experimental and theoretical study of the work of the supports of power lines, building structures and structures; manufacturing technology of building structures.

Mironov Andrey – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Metal Structure and Construction Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: fatigue strength of metal structures, stress concentration in truss nodes using wide-flange I-beams and bent-welded closed profiles, stress-strain state of steel-reinforced concrete structures, including pipe-concrete structures.

Shcherbina Anastasiia – Master's student, Metal Structures and Constructions Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: experimental-theoretical study of the work of building structures and structures.