

Д-р техн. наук, профессор **А.В. Коргин**,
инженер **В.А. Романец**,
научный сотрудник **В.А. Ермаков**,
научный сотрудник **Л.З. Зейд Килани**
(Национальный исследовательский московский
государственный строительный университет (НИУ МГСУ))
Контактная информация: Korguine@mgsu.ru;
RomanetsVA@mgsu.ru;
Ermakov@mgsu.ru;
ZeydkilaniLZ@mgsu.ru

В статье рассмотрены вопросы натурных статических и усталостных испытаний полномасштабной модели пешеходного моста из алюминиевого сплава 1915Т в рамках разработки свода правил по проектированию мостов из алюминиевых сплавов. В ходе исследования с помощью компьютерного моделирования и ручного расчета были определены места наиболее нагруженных элементов конструкции и предельное количество циклов до образования трещины в узле моста. Подробно описана модель, схемы нагружения и места установки измерительного оборудования. Приведены ранее полученные результаты испытаний образцов на растяжение и усталость, которые необходимы для правильного моделирования работы конструкции и прогнозирования момента начала роста трещины. Проведена оценка сходимости результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Ключевые слова: мосты из алюминиевых сплавов, статические испытания, усталостные испытания, нагружение, напряженно-деформированное состояние, образование трещины.

ВВЕДЕНИЕ

В рамках разработки свода правил (СП 443.1325800.2019) «Мосты с конструкциями из алюминиевых сплавов. Правила проектирования» [1] сотрудниками НИУ МГСУ были проведены натурные статические и усталостные испытания несущих конструкций полноразмерного пешеходного моста из алюминиевого сплава 1915Т.

Цель исследования заключалась в проверке теоретических основ расчета на прочность и усталость, предложенных в СП [1], а также в сопоставлении результатов расчетов и компьютерного моделирования с данными экспериментальных испытаний.

Целесообразность разработки данного свода правил подтверждается мировым опытом проектирования и эксплуатации мостов из алюминиевых сплавов [2-8].

Натурные статические испытания моста заключались в определении:

- расположения наиболее напряженных зон в элементах конструкций;
- предельных значений статических нагрузок до момента образования пластических деформаций в наиболее напряженных зонах;
- значений глобальных перемещений моста в ходе нагружения;
- параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов конструкций моста.

В ходе усталостных (циклических) испытаний определяли:

- число циклов нагружения до момента образования трещин в наиболее нагруженных зонах;
- изменение параметров НДС конструкций моста при асимметричном цикле нагружения.

Задачи компьютерного моделирования в среде ANSYS [9] касались определения:

- критических нагрузок на конструкции моста;
- параметров НДС конструкций моста при статическом и циклическом нагружении и их сравнение с экспериментальными результатами.

Объект исследования

В ходе эксперимента изучали мостовую конструкцию из алюминиевого сплава 1915Т, состоящую из двух несущих ферм и прогонов между ними без элементов настила; длина пролета моста – 10 м, ширина – 3 м (рис. 1).

Нижние пояса ферм выполнены в виде сварных (составных) двутавров (190×100×6×10), верхние – труба квадратного сечения размером 120×8, а элементы решетки – трубы круглого сечения размером 100×5. Прогон моста (сварные двутавры размером 190×90×6×10) крепятся к фасонкам нижнего пояса с помощью болтов (все размеры в мм).

Сварка элементов ферм произведена в заводских условиях в среде инертного газа с применением сварочных материалов по СП 128.13330.2012 [10]. Монтажные стыки выполнены на болтах класса В, диаметром 8 и 12 мм.

Схема моста и характерные узлы представлены на рис. 1-3.

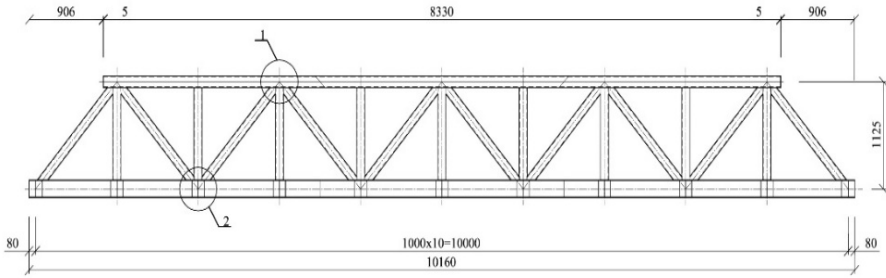


Рис. 1. Схема моста

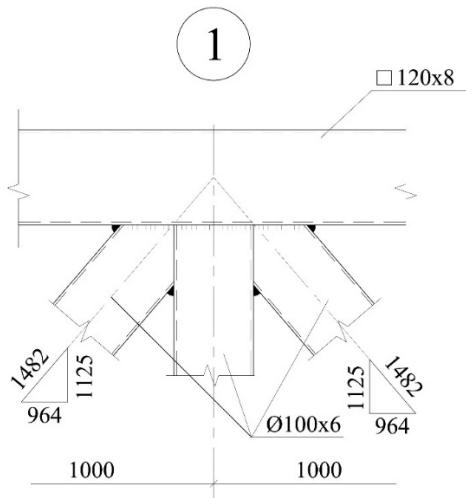


Рис. 2. Узел 1

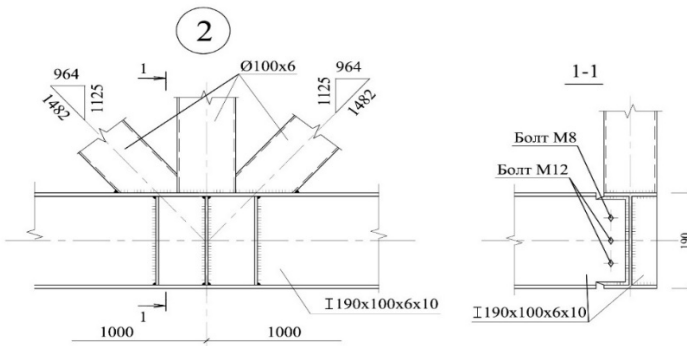


Рис. 3. Узел 2, разрез 1-1

После завершения сборки и установки моста на испытательный стенд были проведены контрольные измерения его геометрических параметров для учета возможных отклонений от проекта, необходимых при создании конечно-элементной модели (МКЭ-модели).

Испытательный стенд

Мост испытывался на универсальном испытательном стенде (рис. 4), позволяющем осуществлять нагружение в статическом и циклическом режимах с помощью двух или трех гидроцилиндров в диапазоне до 100 т (1 000 кН).

Преимуществами стенда являются:

- возможность приложения нагрузок по различным направлениям;
- стабильность поддержания нагрузок;
- электронный контроль и регистрация нагрузок;
- задание необходимой истории нагружения.

Безопасность при испытаниях обеспечивалась установкой предохранителей, останавливающих нагружение при превышении допустимых перемещений штока гидроцилиндров.



Рис. 4. Каркас моста, установленный в испытательную раму

Схемы приложения нагрузок

С учетом особенностей конструкции использовалась схема нагружения, близкая к равномерно распределенной нагрузке. Ее создание

обеспечивалось нагружением с помощью поэтажной системой промежуточных траверс.

В ходе статических испытаний нагрузка через систему траверс прикладывалась к поперечным прогонам моста с использованием 3-х гидроцилиндров: 2 гидроцилиндра симметрично передавали на прогоны нагрузку через три разноуровневые траверсы с максимальным усилием до 1000 кН, третий гидроцилиндр передавал нагрузку на крайний прогон через одноуровневую траверсу с максимальным усилием до 250 кН (рис. 5 а).

При проведении циклических испытаний третий гидроцилиндр не использовался по причине сложности синхронизации 3-х гидроцилиндров в режиме циклического нагружения (рис. 5 б).

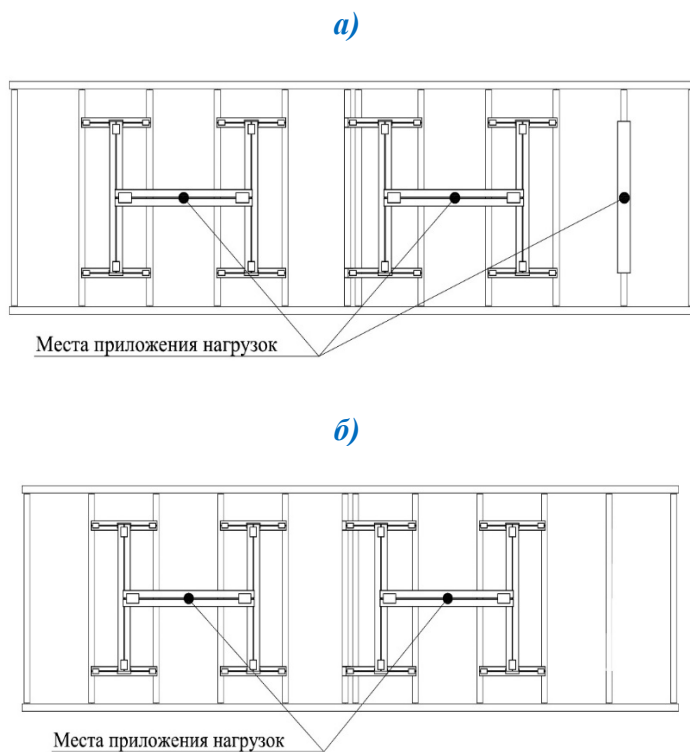


Рис. 5. Схемы приложения нагрузок на прогоны моста через траверсы:

- а) симметричное нагружение для статических испытаний;
- б) неполное симметричное нагружение для усталостных испытаний

Величины нагрузок

В ходе статических испытаний производилось поэтапное нагружение моста с шагом 22,5 кН (суммарное усилие от 3-х гидроцилиндров) с регистрацией деформаций и перемещений на каждом этапе. Максимальная суммарная нагрузка составила 270 кН (**рис. 5 а**).

Выбор величин нагрузок при циклическом нагружении осуществлялось на основании предложенной в СП методики усталостных расчетов, использующей аппроксимированную диаграмму предельных амплитуд Серенсена-Кинасошвили [11], а также ограничений на время проведения испытаний на универсальном испытательном стенде.

Исходные данные для построения диаграммы были получены в ходе ранее проведенных усталостных испытаний образцов сплава 1915Т [12].

На основании результатов данных испытаний строились усталостные кривые Веллера для симметричного ($r = -1$) и пульсирующего ($r = 0$) циклов нагружения.

Усталостные испытания проводились со следующими параметрами нагружения:

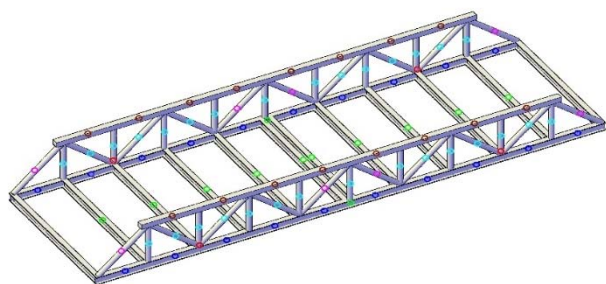
- суммарная максимальная нагрузка от 2-х гидроцилиндров – 200 кН;
- минимальный уровень напряжений – $\sigma_{min} = 8,02$ МПа;
- максимальный уровень напряжений – $\sigma_{max} = 45,7$ МПа;
- коэффициент асимметрии цикла – $r = 0,175$;
- частота приложения нагрузки – 0,5 Гц.

Измерительное оборудование

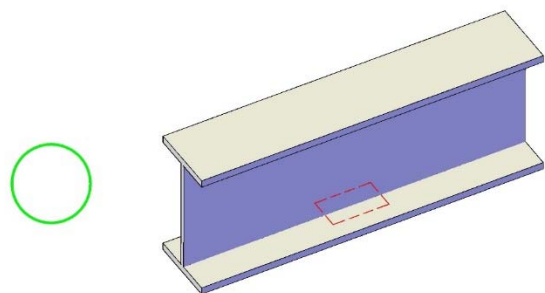
В ходе испытаний определяли следующие параметры:

- усилия от гидроцилиндров, регистрируемые с помощью тензометрических силоизмерителей;
- вертикальные перемещения точек в середине моста, регистрируемые с помощью тензометрических датчиков линейных перемещений;
- относительные деформации в характерных точках элементов, узлов ферм и прогонов моста, регистрируемые с помощью тензорезисторов и 2-компонентных тензорозеток с базой измерения от 1 до 5 мм.

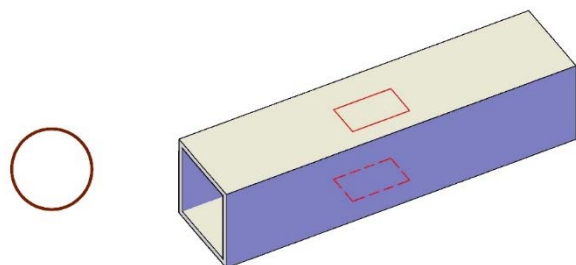
Схема установки тензорезисторов показана на **рис. 6 а-ж**.



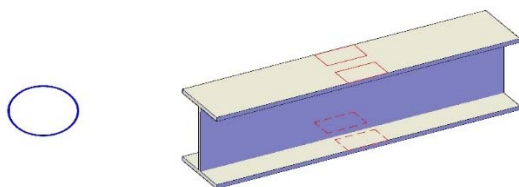
*Рис. 6 а.
Общая схема
расположения
датчиков*



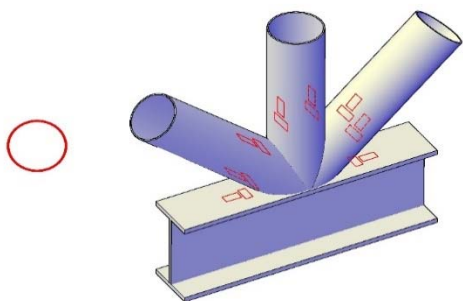
*Рис. 6 б.
Расположение
датчиков на
элементе
двутаврового
сечения (прогоны)*



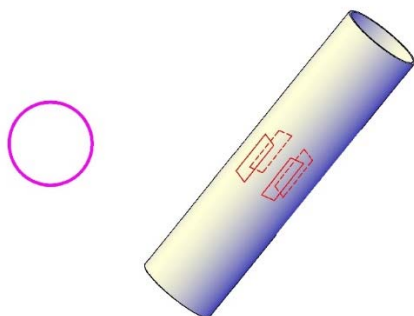
*Рис. 6 в.
Расположение
датчиков на эле-
менте квадратного
сечения*



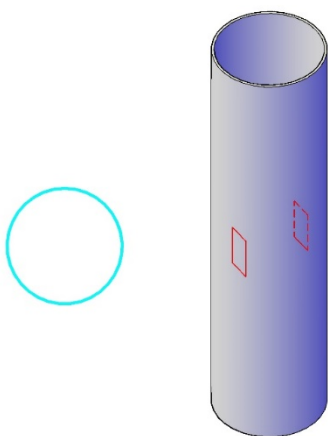
*Рис. 6 г.
Расположение
датчиков на эле-
менте двутавро-
вого сечения
(нижний пояс)*



*Рис. 6 д.
Расположение датчиков в узлах с наибольшей концентрацией напряжений*



*Рис. 6 е.
Расположение датчиков на расколах*



*Рис. 6 ж.
Расположение датчиков на стойках*

Общее количество тензорезисторов составило 240 штук: по 1 на каждый прогон, 32 – на верхних поясах, 80 – на нижних поясах, по 4 на опорных и средних раскосах, по 2 на остальных раскосах и стойках, а также по 16 датчиков в максимально нагруженных узлах. Регистрация деформаций осуществлялась с помощью автоматического тензоизмерительного комплекса (NI SCXI – 1001).

Компьютерное моделирование (расчеты)

На основе проектных данных и результатов уточняющих обмеров были созданы 2 конечно-элементные модели моста в программном комплексе ANSYS 15.0. Целью моделирования являлось определение:

- критических величин нагрузок на мост;
- наиболее нагруженных зон в элементах конструкций;
- максимальных перемещений, деформаций и напряжений;
- мест установки датчиков на испытуемом объекте.

Анализ работы конструкции проводился на полноразмерной стержневой модели [13] (рис. 7), с использованием элементов Beam 188 (рис. 8), и модели 1/4 моста, выполненной из объемных конечных элементов (рис. 10).

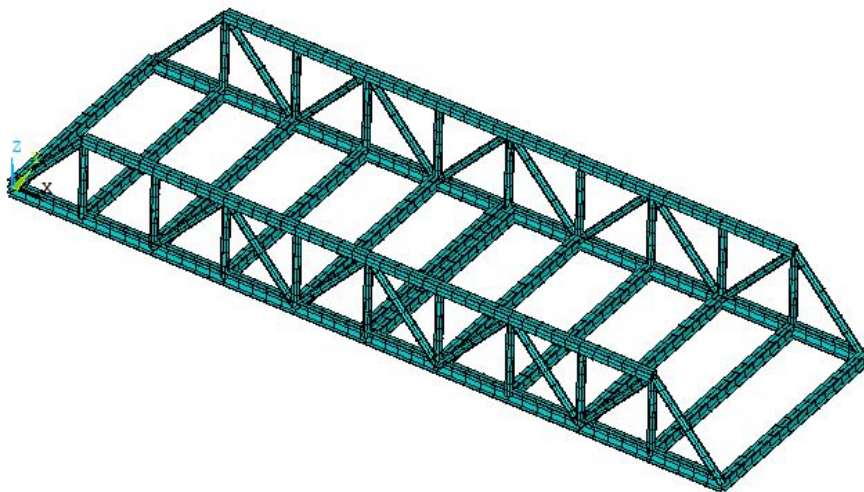


Рис. 7. МКЭ – модель моста

В объемной модели использовался трехмерный конечный элемент Solid185 (рис. 9), имеющий 8 узлов по 3 степени свободы в каждом узле. Модели к основанию закреплялись шарнирно.

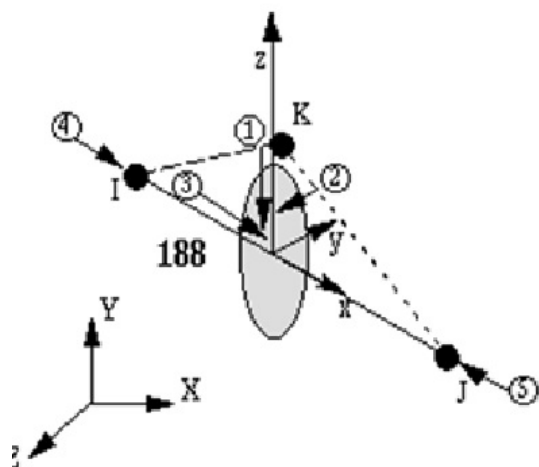


Рис. 8. Линейный конечный элемент BEAM 188

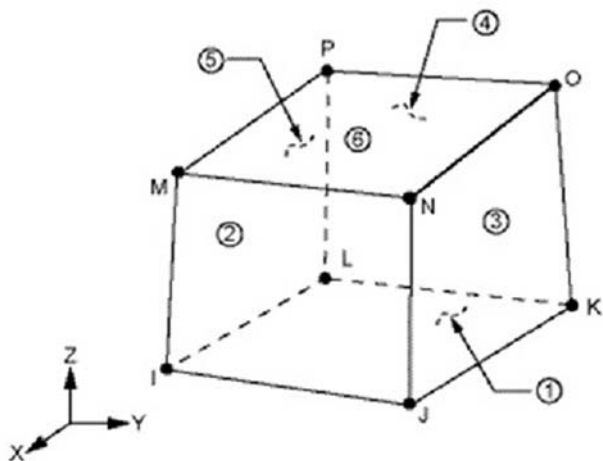


Рис. 9. Объемный конечный элемент Solid185 [2]

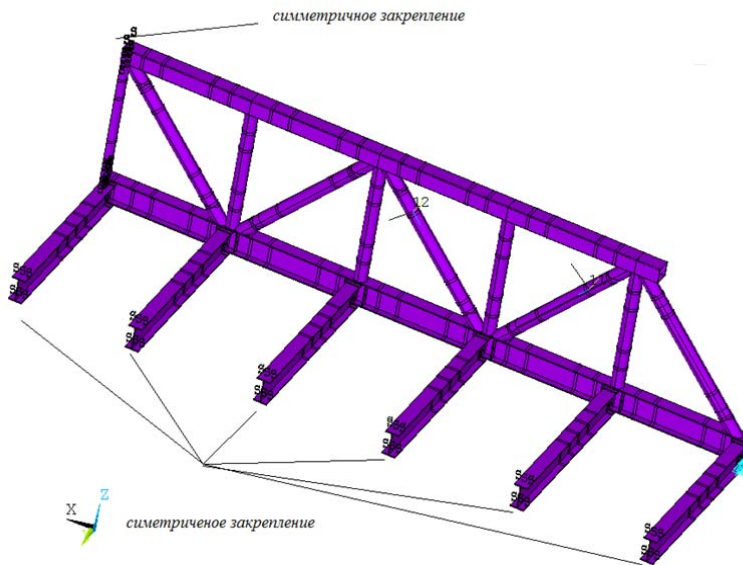


Рис. 10. МКЭ-модель 1/4 моста из объемных элементов

Расчеты проводились в режиме физической и геометрической нелинейности [13] деформирования материала конструкции. Нагружение производилось пошагово до автоматической остановки расчета, вызываемой несходимостью решения.

Физико-механические характеристики

Для определения физических характеристик используемого сплава были проведена серия испытания образцов сплава 1915Т [12]. По результатам статических испытаний образцов на растяжение были получены диаграммы деформирования материала (**рис. 11**), на основании которых были определены: временное сопротивление σ_B ; предел текучести $\sigma_{0,2}$; модуль упругости E ; коэффициент Пуассона ν (средние значения для расчета: $\sigma_B = 359$ МПа, $\sigma_{0,2} = 255$ МПа, $E = 87055$ МПа, $\nu = 0,33$).

В ходе усталостных испытаний образцов с коэффициентами асимметрии цикла $r = 0, -1$ на основании построенных диаграмм Веллера (**рис. 12**) были получены пределы выносливости $\sigma_0 = 150$ МПа и $\sigma_{-1} = 100$ МПа.

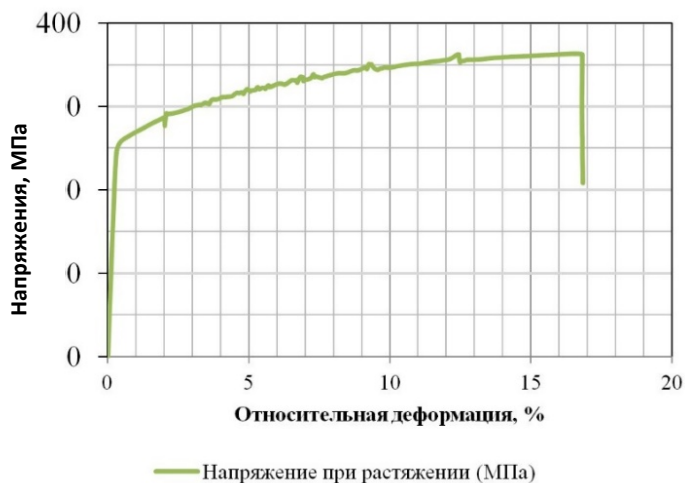


Рис. 11. Диаграмма деформирования алюминиевого сплава 1915Т

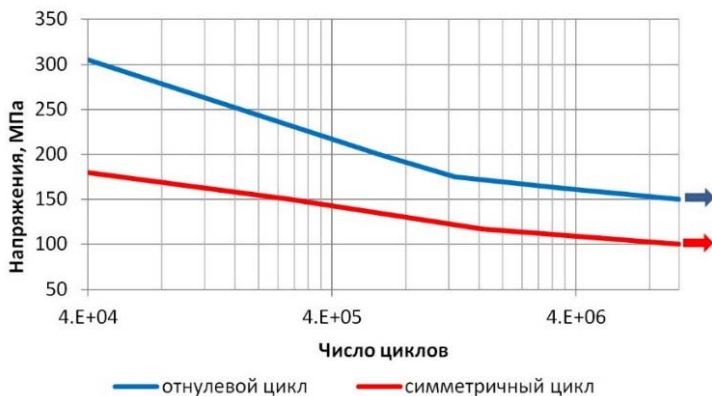
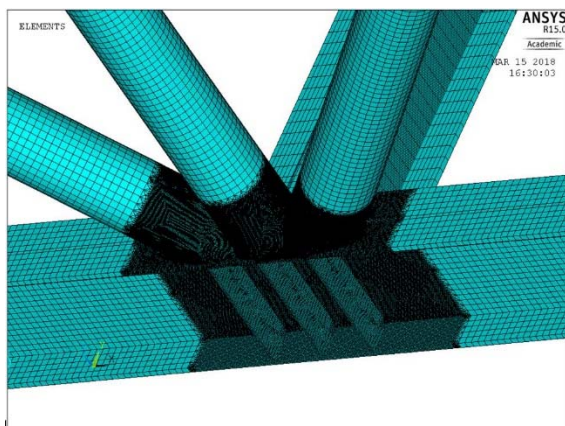


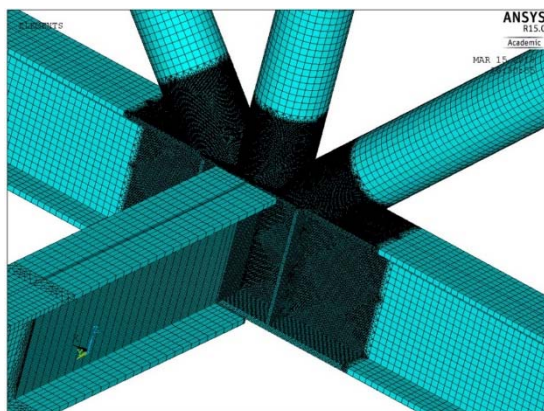
Рис. 12. Кривая Веллера (усталости) алюминиевого сплава 1915Т

В наиболее нагруженных узлах производилось сгущение сетки конечных элементов до размера базы тензорезистора, равного 1 мм с целью возможности сравнения показаний относительных деформаций, полученных расчетным путем и экспериментально (**рис. 13**).

а)



б)



*Рис. 13. Сетка конечных элементов в наиболее нагруженном узле:
а) вид 1; б) вид 2*

Результаты компьютерного моделирования

В результате компьютерного моделирования были определены максимально нагруженные элементы при статическом и циклическом нагружении (**рис. 14**).

Зона МКЭ-модели, в которой произошла остановка решения по причине его дальнейшей несходимости в ходе роста нагрузки, является самым нагруженным узлом (узел 1, **рис. 14**), с точки зрения статического нагружения без учета эффекта локальной концентрации напряжений

в узлах. Данный узел теряет устойчивость из вертикальной плоскости при достижении предельной статической нагрузки.

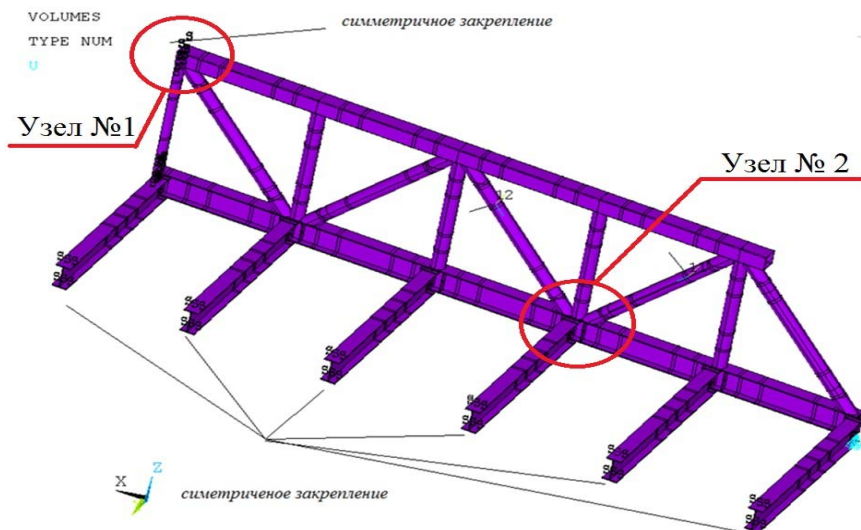


Рис. 14. Схема расположения наиболее нагруженных узлов

Зона, в которой имеет место максимальная локальная концентрация напряжений [14, 15] (узел 2, стык нижнего пояса со вторым от края моста раскосом, **рис. 14**), является наиболее слабым местом с точки зрения образования первоначальной усталостной трещины при циклическом нагружении. В данной зоне в силу невыгодного сочетания растягивающих усилий в нижнем поясе и приходящем в него максимально растянутым раскосом регистрируется максимальная концентрация напряжений. При этом концентрация напряжений носит локальный характер, сразу угасая при отдалении от узла, и при этом практически не влияет на несущую способность при статическом нагружении.

На основании результатов данных численного моделирования в узле 2 (и других симметричных ему 3-х узлах моста) были размещены малогабаритные тензорезисторы с базой 1 мм для контроля напряжений в зонах концентрации.

Расчетные напряжения узла моста относительно максимальных напряжений показаны на **рис. 15**.

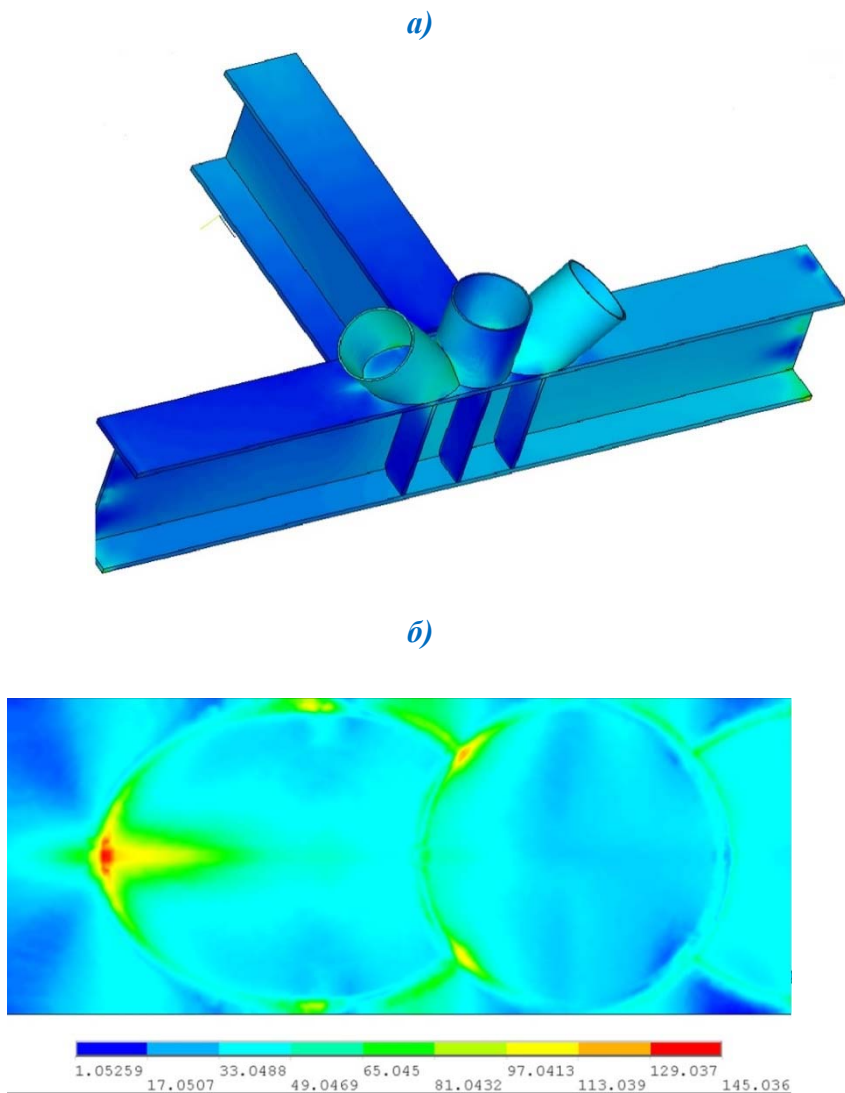


Рис. 15. Узел моста с максимальными напряжениями: а) общий вид узла; б) изополя напряжений на срезе узла, МПа

Теоретическое определение числа циклов до образования трещин

Теоретическое определение числа циклов при усталостном нагружении до появления и начала роста усталостных трещин в элементах испытываемого моста производилось в соответствии с методикой расчета

на усталость в СП 443.1325800.2019 «Мосты с конструкциями из алюминиевых сплавов. Правила проектирования» с использованием гипотезы суммирования Майера [16].

Расчет числа циклов до образования трещины:

1. Минимальные и максимальные номинальные напряжения из расчета стержневой МКЭ-модели моста с учетом требуемых нагрузок:
 $\sigma_{min} = 8,02$ МПа и $\sigma_{max} = 45,7$ МПа.
2. Стандартное число циклов предела выносливости – $2 \cdot 10^6$.
3. Предельная амплитуда $\sigma_{a0.5} = 9$ МПа и параметр угла наклона кривой усталости $m_1 = 3,4$ из таблицы СП для групп элементов в соответствии с компоновкой элемента и расположением расчетного участка.
4. Напряжения для сплава 1915Т из проведенных усталостных испытаний:
 $\sigma_0 = 150$ МПа и $\sigma_{-1} = 100$ МПа.
5. Коэффициент надежности по качеству $u_{Mf} = 1$.
6. Коэффициент надежности по качеству соединений для аргонодуговой полуавтоматической сварки в среде инертного газа $u_{Sf} = 1,3$.
7. Допустимый коэффициент надежности по выносливости:
 $[Z] = u_{Mf} \cdot u_{Sf} = 1 \cdot 1,3 = 1,3$.
8. Амплитуда и среднее напряжение цикла σ_a, σ_m :

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} = \frac{45,7 - 8,02}{2} = 18,84$$
 МПа;

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} = \frac{45,7 + 8,02}{2} = 26,86$$
 МПа.
9. Коэффициент асимметрии цикла:

$$K = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = \frac{8,02}{45,7} = 0,175$$
.
10. Угловой коэффициент амплитудной диаграммы ψ_σ :

$$\psi_\sigma = \frac{2 \cdot \sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_0} = \frac{2 \cdot 100 - 150}{150} = 0,333$$
.
11. Предельная амплитуда σ_c для симметричного цикла ($r = -1$):

$$\sigma_c = \sigma_{a0.5} \cdot (1 + 3 \cdot \psi_\sigma) = 9 \cdot (1 + 3 \cdot 0,333) = 18$$
 МПа.
12. Угловой коэффициент асимметричного цикла:

$$\varphi_\sigma = \frac{1 - K}{1 + K} = \frac{1 - 0,175}{1 + 0,175} = 0,701$$
.
13. Фактический коэффициент надежности для выносливости Z :

$$Z = \frac{\sigma_c}{\sigma_a \cdot \left(1 + \frac{\psi_\sigma}{\varphi_\sigma}\right)} = \frac{\sigma_c}{\sigma_a \cdot \left[1 + \frac{(2\sigma_{-1} - \sigma_0) \cdot (1+r)}{\sigma_0 \cdot (1-r)}\right]} = \frac{18}{18,84 \cdot \left(1 + \frac{0,333}{0,701}\right)} = 0,647$$
.
14. Ожидаемое количество циклов до образования трещины:

$$N_2 = 2 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{Z_\sigma}{[Z]}\right)^{m_1} = 2 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{0,647}{1,3}\right)^{3,4} = 187120$$
.

Результаты статических испытаний моста

Результаты обработки экспериментальных и расчетных данных верхних поясов ферм представлены в табл. 1 и на рис. 16-17.

Таблица 1

Сравнение средних показаний датчиков верхних поясов ферм с результатами численного моделирования

<i>Нагрузка 270 кН</i>	<i>Эксперимент</i>	<i>Расчет</i>	<i>Расхождение, %</i>
<i>Прогиб, мм (середина пролета)</i>	21,07	20,97	0,5%
<i>Относительные деформации (верхний пояс)</i>	$-1,01 \cdot 10^3$	$-0,96 \cdot 10^3$	5%



Рис. 16. Сравнение значений деформаций в верхнем поясе

Аналогичные сравнения по нижним поясам ферм показывают сходимость в 3-7 %, по раскосам ферм – 11-12 %.



Рис. 17. Сравнение значений прогибов в середине пролета

Полученные расхождения результатов экспериментов и численного моделирования свидетельствует об адекватности расчётной схемы фактическому НДС моста.

Результаты усталостных испытаний моста

Теоретические номинальные напряжения в стержне раскоса составили 45,7 МПа, теоретические напряжения с учетом концентрации напряжений в узле, в котором образовалась трещина, составили 187,4 МПа. При этом предел усталости гладких образцов того же сплава был установлен в ходе циклических испытаний и составил 150 МПа [12].

После проведения от 180 000 до 250 000 циклов испытаний было зафиксировано образование трещин в местах примыкания вторых от края раскосов к нижнему поясу фермы моста (**рис. 18**).



Рис. 18. Узел 2 с образовавшейся усталостной трещиной

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Усталостные испытания подтвердили корректность метода определения числа циклов нагружения до образования усталостных трещин, предложенного в СП 443.1325800.2019 «*Мосты с конструкциями из алюминиевых сплавов. Правила проектирования*», что подтверждается хорошей сходимостью результатов испытаний – первая трещина в узле 2 моста образовалась при 187120 циклах нагружения при расчетном количестве циклов – 180 000.

В среднем, расхождение от теоретических результатов по всем узлам с образовавшимися трещинами составляет 19 %, что является весьма удовлетворительным показателем для усталостных испытаний.

В соответствии с предложенной методикой могут быть рассчитаны любые конструкции, работающие в условиях циклического изменения нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. СП 443.1325800.2019. *Мосты с конструкциями из алюминиевых сплавов. Правила проектирования*. – Введ. 2019-10-31. – 84 с. – Электрон. данные. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/554820824> (дата обращения: 25.01.2020).
2. Siwowski T. *Aluminium bridges – Past, present and future* / T. Siwowski // *Structural Engineering International*. – 2006. – No 4. (V. 16.). – P. 286-293.
3. Das S.K. *Aluminum alloys for bridges and bridge decks* / S.K. Das, J.G. Kaufman // *Aluminum Alloys for Transportation, Packaging, Aerospace, and Other Applications*. – TMS. – 2007. – PP. 61-72.

4. Платонов А.С. О применении конструкций из алюминиевых сплавов в мостостроении / А.С. Платонов, А.В. Кручинкин, В.И. Звирь // Вестник мостостроения. – 2008. – № 1. – С. 28-32.
5. Коргин А.В. Перспективы и проблемы применения алюминиевых сплавов при строительстве мостов в Российской Федерации / А.В. Коргин, В.А. Романец, В.А. Ермаков, Л.З. Зейд Килали // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2018. – № 9. – С. 42-48.
6. Гросу Р.А. Перспективы применения сталеалюминевых конструкций в мостостроении / Р.А. Гросу // Перспективные материалы в строительстве и технике (ПМСТ-2014): материалы Международной научной конференции молодых ученых. – Томск, 2014. – С. 383-390.
7. Трищенко В.И. Алюминиевые мосты: спрос отстаёт от предложения / В.И. Трищенко // Транспорт Российской Федерации. – 2017. – № 5 (72). – С. 73-78.
8. Siwowski T.W. Structural behavior of aluminium bridge deck panels / T.W Siwowski // Engineering structures. – 2009. – Vol. 31. – PP. 1349-1353.
9. Басов К.А. ANSYS. Справочник пользователя / К.А. Басов. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 639 с.
10. СП 128.13330.2012. Свод правил. Алюминиевые конструкции. – Введ. 2013-01-01. – 108 с. – Электрон. данные. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200092912> (дата обращения: 25.01.2020).
11. Коргин А.В. Сопротивление материалов с примерами решения задач в системе Microsoft Excel: учеб. пособие / А.В. Коргин. – М.: Инфра-М, 2014. – 389 с.
12. Коргин А.В. Прочность алюминиевых сплавов для мостостроения / А.В. Коргин, П.Д. Одесский, В.А. Ермаков, Л.З. Зейд Килани, В.А. Романец, Е.А. Королёва // Деформация и разрушение материалов. – 2019. – № 8. – С. 10-19.
13. Коргин А.В. Резервы несущей способности пространственных стержневых металлических конструкций / А.В. Коргин, Ю.И. Кудишин, Л.З. Зейд Килани // Научное обозрение. – 2016. – № 16. – С. 15-21.
14. Yu Chen. Stress concentration factors of circular chord and square braces K-joints under axial loading / Yu Chen, Jun Wan, Kang Hu, Jian Yang, Xixiang Chen // Thin-walled Structures. – 2017. – V. 113. – PP. 287-298.
15. Cao Yuguang. FEM study on the stress concentration factors of K-joints with welding residual stress / Yuguang Cao, Zhanbin Meng,

Shihua Zhang, Haiqing Tian // *Applied Ocean Research*. – 2013. – V. 43. – PP. 195-205.

16. Еврокод 9. Проектирование алюминиевых конструкций. Часть 1-3. Конструкции подверженные усталостным нагрузкам. ТКП EN 1999-1-3-2009 / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск, 2010. – 170 с. – Электрон. данные. – URL: <http://docserv.ercatec.net/> (дата обращения: 25.01.2020).

L I T E R A T U R A

1. SP 443.1325800.2019. Mosty s konstrukcijami iz alyuminievyh splavov. Pravila proektirovaniya. – Vved. 2019-10-31. – 84 s. – Elektron. dannye. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/554820824> (data obrashcheniya: 25.01.2020).
2. Siwowski T. Aluminium bridges – Past, present and future / T. Siwowski // *Structural Engineering International*. – 2006. – No 4. (V. 16.). – P. 286-293.
3. Das S.K. Aluminum alloys for bridges and bridge decks / S.K. Das, J.G. Kaufman // *Aluminum Alloys for Transportation, Packaging, Aer-ospace, and Other Applications*. – TMS. – 2007. – PP. 61-72.
4. Platonov A.S. O primenii konstrukcij iz alyuminievyh splavov v mostostroenii / A.S. Platonov, A.V. Kruchinkin, V.I. Zvir' // *Vestnik mostostroeniya*. – 2008. – № 1. – S. 28-32.
5. Korgin A.V. Perspektivy i problemy primeneniya alyuminievyh splavov pri stroitel'stve mostov v Rossijskoj Federacii / A.V. Korgin, V.A. Romanec, V.A. Ermakov, L.Z. Zejd Kilali // *Vestnik BGTU im. V. G. SHuhova*. – 2018. – № 9. – S. 42-48.
6. Grosu R.A. Perspektivy primeneniya stalealyuminevyh konstrukcij v mostostroenii / R.A. Grosu // *Perspektivnye materialy v stroitel'stve i tekhnike (PMST-2014): materialy Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii molodyh uchenyh*. – Tomsk, 2014. – S. 383-390.
7. Trishchenko V.I. Alyuminievye mosty: spros otstaet ot pred-lozheniya / V.I. Trishchenko // *Transport Rossijskoj Federacii*. – 2017. – № 5 (72). – C. 73-78.
8. Siwowski T.W. Structural behavior of aluminium bridge deck panels / T.W. Siwowski // *Engineering structures*. – 2009. – Vol. 31. – PP. 1349-1353.
9. Basov K.A. ANSYS. Spravochnik pol'zovatelya / K.A. Basov. – M.: DMK Press, 2012. – 639 s.
10. SP 128.13330.2012. Svod pravil. Alyuminievye konstrukcii. – Vved. 2013-01-01. – 108 s. – Elektron. dannye. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200092912> (data obrashcheniya: 25.01.2020).

11. Korgin A.V. *Soprotivlenie materialov s primerami resheniya zadach v sisteme Microsoft Excel: ucheb. posobie* / A.V. Korgin. – M.: Infra-M, 2014. – 389 s.
12. Korgin A.V. *Prochnost' alyuminievykh splavov dlya mostostroe-niya* / A.V. Korgin, P.D. Odesskij, V.A. Ermakov, L.Z. Zeyd Kilani, V.A. Romanec, E.A. Korolyova // *Deformatsiya i razrushenie materialov*. – 2019. – № 8. – S. 10-19.
13. Korgin A.V. *Rezervy nesushchej sposobnosti prostranstvennykh sterzhnevyyh metallicheskih konstrukcij* / A.V. Korgin, YU.I. Kudishin, L.Z. Zeyd Kilani // *Nauchnoe obozrenie*. – 2016. – № 16. – S. 15-21.
14. Yu Chen. *Stress concentration factors of circular chord and square braces K-joints under axial loading* / Yu Chen, Jun Wan, Kang Hu, Jian Yang, Xixiang Chen // *Thin-walled Structures*. – 2017. – V. 113. – PP. 287-298.
15. Cao Yuguang. *FEM study on the stress concentration factors of K-joints with welding residual stress* / Yuguang Cao, Zhanbin Meng, Shihua Zhang, Haiqing Tian // *Applied Ocean Research*. – 2013. – V. 43. – PP. 195-205.
16. Evrokod 9. *Proektirovanie alyuminievykh konstrukcij. CHast' 1-3. Konstrukcii podverzhennye ustalostnym nagruzkam. TKP EN 1999-1-3-2009 /Ministerstvo arhitektury i stroitel'stva Respubliki Belarus'.* – Minsk, 2010. – 170 s. – Elektron. dannye. – URL: <http://docserv.ercatec.net/> (data obrashcheniya: 25.01.2020).

.....

TESTS OF THE 1915T ALUMINUM ALLOY BRIDGE

Doctor of Engineering, Professor **A.V. Korgin**,
Engineer **V.A. Romanets**,
Scientific Researcher **V.A. Ermakov**,
Scientific Researcher **L.Z. Zeyd-Kilani**
 (Moscow State University of
 Civil Engineering (NRU MGSU))
 Contact information: Korguine@mgsu.ru;
RomanetsVA@mgsu.ru;
Ermakov@mgsu.ru;
ZeydkilaniLZ@mgsu.ru

This article considers the issues concerning full-scale static and fatigue testing of a full-sized model of the pedestrian bridge made of aluminum alloy 1915T when developing the Set of Rules for the design of bridges made of aluminum alloys. During the research work through modeling and hand calculation the location of the most loaded structural elements and the maxi-

imum number of cycles for crack initiation in the bridge joint have been determined. The model, loading schemes, and measuring equipment installation locations are described. The article also presents the previously obtained results of samples testing for tension and fatigue, which are necessary for accurate modeling of the structure and predicting the crack initiation and growth. The convergence in the results of theoretical and experimental researches has been assessed.

Key words: *aluminum alloy bridges, static tests, fatigue tests, loading, stress-strain state, crack formation.*

Рецензенты: канд. техн. наук В.А. Селиверстов;
заместитель начальника управления диагностики автомобильных дорог
С.С. Тюник (ФАУ «РОСДОРНИИ).

Статья поступила в редакцию: 12.03.2020 г.