

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.21/.8

DOI: 10.22227/2305-5502.2022.2.3

Расчет мостовых конструкций из алюминиевых сплавов на выносливость

Андрей Валентинович Коргин*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматривается разработанная методика расчета мостовых конструкций из алюминиевых сплавов, работающих в условиях многоциклового нагружения, на выносливость, и предложенная для совершенствуемой в настоящее время нормативной документации по расчету автодорожных мостов из алюминиевых сплавов в РФ.

Материалы и методы. Методика основана на результатах комплексных лабораторных испытаний ряда перспективных для производства мостовых конструкций алюминиевых сплавов 1915Т, АД35 Т1, 1565сМ, EN AW-6082 Т6. В ходе статических испытаний образцов данных сплавов до разрушения и усталостных испытаний до образования усталостных трещин при различных значениях коэффициента асимметрии цикла получены физико-механические и усталостные характеристики. В теоретическую основу методики положены отечественные разработки по расчету выносливости стальных конструкций и зарубежные нормативные материалы по расчету выносливости мостовых конструкций из алюминиевых сплавов.

Результаты. Достоверность разработанной методики проверялась в процессе статических и усталостных испытаний натурного пешеходного моста из сплава 1915Т и ортотропных плит из сплава EN AW-6082 Т6, спроектированных НИУ МГСУ и изготовленных заводами в РФ «ГС-Резерв», «КраМЗ» и «Сеспель» с помощью современных инновационных технологий экструдирования и сварки трением с перемешиванием. Расхождения экспериментальных результатов с результатами расчета по предложенной методике находятся в пределах 5–20%.

Выводы. Разработанная методика может быть также применима к другим типам конструкций, выполненным из алюминиевых сплавов, — резервуарам, трубопроводам, высотным сооружениям, и испытывающим многократные циклические воздействия.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: мост, алюминиевый сплав, несущая конструкция, выносливость, усталостная прочность, методика расчета, испытание образца, напряжение

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Коргин А.В. Расчет мостовых конструкций из алюминиевых сплавов на выносливость // Строительство: наука и образование. 2022. Т. 12. Вып. 2. Ст. 3. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2022.2.3

Автор, ответственный за переписку: Андрей Валентинович Коргин, korguine@mgsu.ru.

The analysis of fatigue resistance of bridge structures made of aluminum alloys

Andrey V. Korgin*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. The author has developed a method for the fatigue resistance analysis of bridge structures made of aluminum alloys subjected to polycyclic loading. The author suggests that this method should be introduced into the currently enhanced regulatory documentation focused on the analysis of highway bridges made of aluminum alloys.

Materials and methods. The method is based on the results of integrated laboratory testing of a number of aluminum alloys 1915T, AD35 T1, 1565hM, EN AW-6082 T6 that have good prospects in terms of the production of bridge structures. Physical-mechanical and fatigue characteristics were identified in the course of the static testing of specimens of these alloys before the fatigue cracking at different values of the cycle asymmetry coefficient. The theoretical fundamentals of the method stem from the domestic research on the fatigue resistance analysis of steel structures and foreign regulatory materials on the fatigue resistance analysis of bridge structures made of aluminum alloys.

Results. The reliability of the new method was verified in the course of static and fatigue testing of a full-scale pedestrian bridge made of 1915T alloy and orthotropic plates made of EN AW-6082 T6 alloy, designed by NRU MGUSU and manufactured by the Russian plants GS-Reserve, KraMZ and Sespel using advanced innovative technologies of extrusion and friction stir welding. Discrepancies between the experimental findings and the results of the analysis, made pursuant to the proposed methodology, are within 5–20%.

Conclusions. The proposed method can also be applied to other types of structures made of aluminum alloys, such as tanks, pipelines, high-rise structures, and other items that are subject to multiple cyclic effects.

KEYWORDS: bridge, aluminum alloy, bearing structure, fatigue resistance, fatigue strength, methodology of analysis, specimen testing, stress

FOR CITATION: Korgin A. V. The analysis of fatigue resistance of bridge structures made of aluminum alloys. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2022; 12(2):3. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2022.2.3

Corresponding author: Andrey V. Korgin, korguine@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В основе современных тенденций развития строительной отрасли РФ, и в том числе в мостостроении, — все более расширяющееся применение инновационных технологий и материалов. В числе первых к таким материалам, несомненно, относится алюминий, широко использующийся во многих сферах промышленного производства — авиационной, электротехнической, автомобильной, транспортной, строительной и др. [1].

Применение алюминиевых сплавов при производстве конструкций различного назначения имеет ряд важных преимуществ по отношению к традиционным материалам [2–4]:

- низкий удельный вес сравнительно с другими металлами;
- высокая удельная прочность, превышающая удельную прочность стали и бетона;
- отсутствие тенденции к хрупкому разрушению при понижении температуры;
- повышенная сейсмостойкость конструкций за счет меньшей массы;
- высокая коррозионная стойкость ряда сплавов;
- технологичность изготовления конструктивных элементов разнообразной формы;
- легкость транспортировки и монтажа крупногабаритных фрагментов.

В то же время конструкции из алюминиевых сплавов обладают рядом недостатков:

- повышенной деформативностью из-за пониженного модуля упругости;
- относительно невысокой сопротивляемостью усталостным разрушениям;
- риском гальванической коррозии в зонах контакта с другими материалами.

Для ряда строительных конструкций из алюминиевых сплавов, испытывающих многократные циклические воздействия (мосты, высотные сооружения, резервуары, трубопроводы), возникает необходимость обеспечения усталостной прочности в течение запланированного срока эксплуатации [5].

В настоящее время в нормативной документации РФ по проектированию строительных конструкций из алюминиевых сплавов общего назначения методика расчета на выносливость (усталостную

прочность) отсутствует¹. В специализированной для мостостроения и широко используемой нормативной документации по проектированию мостовых сооружений из традиционных материалов (сталь, железобетон, дерево) раздел по проектированию мостов из алюминиевых сплавов, как и методика их расчета на выносливость, также отсутствуют².

Основной причиной сложившейся ситуации является недостаточный объем научных исследований по изучению усталостной работы мостовых конструкций из алюминиевых сплавов [6]. Принятый в 2019 г. свод правил³ по проектированию мостов из алюминиевых сплавов продолжает совершенствоваться, приведенная в настоящей статье методика расчета мостов из алюминиевых сплавов на выносливость устраняет указанную проблему.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Особенности проектирования мостов из алюминиевых сплавов

Повышение экономической эффективности строительства мостов из алюминиевых сплавов с учетом их повышенной деформативности и перечисленными выше особенностями и отличиями физико-механических свойств сплавов от сталей налагают дополнительные условия на выбор конструктивных решений при проектировании, а именно:

- традиционные балочные решения пролетных строений оказываются неэффективными по причине значительной недогруженности материала из-за необходимости обеспечения жесткости конструкций (максимальных прогибов), и требуется применение пространственно развитых конструктивных схем — ферменных и арочных решений;
- для автодорожных мостов и отдельных интенсивно загруженных пешеходных мостов, испытывающих в процессе эксплуатации многократно повторяющиеся циклические воздействия, определяющим условием обеспечения нормативной несущей способности в течение заданного срока службы выступает условие выносливости, при этом, как правило, автоматически удовлетворяется условие жесткости,

¹ СП 128.13330.2016. Алюминиевые конструкции. Актуализированная редакция СНиП 2.03.06-85.

² СП 35.13330.2011. Мосты и трубы.

³ СП 443.1325800.2019. Мосты с конструкциями из алюминиевых сплавов. Правила проектирования.

а по прочности при балочных решениях приобретает многократный запас в сотни процентов.

Выносливость алюминиевых сплавов

Использование алюминиевых сплавов для производства конструкций, испытывающих многократные переменные во времени воздействия циклического характера, обуславливает необходимость обеспечения их выносливости в течение заданного срока службы. Для подобных конструкций он может составлять несколько десятков лет, а количество циклов нагружения за срок службы доходить до 10^6 – 10^8 циклов и более [7, 8].

С целью представления основных положений разработанной методики расчета мостовых конструкций из алюминиевых сплавов на выносливость следует рассмотреть ключевые положения расчетов на выносливость конструкций из других материалов, в частности стали.

Главные параметры циклического нагружения — максимальное и минимальное напряжения цикла $\sigma_{\max}$, $\sigma_{\min}$. Определяемые на их основе амплитуда и среднее напряжение цикла σ_a , σ_m , а также коэффициент асимметрии цикла r , связаны выражениями:

$$\begin{aligned}\sigma_a &= \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}, \\ \sigma_m &= \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}, \\ r &= \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}.\end{aligned}\quad (1)$$

Выносливость (усталостная прочность) металлов при различных уровнях циклически изменяющихся напряжений описывается кривой усталостной прочности, получаемой в ходе циклических испытаний на выносливость гладких образ-

цов (кривая Веллера — рис. 1) [9]. Представляемая в системе координат $\log \sigma_a$ – $\log N$ (σ_a — амплитуда цикла; N — число циклов нагружения) кривая имеет ломаную форму, состоящую из прямолинейных участков [10].

Основная характеристика усталостной прочности материала — предел выносливости σ_r , который устанавливается при построении усталостной кривой и является максимальным напряжением, ниже которого усталостное разрушение в материале (образование усталостной трещины) не происходит, либо материал способен выдержать заданное количество циклов нагружения [11].

Для сталей усталостная кривая, как правило, имеет два характерных участка (рис. 1, а), наклонный участок с котангенсом угла наклона m_1 и горизонтальный участок, соответствующий значениям предела выносливости, достигаемого в диапазоне 10^6 – 10^7 циклов нагружения [8], после которого считается, что усталостное разрушение не происходит.

Для алюминиевых сплавов, в отличие от сталей, данная кривая имеет более сложную форму, состоящую из трех участков (рис. 1, б), наклонные участки имеют различный угол наклона, выраженные параметрами m_1 , $m_2 \cong m_1 + 2$, горизонтальный участок достигается позже, чем у сталей, приблизительно при 10^8 циклах нагружения [8, 9].

В общем случае при расчетах конструкций на выносливость как для сталей, так и для алюминиевых сплавов в качестве предела выносливости принимается напряжение, соответствующее $2 \cdot 10^6$ циклам нагружения.

Факторы, влияющие на значение предела выносливости.

1. Концентрация напряжений: усталостное разрушение, предваряющееся образованием магистральных усталостных трещин, как правило, происходит в зонах концентрации напряжений наиболее нагру-

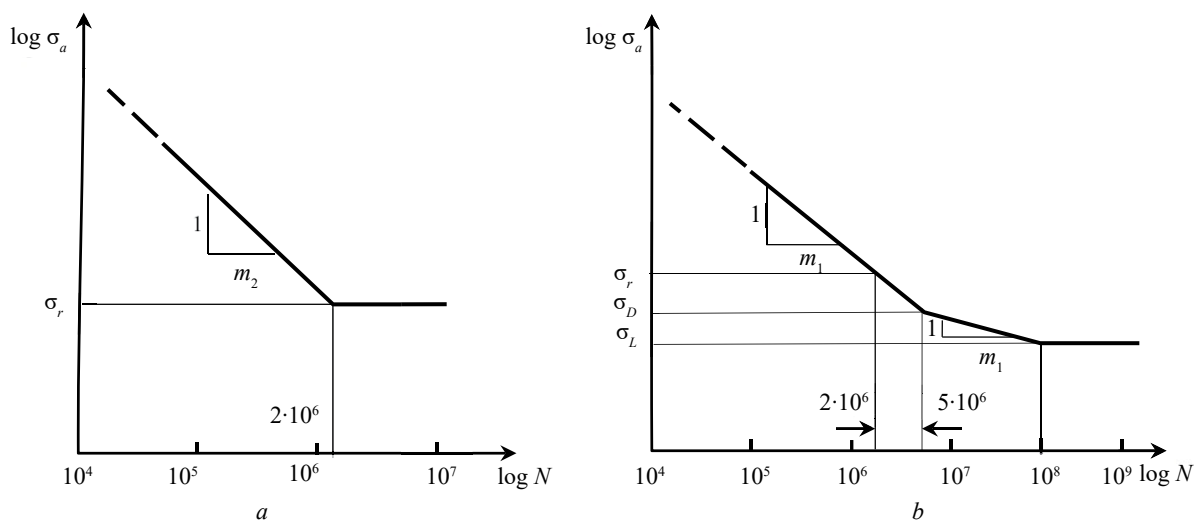


Рис. 1. Усталостная кривая для сталей (а); усталостная кривая для алюминиевых сплавов (б): σ_r — предел выносливости для сталей и алюминиевых сплавов при $2 \cdot 10^6$ циклах; σ_D — предел выносливости для алюминиевых сплавов при $5 \cdot 10^6$ циклах; σ_L — предел повреждаемости для алюминиевых сплавов 10^8 циклов

женных конструктивных элементов сооружения, и определяется их геометрической формой и способом соединения элементов [12].

Фактически действующие значения амплитуды и среднего напряжения цикла σ'_a , σ'_m в зоне ожидаемого усталостного разрушения и называемых эффективными напряжениями определяются путем умножения номинальных значений амплитуды и среднего напряжения цикла σ_a , σ_m на величину теоретического коэффициента концентрации напряжений K_σ :

$$\begin{aligned}\sigma'_a &= \sigma_a K_\sigma, \\ \sigma'_m &= \sigma_m K_\sigma.\end{aligned}\quad (2)$$

Номинальные напряжения σ_a , σ_m в указанных зонах выявляются в результате статического расчета конструкции без учета эффекта концентрации напряжений.

2. *Качество изготовления элементов конструкций* при усталостных расчетах учитывается с использованием коэффициента надежности по способу изготовления σ_{Mf} , зависящего от метода обработки элементов конструкций из алюминиевых сплавов при изготовлении [13].

Для прокатных и прессованных сечений $\sigma_{Mf} = 1$; сечений, выполненных автоматической резкой из листа с фрезеровкой кромок и разверткой отверстий $\sigma_{Mf} = 1,1$; без обработки кромок и отверстий $\sigma_{Mf} = 1,2$; для холодногнутых сечений из листа $\sigma_{Mf} = 1,5$.

3. *Способ соединения элементов конструкций* при усталостных расчетах учитывается с использованием коэффициента надежности по методу соединения σ_{sf} , зависящего от соединения элементов конструкций в конструктивные блоки [14].

Для элементов, соединяемых инновационной технологией сварки трением с перемешиванием $\sigma_{sf} = 1,0-1,1$; для традиционной аргонодуговой полуавтоматической сварки в среде инертного газа $\sigma_{sf} = 1,2-1,3$; ручной аргонодуговой сварки $\sigma_{sf} = 1,5$; соединений на высокопрочных болтах с контролем усилий затяжки $\sigma_{sf} = 1,2$ [15].

4. *Толщина проката*, при ее увеличении более 50 мм в ходе изготовления вводится коэффициент

надежности по толщине $\sigma_{TF} = 1,05$ при меньших толщинах $\sigma_{TF} = 1,0$ [16].

5. *Коэффициент асимметрии цикла r* (выражение (1)) оказывает существенное влияние на усталостную прочность конструктивных элементов [11], усталостные кривые для условного алюминиевого сплава, испытанного при различных значениях коэффициента асимметрии цикла r , представлены на рис. 2, а.

Точка 0 на оси абсцисс соответствует статическому испытанию до разрушения, которое на оси ординат дает значение временного сопротивления σ_b (коэффициент асимметрии $r = 1$).

Ниже находятся кривые выносливости со значениями σ_r , полученные в диапазоне $1 < r \leq 1$, при этом наименьшее значение предела выносливости σ_{-1} имеет место при симметричном цикле ($r = -1$), наиболее опасном для момента наступления усталостного разрушения.

Значения пределов выносливости для различных величин коэффициента асимметрии цикла r в координатах σ_a , σ_m — амплитуда и среднее напряжение цикла образуют так называемую диаграмму предельных амплитуд (рис. 2, б), выражающую общее условие обеспечения выносливости, при котором максимальное напряжение цикла σ_{max} не должно превышать соответствующий предел выносливости σ_r :

$$\sigma_{max} = \sigma_a + \sigma_m \leq \sigma_r. \quad (3)$$

По существу, диаграмма предельных амплитуд для конкретного сплава представляет собой комплексную прочностную характеристику данного сплава по обеспечению условия выносливости в диапазоне значений коэффициента асимметрии:

$$-1 \leq r \leq 1. \quad (4)$$

Ввиду невозможности проведения усталостных испытаний для многочисленных марок сталей и алюминиевых сплавов на практике используются аппроксимированные диаграммы предельных амплитуд (рис. 3), построенные на основании трех стандартных испытаний³.

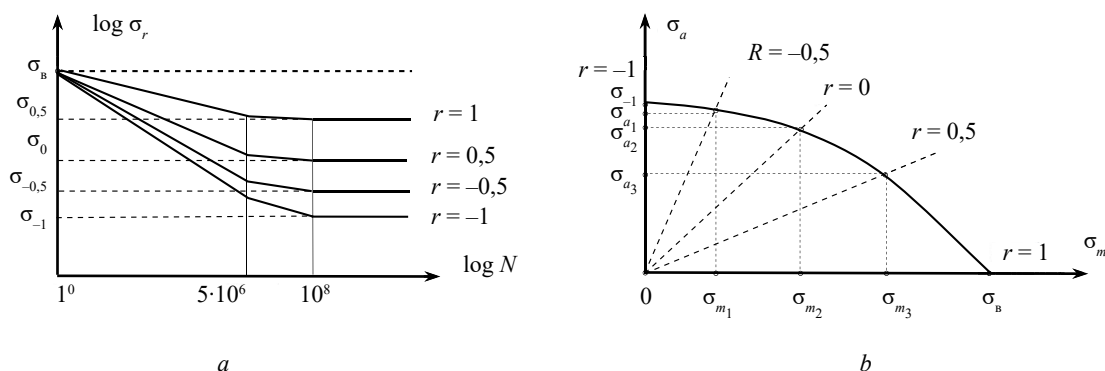


Рис. 2. Семейство усталостных кривых для условного алюминиевого сплава (а); диаграмма предельных амплитуд для условного алюминиевого сплава (б)

Аппроксимированная диаграмма Серенсена – Кинашвили строится на основании результатов двух усталостных испытаний с коэффициентами асимметрии цикла $r = -1$ (симметричный цикл), $r = 0$ (пульсирующий цикл) и статического испытания для определения предела текучести σ_T (условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ для сплавов без площадки текучести).

Эффективное значение амплитуды цикла σ'_a и среднего напряжения цикла σ'_m при заданном коэффициенте асимметрии r отражены на диаграмме рабочей точкой A .

Таким образом, основным параметром, графически выражаемым с помощью аппроксимированной диаграммы предельных амплитуд, является фактический коэффициент надежности по усталостному разрушению Z_σ :

$$Z_\sigma = \frac{OB}{OA}. \quad (5)$$

Параметрами расчетов на выносливость, также получаемыми при построении аппроксимированных диаграмм предельных амплитуд, являются:

- угловой коэффициент диаграммы предельных амплитуд:

$$\psi_\sigma = \frac{2\sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_0}; \quad (6)$$

- угловой коэффициент асимметричного цикла:

$$\varphi_\sigma = \frac{1-r}{1+r}, \quad (7)$$

где σ_{-1} , σ_0 — пределы выносливости при $2 \cdot 10^6$ циклах нагружения с постоянной амплитудой для симметричного ($r = -1$) и пульсирующего ($r = 0$)

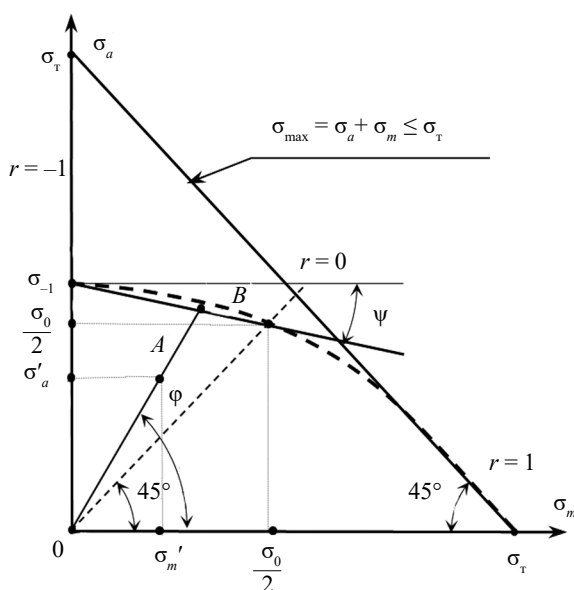


Рис. 3. Аппроксимированная диаграмма предельных амплитуд Серенсена – Кинашвили

циклов; r — коэффициент асимметрии цикла (выражение (1)).

В общем случае значение фактического коэффициента надежности по выносливости Z_σ при произвольном асимметричном цикле нагружения устанавливается путем анализа геометрического подобия компонентов аппроксимированной диаграммы предельных амплитуд, приводящего к выражению:

$$Z_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma'_a + \sigma'_m \psi_\sigma} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a K_\sigma + \sigma_m K_\sigma \psi_\sigma} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a K_\sigma (1 + \psi_\sigma / \varphi_\sigma)}, \quad (8)$$

где σ_a , σ'_a , σ_m , σ'_m — номинальное и эффективное значения амплитуды и среднего напряжения цикла при асимметричном цикле с заданным коэффициентом асимметрии r ; K_σ — теоретический коэффициент концентрации напряжений.

При отрицательных значениях среднего напряжения $\sigma_m < 0$ в выражении (11) используется его абсолютное значение $|\sigma_m|$.

При практических расчетах концентрацию напряжений удобно учитывать, объединяя конструктивные элементы в группы, для которых в зависимости от типов соединительных узлов при испытаниях с коэффициентом асимметрии цикла $r = 0,5$ установлено номинальное значение предельно допустимой амплитуды цикла $\sigma_{a0,5}$, обеспечивающей выносливость элемента конструкции при $2 \cdot 10^6$ циклах нагружения^{3,4}.

Предельно допустимое значение номинальной амплитуды σ_{a-1} ($r = -1$) симметричного цикла для конкретной группы элементов в целях ее использования для расчетов при произвольном виде асимметричного цикла напряжений устанавливается на основании выражения:

$$\sigma_{a-1} = \sigma_{a0,5} (1 + \psi_\sigma / \varphi_\sigma) = \sigma_{a0,5} (1 + 3\psi_\sigma). \quad (9)$$

Тогда для групп элементов фактический коэффициент надежности по выносливости Z_σ при заданном значении коэффициента асимметрии цикла r определяется выражением:

$$Z_\sigma = \frac{\sigma_{a-1}}{\sigma_a (1 + \psi_\sigma / \varphi_\sigma)}, \quad (10)$$

где σ_a — номинальное значение амплитуды цикла при заданном коэффициенте асимметрии r ; φ_σ — угловой коэффициент диаграммы предельных амплитуд при заданном значении r .

Методика расчета выносливости мостовых конструкций из алюминиевых сплавов имеет конечной целью обеспечение общего условия выносливости в виде недопущения образования усталостных

⁴ СП 16.13330.2016. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81* с Изменением № 1.

трещин в элементах несущих конструкций из алюминиевых сплавов в течение заданного срока службы.

Общепринятым средним числом циклов в течение заданного срока службы, в ходе воздействия которых не должно происходить образования усталостных трещин, если не установлено иное, принято $2 \cdot 10^6$ циклов². Для автодорожных мостов с проектным сроком службы 50 лет число циклов нагружения может многократно превышать данное значение.

Обеспечение отсутствия повреждений в течение заданного срока службы базируется на оценке возможности появления повреждения в течение заданного срока службы конструкции при использовании нижней оценки предела выносливости и верхней оценки значений усталостной нагрузки, что с запасом обеспечивает условие выносливости³.

С этой целью проводится анализ истории нагружения, заключающийся в составлении спектра напряжений в потенциальных местах возникновения трещин. Данная информация на основании расчета повреждаемости используется для оценки расчетного безопасного срока службы T_s , который затем сравнивается с заданным сроком T_L :

$$T_s = \frac{T_L}{D_L}. \quad (11)$$

При этом общая повреждаемость D_L для совокупности циклов вычисляется по правилу линейного суммирования повреждений Майнера как сумма их долей повреждаемости:

$$D_L = \sum \frac{n_i}{N_i}, \quad (12)$$

где N_i — долговечность, соответствующая нагружению количеством n_i ; i — вид циклов.

Суммарное значение общей повреждаемости должно удовлетворять условию:

$$D_L \leq D_{\lim} \leq 1, \quad (13)$$

где $D_{\lim}$ — предельное значение повреждаемости, в общем случае принимаемое равным 1.

Усталостная нагрузка устанавливается на основании анализа всех источников переменных напряжений в конструкции, а именно:

- временных подвижных нагрузок;
- нагрузок вследствие ветровых и сейсмических воздействий;
- динамической реакции от резонансных эффектов и движения в затрудненных условиях;
- температурных изменений.

Расчетные значения усталостной нагрузки выявляются на основании анализа установленного спектра нагрузок и подсчета циклов, которые устанавливают диапазон значений определенного циклического нагружения и количество повторений каждого диапазона в течение расчетного срока службы конструкции.

Спектр напряжений от усталостной нагрузки с переменной амплитудой устанавливается, в частности, методом «бассейна»⁵, заключающегося в определении последовательности убывающих по амплитуде напряжений циклов σ_{ai} и их группировки в конечное число диапазонов.

При недостаточной достоверности значений усталостной нагрузки F_{Ek} , полученных в соответствии с вышеуказанными условиями, для определения расчетной нагрузки F_{Ed} к нагрузке F_{Ek} применяется коэффициент надежности γ_{Ff} :

$$F_{Ed} = F_{Ek} \gamma_{Ff}, \quad (14)$$

где γ_{Ff} — коэффициент надежности для усталостных нагрузок, зависящий от статистических параметров прогнозируемых значений нагрузок [6].

Анализ напряженного состояния конструкций от усталостных воздействий осуществляется в упругой постановке, при этом определяются максимальные и минимальные значения напряжений от заданного воздействия с учетом возможных динамических эффектов.

Расчетные значения эффективных напряжений получают путем:

- умножения номинальных напряжений на соответствующие теоретические коэффициенты концентрации упругих напряжений K_σ для линейно-упругого материала в зависимости от места возникновения трещин и типа поля напряжений, получаемых на основании классических решений сопротивления материалов и теории упругости;

- конечно-элементного моделирования напряжено-деформированного состояния потенциальных зон возможного образования трещин с использованием детального разбиения данных зон на конечные элементы соответствующих типов.

За расчетные значения напряжений, используемых для оценки выносливости с помощью групп элементов, принимают номинальные значения амплитуды и среднего напряжения цикла в соответствии с выражениями (1), (2).

Расчет на выносливость заключается в определении долей повреждаемости конструкции от воздействия каждого диапазона напряжений из установленного спектра нагружения в отдельности, которые в сумме обеспечивают общее условие выносливости в соответствии с выражением (16).

С этой целью определяются значения долговечности N_i для всех диапазонов напряжений из установленного спектра, соответствующие полной повреждаемости $D_{\lim} = 1$ от воздействия каждого из диапазонов в отдельности. Суммарное значение долей повреждаемости от каждого диапазона устанавливается на основании выражения (13).

⁵ Eurocode 9: Design of aluminium structures. Part 1–3: Structures susceptible to fatigue.

Долговечность (расчетное число циклов до разрушения) N_i для конкретного диапазона циклов напряжений устанавливается с использованием кривой усталостной прочности (рис. 1, б). В пределах $5 \cdot 10^4$ – $5 \cdot 10^6$ циклов значение N_i определяется по формуле:

$$N_i = N_{C1} (Z_\sigma / [Z])^{m_1}, \quad (15)$$

• в пределах $5 \cdot 10^6$ – $5 \cdot 10^8$ циклов значение N_i рассчитывается по формуле:

$$N_i = N_{C2} (Z_\sigma / [Z])^{m_2} C^{m_2/m_1}, \quad (16)$$

где $N_{C1} = 2 \cdot 10^6$, $N_{C2} = 5 \cdot 10^6$ (циклов), $C = N_{C1}/N_{C2} = 0,4$; Z_σ — фактический коэффициент надежности по выносливости при заданном виде цикла, определяемый в соответствии с выражениями (8), (10); $[Z]$ — допускаемый коэффициент надежности по выносливости (17); $m_1, m_2 \cong m_1 + 2$ — параметры наклона участков кривой усталостной прочности.

Значение допускаемого коэффициента надежности по выносливости определяется с учетом качества изготовления элементов конструкций, способа их соединения в конструктивные блоки и толщины проката на основании выражения:

$$[Z] = \gamma_{Mf} \gamma_{sf} \gamma_{Tf}, \quad (17)$$

где γ_{Mf} — коэффициент надежности по качеству изготовления конструкций; γ_{sf} — коэффициент надежности по способу соединений; γ_{Tf} — коэффициент надежности по толщине проката.

При невыполнении условия выносливости (13) производится коррекция размеров поперечных сечений конструктивных элементов с последующим перерасчетом до выполнения данного условия.

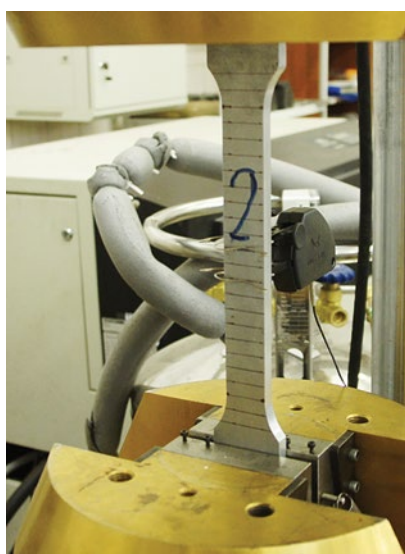
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальная проверка методики расчета на выносливость

1. Статические и усталостные испытания лабораторных образцов.

Для возможности применения представленной выше методики расчета конструкций из алюминиевых сплавов на выносливость были проведены лабораторные статические и усталостные испытания образцов четырех перспективных для производства строительных конструкций алюминиевых сплавов: 1915Т, АД35Т1, 1565чМ, EN AW-6082 Т6 (рис. 4, 5) [10].

В ходе лабораторных испытаний получены прочностные и усталостные характеристики, необходимые для расчетов мостовых конструкций из данных сплавов на статическое воздействие и выносливость (табл.).



Сплав 1915Т. Образец 1

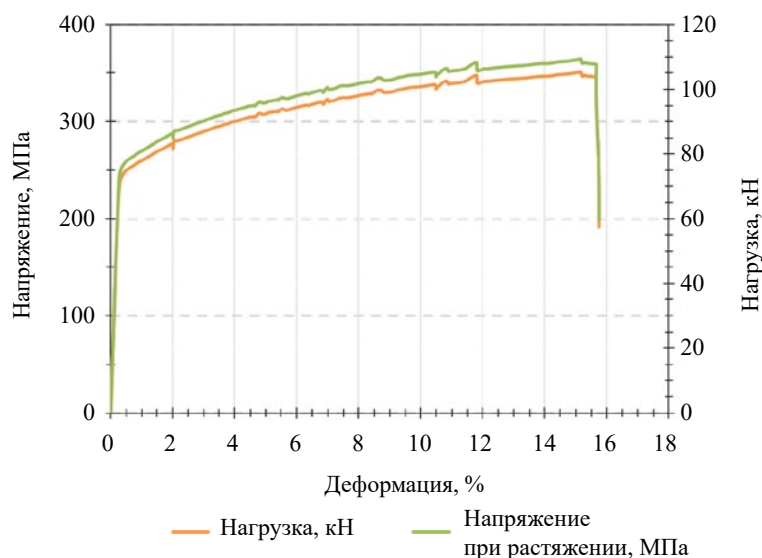


Диаграмма «Напряжение/Нагрузка-деформация»

Рис. 4. Вид и результаты статических испытаний образцов сплава 1915Т

Прочностные и усталостные характеристики алюминиевых сплавов

Параметр	Пределы выносливости σ_{-1} , σ_0 , текучести σ_T ($\sigma_{0,2}$), временное сопротивление σ_B , МПа, для сплавов марок			
	1915Т	АД35Т1	1565чМ	EN AW-6082 Т6
σ_{-1}	100	65	55	90
σ_0	150	105	90	145
σ_T ($\sigma_{0,2}$)	240	205	180	245
σ_B	360	275	270	305

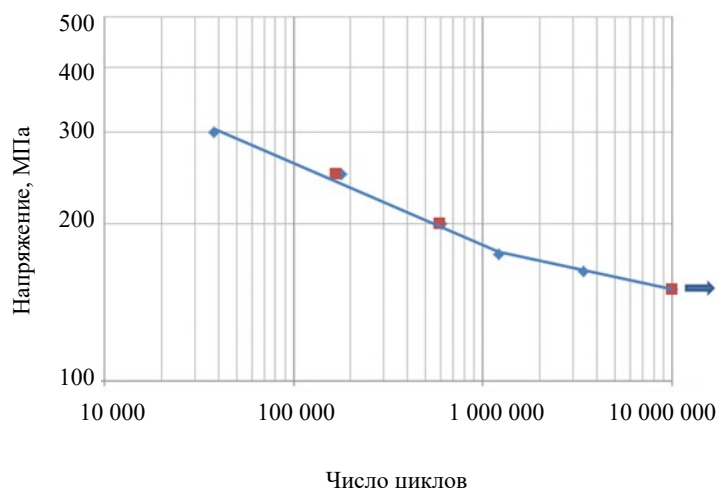


Рис. 5. Вид и результаты усталостных испытаний образцов сплава 1915Т

2. Статические и усталостные испытания натурных мостовых конструкций.

Пролетное строение (спроектировано НИУ МГСУ) реального пешеходного моста ферменного типа без дорожного покрытия с пролетом 10 м, выполненное заводом «ГС-Резерв» из сплава 1915, конструктивные элементы моста соединены аргонодуговой сваркой (рис. 6).

Мост подвергался статическому нагружению в упругой стадии и последующему усталостному нагружению от действия условной распределенной нагрузки, передаваемой на сооружение от двух нагружающих домкратов с помощью балочной системы траверс.

Экспериментально определенные параметры деформированного состояния моста, фиксируемые

в процессе статического нагружения с помощью тензометрических датчиков и прогибомеров, показали хорошую сходимость с результатами МКЭ расчета, расхождения теоретических и экспериментальных результатов находились в пределах 3–15 % [17].

Усталостные испытания выполнялись в условиях временных ограничений на проведение испытаний в течение 15 календарных дней, что при частоте нагружения один цикл за 5 сек (0,2 Гц) позволило осуществить за данный период 260 тысяч циклов нагружения.

Соответственно, на основании расчетов выносливости по предложенной методике была определена амплитуда пульсирующей нагрузки, под воздействием которой усталостное разрушение в наиболее напряженных зонах (участки примыкания вторых



Рис. 6. Вид испытаний пешеходного моста из алюминиевого сплава 1915Т и образовавшиеся трещины в ожидаемых зонах

от края моста раскосов к нижним поясам несущих ферм моста) в виде образования усталостных трещин должно было начаться приблизительно при 200 тысяч циклах нагружения.

Полученные результаты усталостных испытаний подтвердили достоверность предложенной методики, последовательное образование усталостных трещин в указанных выше наиболее напряженных зонах произошло в диапазоне 190–240 тысяч циклов нагружения, расхождения теоретических и экспериментальных результатов составили 5–20%.

НИУ МГСУ на базе отечественного и мирового опыта [18–20] разработал конструкцию ортотропных автодорожных плит, изготавливаемых инновационными методами экструзии и сварки трением с перемешиванием из алюминиевого сплава EN AW-6082 T6 (рис. 7).

Заводы «КраМЗ» и «Сеспель» изготовили партию данных ортотропных плит, которые в испытательном центре НИУ МГСУ сначала были подвергнуты статическому нагружению сосредоточенными в центрах плит силами, а затем усталостному нагру-

жению, эквивалентному действию спаренного колеса грузового автомобиля⁶.

В ходе статических испытаний ортотропные плиты выдержали сосредоточенную статическую нагрузку 850 кН на каждую плиту без образования пластических деформаций, что подтверждалось результатами МКЭ расчета, выполненного при проектировании плит. Полученное значение многократно превышает нормативное допускаемое документом² значение сосредоточенной нагрузки.

Дальнейшие усталостные испытания от действия, эквивалентного давлению спаренного колеса грузового автомобиля в условиях асимметричного цикла с коэффициентом асимметрии $r = 0,12$, проводились на нормативную нагрузку $A14^2$ в диапазоне 20–170 кН.

⁶ Технический отчет по заказу АО «Русал ТД» о выполнении работ на тему: «Разработка свода правил “Мосты с конструкциями из алюминиевых сплавов. Правила проектирования”» в рамках программы мероприятий по расширению действия и актуализации свода правил на автодорожные мосты. М. : НИУ МГСУ, 2020, 540 с.



Рис. 7. Испытания спаренных ортотропных автодорожных плит из сплава EN AW-6082 T6 на статическое воздействие и выносливость

Плиты выдержали $2 \cdot 10^6$ циклов нагружения без повреждений и образования усталостных трещин, что также подтверждается результатами предварительно выполненного расчета на выносливость по предложенной методике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные лабораторные испытания образцов перспективных для мостостроения алюминиевых сплавов марок 1915T, АД35 T1, 1565чМ, EN AW-6082

T6 позволили получить прочностные и усталостные характеристики, необходимые для расчетов мостовых конструкций из данных сплавов на выносливость.

Натурные испытания на выносливость пешеходного моста из сплава 1915T и серии ортотропных плит из сплава EN AW-6082 T6 подтвердили достоверность результатов предварительных расчетов данных объектов по предложенной методике на выносливость, для моста расхождение теоретических и экспериментальных результатов находится в пре-

делах 5–20 %, плиты выдержали запланированное количество циклов нагружения $2 \cdot 10^6$ циклов без усталостных повреждений.

Возможность применения предложенной методики расчета на выносливость конструкций из алюминиевых сплавов других марок определяется наличием их усталостных характеристик (пределов выносливости при симметричном и пульсирующем циклах — σ_{-1} , σ_0).

При этом нужно учитывать, что характеристики сплава конкретной марки в зависимости от условий его изготовления могут существенно отличаться.

Для получения данных характеристик необходимо проведение соответствующих лабораторных испытаний серий образцов, дополняемых, по возможности, натурными испытаниями конструкций и их фрагментов, выполненных из конкретного сплава.

Предложенная методика расчета на выносливость конструкций из алюминиевых сплавов может применяться к конструкциям любого типа и назначения, испытывающих в процессе эксплуатации многократные переменные во времени воздействия циклического характера.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бородкина В.В., Рыжова О.В., Улас Ю.В. Перспективы развития алюминиевого производства в России // *Фундаментальные исследования*. 2018. № 12. С. 72–77.
2. Гриценко Н.А., Сидельников, С. Б., Губанов И.Ю., Лопатина Е.С., Галиев Р.И. Механические свойства алюминиевых сплавов : монография. Красноярск : СФУ, 2012. 194 с.
3. Агафонов Р.Ю. Структура и механические свойства сплавов на основе алюминия с добавками редкоземельных металлов : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. 21 с.
4. Рожин А.В. Совершенствование процессов легирования и модифицирования алюминиевых сплавов на основе систем AL-CU-MG И AL-ZN-MG-CU : дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2013. 22 с.
5. Триценко В.И. Алюминиевые мосты: спрос отстает от предложения // *Транспорт Российской Федерации*. 2017. № 5 (72). С. 73–78.
6. Коргин А.В., Романец В.А., Ермаков В.А., Зейд Килани Л.З. Перспективы и проблемы применения алюминиевых сплавов при строительстве мостов в Российской Федерации // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2018. № 9. С. 42–46. DOI: 10.12737/article_5bab4a1a42eee3.23235487
7. Хажинский Г.М. Основы расчетов на усталость и длительную прочность. М. : URSS, 2016. 168 с.
8. Жунев К.О., Мурованный Ю.Н., Яинов А.Н. Исследование усталостной долговечности сварных соединений железнодорожных пролетных строений // *Транспортные сооружения*. 2020. Т. 7. № 2. С. 4. DOI: 10.15862/06SATS220
9. Ping Hwa. Fatigue behaviour of 6061 aluminium alloy and its composite. Tesis, Dublin City University, 2001.
10. Коргин А.В., Одесский П.Д., Ермаков В.А., Зейд-Килани Л.З., Романец В.А., Королева Е.А. Прочность алюминиевых сплавов для мостостроения // *Деформация и разрушение материалов*. 2019. № 8. С. 10–19. DOI: 10.31044/1814-4632-2019-8-10-19
11. Korgin A. V., Romanets V. A. Fatigue strength of aluminum alloy structures // *ПОАВ Journal*. 2020. Vol. 1. Issue S2. Pp. 1–10.
12. Махутов Н.А., Резников Д.О. Методы оценки напряженно-деформированного состояния в зонах конструктивной концентрации при штатных и аварийных режимах нагружения // *Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций*. 2018. № 4. С. 3–27.
13. Астафьева Н.А., Бузин А.С. Исследование влияния видов предварительной обработки на качество сварных облегченных конструкций из алюминиевых сплавов // *Вестник ИРГТУ*. 2018. Т. 22. № 7 (138). С. 10–18. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-7-10-18
14. Дриц А.М., Нурждин В.Н., Овчинников В.В., Конюхов А.Д. Исследование усталостной долговечности основного материала и сварных соединений листов из сплава 1565ч // *Цветные металлы*. 2015. № 12 (876). С. 88–93. DOI: 10.17580/tsm.2015.12.17
15. Овчинников В.В., Парфеновская О.А., Губин А.М. Влияние режима сварки трением с перемешиванием на прочность стыковых соединений алюминиевого сплава 1565ч // *Технология металлов*. 2020. № 7. С. 23–32. DOI: 10.31044/1684-2499-2020-0-7-23-32
16. Верхов Е.Ю., Морозов Ю.А. Анализ и разработка технологии изготовления гнутых толстолистовых деталей // *Вестник МГОУ. Серия: Техника и технология*. 2011. № 4. С. 14–19.
17. Korgin A., Romanets V., Ermakov V., Zeyd-Kilani L. Experimental and analytical study of an aluminium alloy bridge made of 1915T // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 251. P. 04005. DOI: 10.1051/mateconf/201825104005
18. Siwowski T. FEM modelling and analysis of a certain aluminium bridge deck panel // *Archives of Civil Engineering*. 2009. Vol. 3. Pp. 347–365.
19. Patton G. Aluminum orthotropic deck research report // *Archive Florida Departement of Transportation*. 2017. 52 p.

20. Билалов Д. А., Баяндин Ю. В., Наймарк О. Б. Численное моделирование процесса разрушения алюминиевых сплавов при динамическом

и усталостном нагружении // XXI Зимняя школа по механике сплошных сред: тезисы докладов. 2019. С. 46.

Поступила в редакцию 16 июня 2022 г.

Принята в доработанном виде 24 июня 2022 г.

Одобрена для публикации 24 июня 2022 г.

ОБ АВТОРЕ: **Андрей Валентинович Коргин** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры испытаний сооружений, заведующий научно-исследовательской лабораторией инженерных исследований и мониторинга строительных конструкций (НИЛ ИИМСК); **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 350779, Scopus: 6506837259, ResearcherID: B-4206-2016, ORCID: 0000-0002-5865-2891; korguine@mgsu.ru.

INTRODUCTION

The increasing use of innovative technologies and materials is a recent development trend in the Russian construction industry, including bridge construction. Aluminum is undoubtedly one of the top materials of this type. It is widely used in many areas of industrial production, such as aviation, electrical engineering, automobile industry, transport, civil engineering, etc. [1].

The use of aluminum alloys in the production of structures, having different applications, has a number of important advantages in relation to traditional materials [2–4]:

- low specific weight compared to other metals;
- high specific strength, exceeding the specific strength of steel and concrete;
- no tendency for brittle fracture when the temperature drops;
- higher seismic resistance of structures due to lower weight;
- high corrosion resistance of a number of alloys;
- manufacturability of structural elements, having different shapes;
- easy transportation and installation of large-size fragments.

At the same time, structures, made of aluminum alloys, have a number of drawbacks:

- higher deformability due to lower modulus of elasticity;
- relatively low resistance to fatigue failures;
- risk of galvanic corrosion in the areas of contact with other materials.

There is a need to ensure the fatigue strength during the planned service life of a number of building structures, made of aluminum alloys, that experience repeated cyclic effects (bridges, high-rise structures, tanks, pipelines) [5].

At present, the regulatory documentation of the Russian Federation on the design of general-purpose building structures, made of aluminum alloys, has no

fatigue strength analysis method¹. A section on the design of bridges, made of aluminum alloys, as well as methods of their fatigue resistance analysis is also missing from the widely used regulatory documentation on bridge design and construction of bridge structures, made of traditional materials (steel, reinforced concrete, wood)².

The main reason for this situation is the insufficient amount of scientific research on the fatigue performance of aluminum alloy bridge structures [6]. The code of regulations³ on the design of aluminum alloy bridges, adopted in 2019, continues to improve; the method of analysis of the fatigue performance of aluminum alloy bridges, provided in this article, can solve this problem.

MATERIALS AND METHODS

Aluminum alloy bridges: peculiarities of design

An increase in the economic efficiency of the construction of bridges, made of aluminum alloys, taking into account their higher deformability, the above features and the difference between the physical and mechanical properties of alloys and steels, impose supplementary conditions on the choice of structural solutions in the course of design, namely:

- traditional beam solutions of span structures turn out to be ineffective due to the substantially underloaded material due to the need to ensure structural rigidity (in case of maximum deflections), and the application of spatially developed structural solutions, namely, truss and arch solutions, is required;
- for road bridges and some heavily loaded pedestrian bridges, which are exposed to repetitive cyclic loading in the course of operation, the fatigue resistance condition is the main condition to ensure the required

¹ SP (Construction Regulations) 128.13330.2016. Aluminum structures. Revised edition of SNiP 2.03.06-85.

² SP (Construction Regulations) 35.13330.2011. Bridges and pipes.

³ SP (Construction Regulations) 443.1325800.2019. Bridges with structures made of aluminum alloys. Design rules.

bearing capacity in the course of the pre-set service life. As a rule, the rigidity condition is satisfied automatically, and the strength condition has a multiple reserve of hundreds of percent, if beam solutions are implemented.

The fatigue resistance of aluminum alloys

The use of aluminum alloys in the production of structures experiencing repeated alternating cyclic effects makes it necessary to ensure their fatigue resistance during the pre-set service life. For such structures it can be several dozens of years, and the number of loading cycles can reach up to 10^6 – 10^8 and more [7, 8].

For the purpose of presenting the main provisions of the proposed method of analysis of bridge structures made of aluminum alloys, it is necessary to consider the key provisions of the fatigue resistance analysis of structures made of other materials, namely, steel.

The main parameters of cyclic loading are maximum and minimum cycle stresses $\sigma_{\max}$, $\sigma_{\min}$. The amplitude and average cycle stress σ_a , σ_m , and cycle asymmetry coefficient r , determined on their basis, are related by expressions:

$$\begin{aligned}\sigma_a &= \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}, \\ \sigma_m &= \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}, \\ r &= \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}.\end{aligned}\quad (1)$$

The fatigue resistance (fatigue strength) of metals at different levels of cyclically varying stresses is described by the fatigue strength curve obtained in the process of cyclic fatigue resistance testing of smooth specimens (Weller curve, Fig. 1) [9]. If represented in the coordinate system $\log \sigma_a$ – $\log N$ (σ_a is the cycle amplitude; N is the number of loading cycles), the curve

has an irregular shape, consisting of rectilinear sections [10].

The main characteristic of the fatigue strength of a material is the fatigue resistance limit σ_r , which is set during the construction of the fatigue curve and is the maximum stress below which fatigue failure (fatigue cracking) does not occur, or the material is able to withstand a given number of loading cycles [11].

For steels, the fatigue curve usually has two characteristic sections (Fig. 1, *a*), a sloping section with a cotangent of the slope angle m_1 and a horizontal section corresponding to the values of the fatigue resistance limit reached in the range of 10^6 – 10^7 cycles of loading [8], after which it is considered that fatigue failure does not occur.

For aluminum alloys, that are different from steels, this curve has a more complicated shape consisting of three sections (Fig. 1, *b*), the inclined sections have different slope angles expressed by parameters m_1 , $m_2 \cong m_1 + 2$, the horizontal section is reached later than for steels, approximately at 10^8 cycles of loading [8, 9].

In general, the stress corresponding to $2 \cdot 10^6$ cycles of loading is taken as the fatigue resistance limit for both steels and aluminum alloys in the fatigue resistance analysis of structures.

Factors affecting the value of the fatigue resistance limit.

1. *Concentration of stresses*: fatigue failure, preceded by fatigue cracking, usually occurs in the areas of stress concentration in the most heavily loaded elements of a structure, and is determined by their geometric shape and element connection methods [12].

The actual values of the amplitude and cycle mean stress σ'_a , σ'_m in the area of anticipated fatigue failure and effective stresses are determined by multiplying the nominal values of the amplitude and cycle mean stress σ_a , σ_m by the value of the theoretical stress concentration factor K_σ :

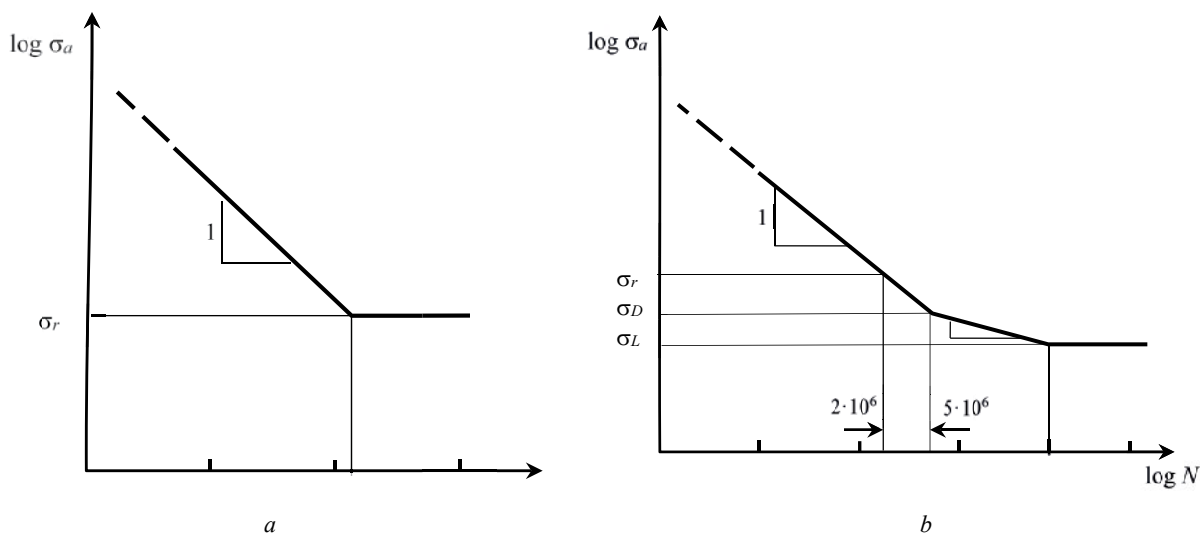


Fig. 1. Fatigue curve for steels (*a*); fatigue curve for aluminum alloys (*b*): σ_r is the fatigue resistance limit of steels and aluminum alloys at $2 \cdot 10^6$ cycles; σ_D is the fatigue resistance limit (fatigue strength) of aluminum alloys at $5 \cdot 10^6$ cycles; σ_L is the damage limit of aluminum alloys subjected to 10^8 cycles

$$\begin{aligned}\sigma'_a &= \sigma_a K_\sigma, \\ \sigma'_m &= \sigma_m K_\sigma.\end{aligned}\quad (2)$$

Nominal stresses σ_a , σ_m in the above areas are identified as a result of the static analysis of the structure without taking into account the stress concentration effect.

2. For the purpose of the fatigue resistance analysis, *the manufacturing quality of structural elements* is taken into account by applying reliability factor σ_{Mf} which depends on the processing method of structural elements made of aluminum alloys [13].

For rolled and pressed sections $\sigma_{Mf} = 1$; sections made by automatic cutting from sheet with the milling of edges and reaming of holes $\sigma_{Mf} = 1.1$; if no edges or holes are processed, $\sigma_{Mf} = 1.2$; for cold-bent sections made of a sheet $\sigma_{Mf} = 1.5$.

3. For the purpose of the fatigue resistance analysis, *the method of connection of structural elements* is taken into account by using the joint reliability coefficient σ_{sf} which depends on the method of connection of structural elements into structural blocks [14].

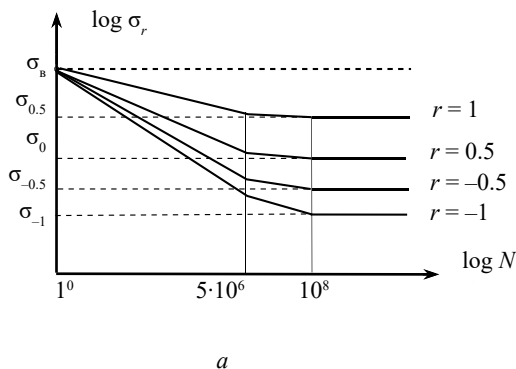
For elements, connected using the innovative friction stir welding technology $\sigma_{sf} = 1.0$ – 1.1 ; for traditional argon arc semi-automatic welding in the inert gas $\sigma_{sf} = 1.2$ – 1.3 ; for manual argon arc welding $\sigma_{sf} = 1.5$; bolted connections, made using high-strength bolts with torque control $\sigma_{sf} = 1.2$ [15].

4. If the *thickness of rolled steel* exceeds 50 mm in the course of production, a thickness reliability coefficient is introduced $\sigma_{TF} = 1.05$, for smaller thicknesses $\sigma_{TF} = 1.0$ [16].

5. *The cycle asymmetry coefficient r* (expression (1)) has a significant influence on the fatigue strength of structural elements [11]. Fatigue curves of a conventional aluminum alloy, tested at different values of the cycle asymmetry coefficient r , are presented in Fig. 2, *a*.

Point 0 on the abscissa axis corresponds to the static test to failure, which gives the temporary time resistance value σ_t (asymmetry coefficient $r = 1$) on the ordinate axis.

Below are the fatigue resistance curves with the values of σ_r obtained in the range $1 < r \leq 1$, with



a

the lowest value of the fatigue resistance limit σ_{-1} occurring in the symmetrical cycle ($r = -1$), the most dangerous for the moment of the fatigue failure onset.

The values of the limit fatigue resistance for different values of cycle asymmetry coefficient r in the coordinates σ_a , σ_m , or the amplitude and cycle mean stress make a so-called amplitude limit diagram (Fig. 2, *b*), which demonstrates the general condition of fatigue resistance, under which the maximum cycle stress σ_{max} must not exceed the corresponding fatigue resistance limit σ_r :

$$\sigma_{max} = \sigma_a + \sigma_m \leq \sigma_r. \quad (3)$$

Essentially, the amplitude limit diagram for a particular alloy is a comprehensive strength characteristic of that alloy needed to ensure the fatigue resistance condition in the range of asymmetry coefficient values:

$$-1 \leq r \leq 1. \quad (4)$$

Due to the impossibility of the fatigue testing of numerous grades of steels and aluminum alloys in practice, approximated amplitude limit diagrams (Fig. 3) based on three standard tests are used³.

The approximated Serensen – Kinasoshvili diagram is based on the results of two fatigue tests with cycle asymmetry coefficients $r = -1$ (the symmetric cycle), $r = 0$ (the pulsating cycle) and a static test to determine the yield strength σ_T (conventional yield strength $\sigma_{0.2}$ for alloys without any yield site).

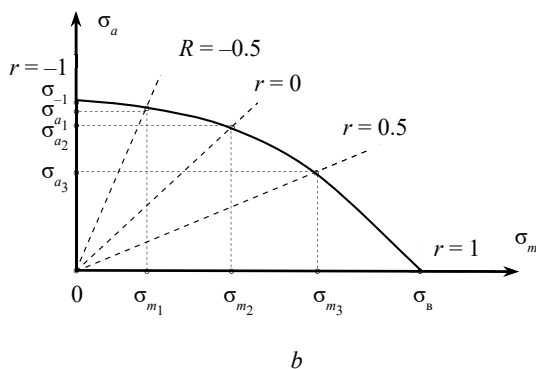
The effective value of the cycle amplitude σ'_a and cycle mean stress σ'_m at a given asymmetry coefficient r are reflected in the diagram using operating point *A*.

Hence, the main parameter expressed graphically by means of the approximated limit amplitude diagram is the actual fatigue damage reliability coefficient Z_σ :

$$Z_\sigma = \frac{OB}{OA}. \quad (5)$$

The parameters of the fatigue resistance analysis, also obtained as a result of the approximated limit amplitude diagrams, include:

- the angular coefficient of the limit amplitude diagram:



b

Fig. 2. The family of fatigue curves made for a conventional aluminum alloy (*a*); a limit amplitude diagram for a conventional aluminum alloy (*b*)

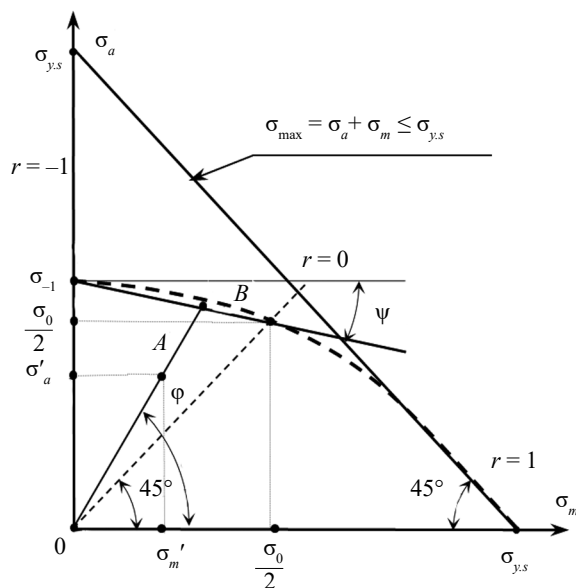


Fig. 3. The approximated Serensen–Kinasoshvili limit amplitude diagram

where N_i is the durability corresponding to n_i loadings; i is the type of cycles.

The total value of the total damageability must satisfy the condition:

$$D_L \leq D_{\lim} \leq 1, \quad (13)$$

where $D_{\lim}$ is the limit damageability value, generally assumed to be equal to one.

The fatigue load is identified by analyzing all sources of alternating stresses in a structure, namely:

- temporary moving loads;
- loads due to wind and seismic effects;
- dynamic response from resonance effects and hindered motion;
- temperature changes.

The calculated values of fatigue loading are identified by analyzing the pre-set spectrum of loads and counted cycles, which identify the range of values of the certain cyclic loading and the number of repetitions of each range during the design service life of a structure.

The stress spectrum triggered by the fatigue loading with a variable amplitude is identified using the “pool” method⁵ which consists in determining the sequence of cycles σ_{ai} decreasing in the amplitude of stresses and their grouping into a finite number of ranges.

In case of the insufficient reliability of fatigue load values F_{Ek} , obtained in accordance with the above conditions, design load F_{Ed} is applied to load F_{Ek} to find reliability factor γ_{Ff} :

$$F_{Ed} = F_{Ek} \gamma_{Ff}, \quad (14)$$

where γ_{Ff} is the reliability factor for fatigue loads, which depends on the statistical parameters of the predicted values of loads [6].

The analysis of the stressed state of structures subjected to fatigue influences is made in an elastic statement; maximum and minimum values of stresses, caused by the pre-set influence, are identified taking into account possible dynamic effects.

The calculated values of effective stresses are obtained by:

- multiplying nominal stresses by corresponding theoretical coefficients of elastic stress concentration K_σ for a linear-elastic material, depending on the location of cracks and the type of a stress field, obtained using the classical solutions of the strength of materials and elasticity theory;
- the finite-element modeling of the stress-strain state of potential cracking areas that represents detailed partitioning of these areas into finite elements of appropriate types.

The design values of stresses used to identify fatigue resistance by means of element groups are the nominal values of the cycle amplitude and average stress in accordance with expressions (1) and (2).

The fatigue resistance analysis consists in finding separate shares of damageability of a structure by each stress range from the pre-set loading spectrum, which in total provide the general condition of fatigue resistance according to expression (16).

For this purpose, values of durability N_i are determined for all stress ranges from the pre-set spectrum corresponding to total damageability $D_{\lim} = 1$ from the impact of each of the ranges separately. The total value of the damageability shares is identified using (13).

Durability N_i (the design number of cycles to failure) for a particular range of stress cycles is identified using the fatigue strength curve (Fig. 1, b). Within the range of $5 \cdot 10^4$ – $5 \cdot 10^6$ cycles, the value of N_i is found by applying the following formula:

$$N_i = N_{C1} \left(Z_\sigma / [Z] \right)^{m_1}, \quad (15)$$

within $5 \cdot 10^6$ – $5 \cdot 10^8$ cycles, the N_i value is calculated using the formula:

$$N_i = N_{C2} \left(Z_\sigma / [Z] \right)^{m_2} C^{m_2/m_1}, \quad (16)$$

where $N_{C1} = 2 \cdot 10^6$, $N_{C2} = 5 \cdot 10^6$ (cycles), $C = N_{C1}/N_{C2} = 0.4$; Z_σ is the actual reliability coefficient in terms of fatigue in case of a pre-set type of cycle, identified according to expressions (8), (10); $[Z]$ is the acceptable reliability coefficient in terms of fatigue (17); $m_1, m_2 \cong m_1 + 2$ are the slope parameters of sections of the fatigue strength curve.

The value of the acceptable reliability factor in terms of fatigue is identified taking into account the quality of structural elements, the method of their connection into structural blocks and the thickness of rolled steel:

$$[Z] = \gamma_{Mf} \gamma_{Sf} \gamma_{Tf}, \quad (17)$$

where γ_{Mf} is the coefficient of reliability based on the quality of manufacture of structures; γ_{Sf} is the coefficient of reliability based on the method of connections; γ_{Tf} is the coefficient of reliability based on the thickness of rolled products.

If the fatigue resistance condition (13) is not satisfied, cross-section sizes of structural elements are corrected and repetitively analyzed until this condition is satisfied.

RESEARCH RESULTS

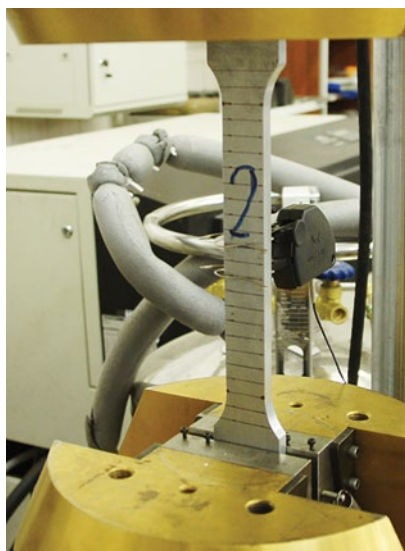
Experimental verification of methods of fatigue resistance analysis

1. Static and fatigue testing of laboratory specimens.

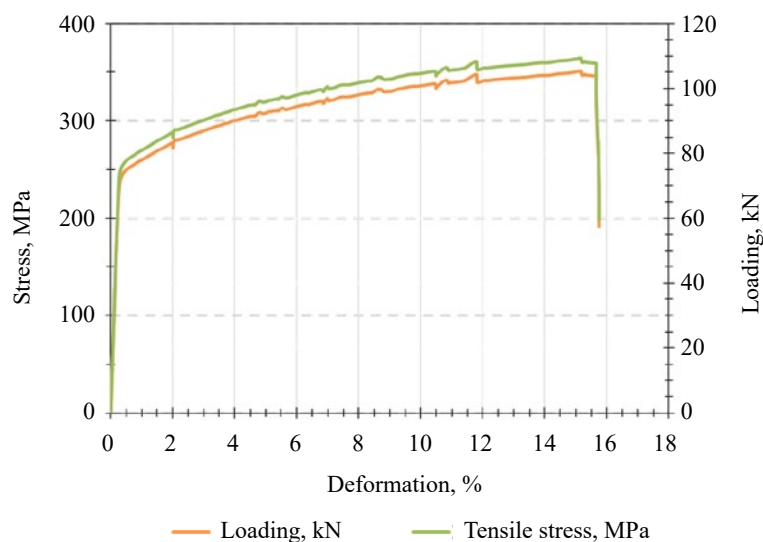
Laboratory static and fatigue tests of specimens of four perspective aluminum alloys 1915T, AD35T1, 1565hM, EN AW-6082 T6, designated for building structures, (Fig. 4, 5), were made to ensure the applicability of the above method of analysis of fatigue resistance properties of aluminum alloys [10].

In the course of the laboratory testing, strength and fatigue characteristics, required for the analysis of static impacts and the fatigue resistance of bridge structures, made of these alloys, were obtained (see the table).

⁵ Eurocode 9: Design of aluminum structures. Part 1–3: Structures susceptible to fatigue.



Alloy 1915T. Sample 1



«Stress/Loading-deformation» diagram

Fig. 4. View and results of static tests of 1915T alloy specimens

Strength and fatigue characteristics of aluminum alloys

Parameter	Fatigue resistance limits σ_{-1} , σ_0 , yield strength σ_{ys} ($\sigma_{0.2}$), temporary resistance σ_t , MPa, for alloy grades			
	1915T	AД35Т1	1565chM	EN AW-6082 T6
σ_{-1}	100	65	55	90
σ_0	150	105	90	145
σ_{ys} ($\sigma_{0.2}$)	240	205	180	245
σ_t	360	275	270	305

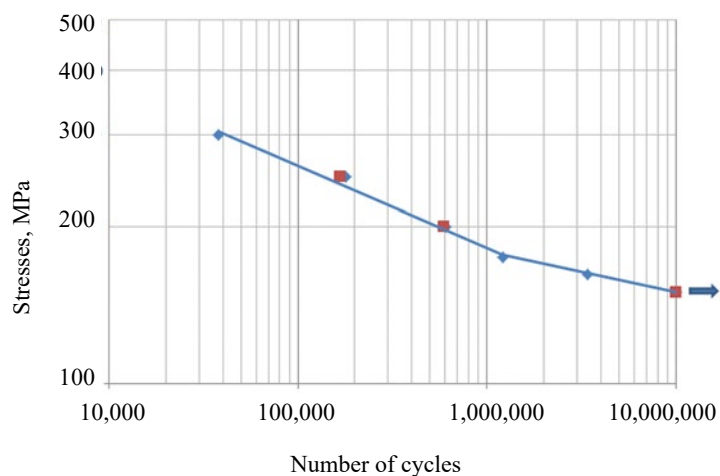


Fig. 5. View and results of fatigue tests of 1915T alloy specimens

2. Static and fatigue tests of full-scale bridge structures.

Here we analyze a span structure (designed by NRU MGSU) of a real pedestrian bridge of the truss type without a pavement and with a span of 10 m, made by GS-Reserve from alloy 1915; structural elements of the bridge are connected by argon-arc welding (Fig. 6).

The bridge was subjected to static loading in the elastic stage and subsequent fatigue loading from the conditional distributed load transmitted to the structure from two loading jacks with a system of beams.

Parameters of the deformation state of the bridge, identified in the course of an experiment and recorded in the process of static loading using strain gauges and

deflectometers, show good convergence with the results of the FEM analysis, divergence between theoretical and experimental results reached 3–15 % [17].

Fatigue tests were performed during 15 calendar days with a loading frequency of one cycle in 5 seconds (0.2 Hz). Hence, 260 thousand loading cycles were implemented during this period.

Therefore, according to the findings of the fatigue resistance analysis, made pursuant to the proposed methodology to find the amplitude of pulsating load, fatigue failure must occur in the most stressed areas in the form of fatigue cracking after approximately 200 thousand loading cycles.

The results of fatigue tests confirmed the reliability of the proposed methodology; fatigue cracking in the most stressed areas occurred in the range of 190–240 thousand loading cycles; divergence between theoretical and experimental results was 5–20 %.

NRU MGSU took advantage of the domestic and international experience [18–20] to design orthotropic road slabs made by innovative methods of extrusion and friction stir welding from aluminum alloy EN AW-6082 T6 (Fig. 7).

KramZ and Sespel plants produced a batch of these orthotropic plates, which were first subjected to static loading by forces, concentrated in the centres of the plates, and

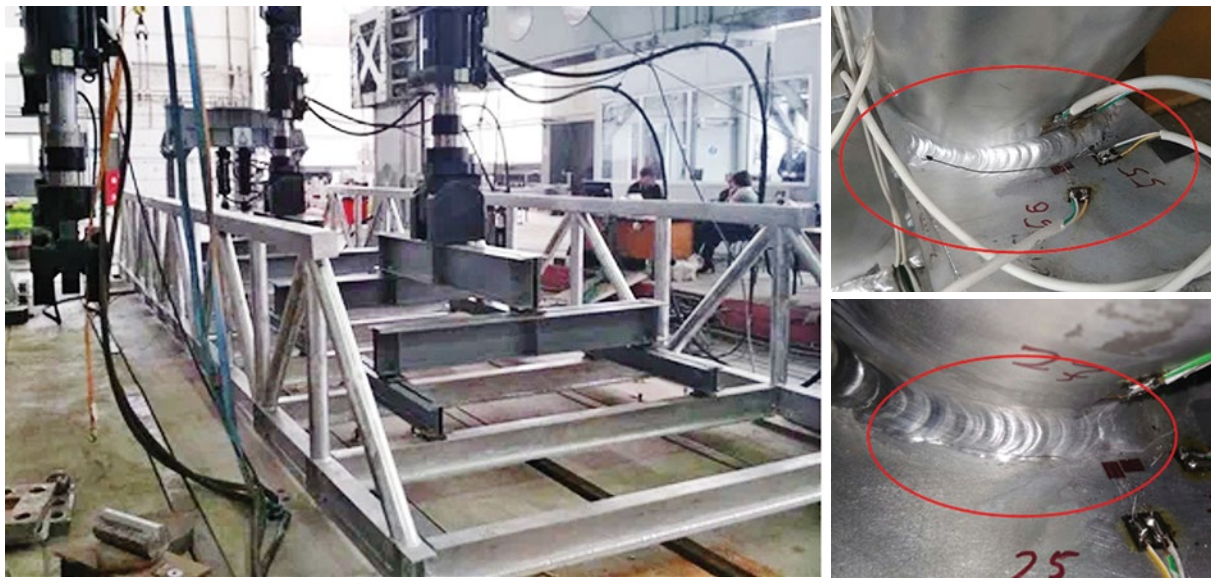


Fig. 6. Testing of the pedestrian bridge, made of the 1915T aluminum alloy, and its cracking in the anticipated areas



Fig. 7. Static load and fatigue resistance testing of coupled orthotropic road slabs made of EN AW-6082 T6 alloy

then to fatigue loading equivalent to the action of a coupled truck wheel in the testing centre of NRU MGSU⁶.

In the course of static testing, the orthotropic plates withstood a concentrated static load of 850 kN per plate without any plastic deformations, which was confirmed by the results of the FEM analysis performed during the design of the plates. The obtained value repeatedly exceeds the standard value of the concentrated load acceptable according to the regulatory document².

Further fatigue tests that represented the impact, equivalent to the pressure of a coupled truck wheel in conditions of an asymmetric cycle with asymmetry coefficient $r = 0.12$ were conducted for the standard load A14² in the range of 20–170 kN.

The plates withstood $2 \cdot 10^6$ cycles of loading without damage and fatigue cracking, which is also confirmed by the results of the preliminary fatigue resistance analysis made using the proposed method.

CONCLUSION AND DISCUSSION

The laboratory testing of specimens of aluminum alloy grades 1915T, AD35 T1, 1565hM, EN AW-6082 T6, having strong prospects in terms of bridge construction, allowed to obtain strength and fatigue

characteristics necessary for the fatigue resistance analysis of bridge structures made of these alloys.

The fatigue resistance testing of the pedestrian bridge made of 1915T alloy and a series of orthotropic plates made of EN AW-6082 T6 alloy confirmed the reliability of the results of preliminary fatigue resistance calculations of these objects according to the proposed procedure. For the bridge, the divergence between the theoretical and experimental results is within 5–20 %; the plates withstood the planned number of loading cycles ($2 \cdot 10^6$ cycles) without any fatigue damage.

The applicability of the proposed method of fatigue resistance analysis to structures made of aluminum alloys of other grades is determined by their fatigue characteristics (fatigue resistance limits σ_{-1} , σ_0 for symmetric and pulsating cycles).

In this case, it should be taken into account that the characteristics of the alloy of a particular grade can vary significantly, depending on the conditions of its manufacture.

To obtain these characteristics, it is necessary to subject series of samples to appropriate laboratory tests, which must be supplemented, if possible, by field tests of structures and their fragments made of a particular alloy.

The proposed methodology designated for the fatigue resistance analysis of structures made of aluminum alloys can be applied to structures of any type and purpose, which are subjected to repeatedly alternating impacts of cyclic nature in the process of operation.

REFERENCES

1. Borodkina V.V., Ryzhova O.V., Ulas Yu.V. Prospects for the development of aluminum production in Russia. *Fundamental Research*. 2018; 12:72-77. (rus.).
2. Grishchenko N.A., Sidel'nikov S.B., Gubanov I.Yu., Lopatina E.S., Galiev R.I. *Mechanical properties of aluminum alloys: monograph*. Krasnoyarsk, SFU, 2012; 194. (rus.).
3. Agafonov R.Yu. *Structure and mechanical properties of aluminum-based alloys with additives of rare earth metals : abstract dis. ... candidate of Technical Sciences*. Moscow, 2016; 21. (rus.).
4. Rozhin A.V. *Improving the processes of alloying and modifying aluminum alloys based on AL-CU-MG and AL-ZN-MG-CU systems: dissertation of Candidate of Technical Sciences*. Yekaterinburg, 2013; 22. (rus.).
5. Trishchenko V.I. Aluminium bridges: demand is behind the supply. *Transport of the Russian Federation*. 2017; 5(72):73-78. (rus.).
6. Korgin A.V., Romanets V.A., Ermakov V.A., Zeid-Kilani L.Z. Prospects and problems of using aluminum alloys in bridge construction in the Russian Federation. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2018; 9:42-46. DOI: 10.12737/article_5bab4a1a42eee3.23235487 (rus.).
7. Khazhinsky G.M. *Fundamentals of calculations for fatigue and long-term strength*. Moscow, URSS, 2016; 168. (rus.).
8. Zhunev K.O., Murovannyj J.N., Yashnov A.N. Fatigue life research of welded joints in railway girder. *Transport Structures*. 2020; 7(2):4. DOI: 10.15862/06SATS220 (rus.).
9. Ping Hwa. *Fatigue behaviour of 6061 aluminum alloy and its composite*. Tesis, Dublin City University, 2001.
10. Korgin A.V., Odesskiy P.D., Ermakov V.A., Zeid L.Z., Romanets V.A., Koroleva E.A. Strength of aluminum alloys for bridge building. *Deformation and Fracture of Materials*. 2019; 8:10-19. DOI: 10.31044/1814-4632-2019-8-10-19 (rus.).
11. Korgin A.V., Romanets V.A. Fatigue strength of aluminum alloy structures. *IIOAB Journal*. 2020; 1(S2):1-10.
12. Makhutov N.A., Reznikov D.O. Methods for assessment of stress-strain states in stress concentration zones in regular and accident loading con-

ditions. *Safety Problems and Emergencies*. 2018; 4:3-27. (rus.).

13. Astafieva N.A., Buzin A.S. Study of primary machining type influence on the quality of welded lightweight aluminum alloy structures. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018; 22(7):(138):10-18. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-7-10-18 (rus.).

14. Drits A.M., Nuzhdin V.N., Ovchinnikov V.V., Konyukhov A.D. Study of fatigue durability of the base material and welded joints of 1565h alloy sheets. *Tsvetnye Metally*. 2015; 12(876):88-93. DOI: 10.17580/tsm.2015.12.17 (rus.).

15. Ovchinnikov V.V., Parfenovskaya O.A., Gubin A.M. Influence of conditions of friction welding with mixing on strength of butt joints of aluminum alloy 1565ch. *Tehnologia Metallov*. 2020; 7:23-32. DOI: 10.31044/1684-2499-2020-0-7-23-32 (rus.).

16. Verkhov E.Yu., Morozov Yu.A. Analysis and development of technology for manufacturing bent

thick-sheet parts. *Bulletin of Moscow State University, Moscow. Series: Technique and Technology*. 2011; 4:14-19. (rus.).

17. Korgin A., Romanets V., Ermakov V., Zeyd-Kilani L. Experimental and analytical study of an aluminium alloy bridge made of 1915T. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 251:04005. DOI: 10.1051/matec-conf/201825104005

18. Siwowski T. FEM modelling and analysis of a certain aluminium bridge deck panel. *Archives of Civil Engineering*. 2009; 3:347-365.

19. Patton G. Aluminum Orthotropic Deck Research Report. *Archive Florida Departement of Transportation*. 2017; 52.

20. Bilalov D.A., Bayandin Yu.V., Naimark O.B. Numerical modeling of the process of destruction of aluminum alloys under dynamic and fatigue loading. *XXI Winter School of Continuum Mechanics: abstracts of reports*. 2019; 46. (rus.).

Received June 16, 2022.

Adopted in revised form on June 24, 2022.

Approved for publication on June 24, 2022.

B I O N O T E S: **Andrey V. Korgin** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Testing Structures, Head of the Research Laboratory of Engineering Research and Monitoring of Building Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 350779, Scopus: 6506837259, ResearcherID: B-4206-2016, ORCID: 0000-0002-5865-2891; korguine@mgsu.ru.