

РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ANALYSIS AND DESIGN OF BUILDING STRUCTURES

DOI 10.22363/1815-5235-2021-17-3-219-227

УДК 624.21

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH ARTICLE

Теоретические основы расчета мостов на выносливость с использованием кинетической теории долговечности конструкционных материалов

П.М. Саламахин¹, Е.А. Луговцев^{2*}¹Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Российская Федерация, 125319, Москва, Ленинградский пр-кт, д. 64²Военный учебно-научный центр Сухопутных войск «Общевойсковая академия Вооруженных Сил Российской Федерации», Российская Федерация, 119121, Москва, пр-д Девичьего Поля, д. 4

*lugovea@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 17 января 2021 г.

Доработана: 21 марта 2021 г.

Принята к публикации: 30 марта 2021 г.

Для цитирования

Саламахин П.М., Луговцев Е.А. Теоретические основы расчета мостов на выносливость с использованием кинетической теории долговечности конструкционных материалов // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2021. Т. 17. № 3. С. 219–227. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-3-219-227>

Аннотация. Предлагается экономически эффективный способ определения неизвестных параметров зависимости долговечности конструкционных материалов от уровня действующих в них постоянных напряжений и абсолютной их температуры для различных конструкционных материалов с учетом данных, полученных академиком АН СССР С.Н. Журковым. Он не требует длительных испытаний материалов, а основан на использовании результатов кратковременных стандартных машинных разрушений двух групп стандартных образцов материала при двух существенно различных их температурах. При использовании этих параметров и интегрального критерия Бейли суммирования потерь долговечности материалов представляется возможным выполнить расчет на выносливость элементов автодорожных мостовых сооружений из любых конструкционных материалов и определить остаточный ресурс долговечности сооружения при прогнозируемом последующем режиме загрузки его реальными временными вертикальными нагрузками.

Ключевые слова: Серафим Николаевич Журков, теория долговечности материалов, критерий Бейли, суммирование потерь долговечности материалов, расчеты на выносливость материала, остаточный ресурс долговечности

Theoretical foundations for calculating bridges for endurance using the kinetic theory of durability of structural materials

Pavel M. Salamakhin¹, Evgeny A. Lugovtsev^{2*}¹Moscow Automobile and Road State Technical University, 64 Leningradskii Prospekt, Moscow, 125319, Russian Federation²Military Training and Research Center of Land Forces "Combined Arms Academy of the Armed Forces of the Russian Federation", 4 Devich'ego Polya Proezd, Moscow, 119121, Russian Federation

*lugovea@mail.ru

Article history

Received: January 17, 2021

Revised: April 16, 2021

Accepted: April 29, 2021

Abstract. The economically effective method for determining the unknown parameters of the dependence of the durability of structural materials on the level of acting constant stresses in them and their absolute temperature for various structural materials is proposed, taking into account the data established by

Саламахин Павел Михайлович, ведущий научный сотрудник, академик РАТ, доктор технических наук, профессор; Scopus Author ID: 6504210104, eLIBRARY SPIN-код: 2596-3649.

Луговцев Евгений Анатольевич, докторант кафедры дорог, мостов и переправ, кандидат технических наук, доцент; eLIBRARY SPIN-код: 8843-6213.

Pavel M. Salamakhin, leading researcher, member of the Russian Academy of Transport, Doctor of Technical Sciences, Professor; Scopus Author ID: 6504210104, eLIBRARY SPIN-code: 2596-3649.

Evgeny A. Lugovtsev, Doctoral Student of the Department of Roads, Bridges and Crossings, Ph.D., Associate Professor; eLIBRARY SPIN-code: 8843-6213.

© Саламахин П.М., Луговцев Е.А., 2021

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

For citation

Salamakhin P.M., Lugovtsev E.A. Theoretical foundations for calculating bridges for endurance using the kinetic theory of durability of structural materials. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2021;17(3):219–227. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-3-219-227>

Academician of the USSR Academy of Sciences S.N. Zhurkov. It does not require long-term testing of materials, but is based on the use of the results of short-term standard machine failure of two groups of standard samples of materials at two significantly different temperatures. When using these parameters and the Bailey integral criterion for summing up the losses in the durability of materials, it is possible to calculate the endurance of elements of road bridge structures from any structural materials and to determine the residual durability resource of the structure under the predicted subsequent mode of loading it with real temporary vertical loads.

Keywords: Serafim Nikolaevich Zhurkov, theory of material durability, Bailey criterion, summing up the durability losses of materials, calculations for material endurance, residual durability

Введение:**краткая критическая оценка расчетов на выносливость элементов автодорожных мостовых сооружений по действующим отечественным и зарубежным нормам их проектирования**

В настоящее время п. 4.57 действующих в РФ норм проектирования автодорожных мостовых сооружений (СНиП 2.05.03-84*) предусмотрен расчет на выносливость только стальных их элементов и соединений, а п. 3.91–3.92 тех же норм предусмотрен расчет на выносливость только плиты проезжей части автодорожных и городских железобетонных мостов.

При выполнении этих расчетов необходимо вычислять значения коэффициентов асимметрии напряжений, под воздействием которых находятся элементы, рассчитываемые на выносливость использованием формул

$$\rho = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}, \quad \rho = \frac{\tau_{\min}}{\tau_{\max}},$$

где σ_{\max} , σ_{\min} , τ_{\max} , τ_{\min} – наименьшие и наибольшие по абсолютной величине значения напряжений в элементе со своими знаками.

От истинного значения этих коэффициентов зависит адекватность расчета на выносливость. Истинное их значение может быть определено лишь с учетом воздействия реально действующей вертикальной нормативной нагрузки, действующей на мостовое сооружение, что не обеспечивается действующими нормативными вертикальными нагрузками на автодорожные мосты в настоящее время в РФ.

Предлагаемые авторами новые нормативные и расчетные значения вертикальных временных нагрузок типа Н-48 или Н-35 позволяют при проектировании каждого реального мостового сооружения известными и общепринятыми способами определить в любом его элементе реальные значения максимальных и минимальных напряжений, что необходимо для вычисления реального значения коэффициента асимметрии и обеспечения адекватности расчетов элементов на выносливость по методике действующих норм проектирования.

Недостатком действующей методики СНиП 2.05.03-84 является то, что она при расчете на выносливость учитывает воздействие условных нормативных комбинированных нагрузок А14, не имеющих очевидной связи с реально действующими нагрузками, а также влияние только наиболее невыгодных для материала значений коэффициентов асимметрии. Однако общеизвестно, что выносливость материала исчерпывается во всем реальном диапазоне размахов напряжений.

Западноевропейскими нормами предусмотрены расчеты на выносливость элементов мостовых сооружений с использованием диаграмм усталости материала, полученных на основе большого объема экспериментальных исследований зарубежными специалистами. Они применимы для широкого набора деталей и соединений при симметричных циклах загрузки на базе 2 млн циклов загрузки. В них принято, что до 5 млн циклов загрузки кривая усталости описывается кубической зависимостью, а после 5 млн циклов кривой пятой степени.

При известных размахах напряжений, возникающих при прохождении по мостовому сооружению различных транспортных средств, эти нормы обеспечивают возможность на основе линейного закона накопления повреждений вычислить суммарное значения повреждений и тем самым оценить остаточный

ресурс мостового сооружения, исходя из исчерпания возможности материала по восприятию им силовых воздействий без учета влияния на материал температуры окружающей среды.

Следует при этом иметь в виду, что диаграммы усталости были получены при симметричных циклах загрузки и при частотах загрузки в сотни раз превышающих реальные частоты изменения напряжений в элементах мостовых сооружений. Это вызывает сомнения в части адекватности этих диаграмм усталости при расчете выносливости элементов мостовых сооружений.

Теоретические основы метода расчета на выносливость элементов автодорожных мостовых сооружений

Разработка адекватного метода расчета на выносливость элементов автодорожных мостовых сооружений из конструкционных материалов с явно проявляющейся температурно-временной зависимостью прочности требует проведения большого объема экспериментальных исследований, что в современных условиях российской экономики и состояния науки в России, по-видимому, практически невозможно.

Объем экспериментальных исследований можно многократно научно обоснованно уменьшить, если в основу нового метода расчета на выносливость несущих конструкций из материалов с явно проявляющейся температурно-временной зависимостью прочности заложить следующие фундаментальные научные достижения прошлого века:

1) кинетическую теорию долговечности материалов под воздействием на них постоянных во времени напряжений при различных температурах их эксплуатации, разработанную советскими учеными в 50–60 годы прошлого столетия в Физико-техническом институте Академии наук СССР под руководством академика С.Н. Журкова [1–10], а также члена-корреспондента АН СССР Г.М. Бартенева [11–13], с учетом работы автора [14];

2) интегральный критерий Бейли суммирования потерь долговечности материала под воздействием произвольного закона действующих напряжений, экспериментально подтвержденный в работах С.Н. Журкова и его учеников.

Долговечность материала в зависимости от уровня действующего постоянного напряжения σ и абсолютной температуры T среды С.Н. Журковым представлена показательной функцией

$$\tau = \tau_0 e^{\frac{U_0 - \gamma \sigma}{kT}}, \quad (1)$$

где τ – долговечность в принимаемых единицах времени (минутах, часах, сутках) материала, эксплуатируемого при воздействии постоянного напряжения σ в МПа при абсолютной температуре T в кельвинах; τ_0 – единичная долговечность (период межатомных колебаний) материала в тех же единицах времени; $e = 2,7182818284$ – основание натуральных логарифмов; U_0 – энергия активации (межатомных связей) материала в джоулях (ньютон-метрах), заложенная природой в объеме загружаемого стандартного образца из этого материала; T – температура эксплуатации материала в кельвинах; $k = (1,380622 \pm 0,000044) \times 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Стефана Больцмана – физическая постоянная, определяющая связь между энергией материала в джоулях и его температурой в кельвинах; γ – объем активной части стандартного образца материала, подвергаемого стандартному испытанию на растяжение (сжатие), вычисляемый как произведение площади в m^2 его активной части поперечного сечения на длину в м его активной части с постоянным поперечным сечением.

Формула (1) С.Н. Журкова устанавливает связь долговечности (времени его работы до разрушения) любого материала со значениями постоянного напряжения и температуры среды.

Для обеспечения удобства определения параметров этой связи по экспериментальным данным получена обратная зависимость: связь уровня напряжений в материале со временем работы материала до его разрушения, то есть формула для различных температур его эксплуатации:

$$\sigma = \frac{U_0}{\gamma} - \frac{k \times T}{\gamma \times \lg e} (\lg \tau - \lg \tau_0). \quad (2a)$$

Формула получена с использованием логарифмирования соотношения (1) с десятичным основанием и последовательных преобразований. Из (2a) следует, что уровень возможных напряжений σ в материале при фиксированной его температуре находится в линейной зависимости от десятичного логарифма

времени действия напряжения (рис. 1), а угол наклона этой линейной зависимости связан линейно с абсолютной температурой материала.

Эта зависимость может быть построена по двум экспериментально полученным точкам при существенно различной долговечности, что для одной из точек требует много времени (месяцы и даже годы!).

Чтобы уменьшить объем и длительность испытаний заметим вначале, что в формуле (2а) по результатам испытаний материала необходимо определить только значения энергии активации материала и значение единичной долговечности, так как все остальные параметры функции (2а) могут быть известны по результатам обычных машинных стандартных доведений до разрушения двух групп стандартных образцов при двух существенно различных температурах.

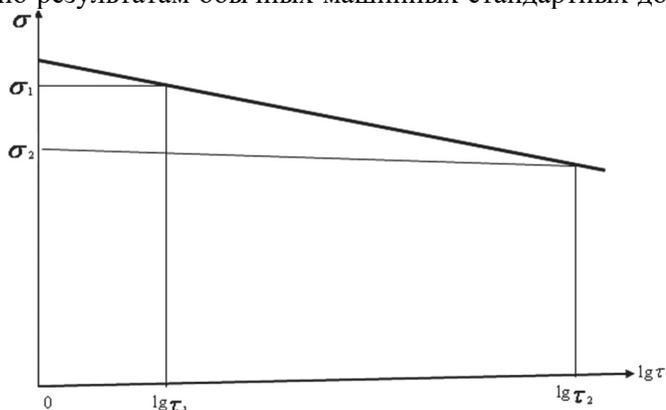


Рис. 1. Диаграмма долговечности материала по С.Н. Журкову
Figure 1. Material durability diagram according to S.N. Zhurkov

разрушение, как площадь графика импульса напряжений в виде прямоугольного треугольника с вертикальным катетом размером σ в МПа и горизонтальным катетом с размером t в секунду, что дает его значение по формуле $IMP_{\sigma} = \sigma_{\max} \cdot t / 2$.

Эквивалентная долговечность t_{ij} в секунду образца при том же, но постоянном, максимальном напряжении может быть определена по условию равенства площадей импульсов напряжений при разных режимах нагружения образца до его разрушения (рис. 2), что дает для нее формулу $\tau_{1j} = t_{1j} / 2$, $\tau_{2j} = t_{2j} / 2$.

Средние значения эквивалентных долговечностей образцов двух групп с учетом известных количеств образцов в каждой группе вычисляются по формулам $\tau_{1cp} = \sum \tau_{1j} / j$, $\tau_{2cp} = \sum \tau_{2j} / j$.

Аналогично вычисляются средние значения разрушающих напряжений образцов обеих групп.

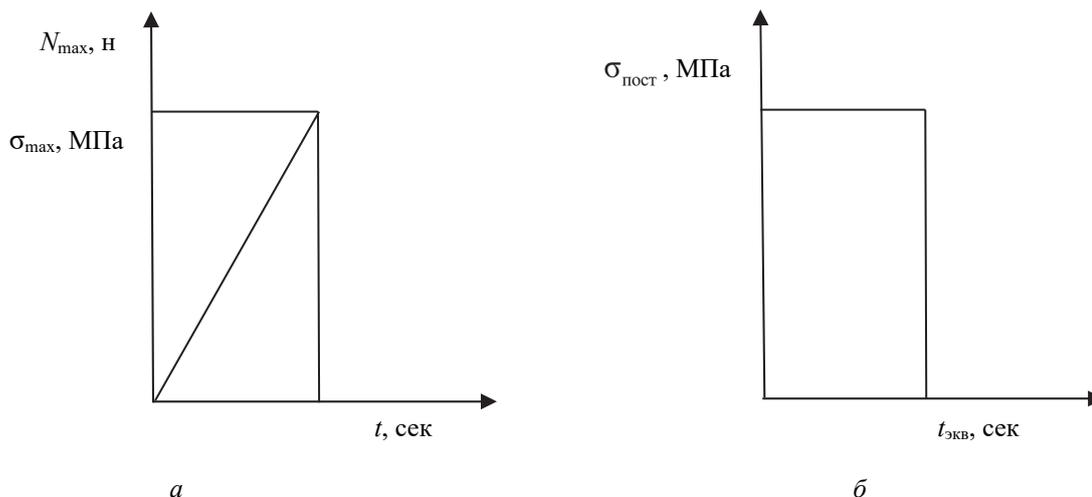


Рис. 2. График к расчету эквивалентной долговечности материала стандартных образцов по результатам испытаний:
a – усилия и напряжения по результату испытаний каждого образца; *b* – эквивалентная долговечность материала стандартного образца
Figure 2. Schedule for calculating the equivalent durability of standard samples according to the test results:
a – efforts and stresses according to the test result of each sample; *b* – equivalent durability of the sample

Таким образом, при стандартных машинных испытаниях двух групп одинаковых образцов материала представляется возможным определить значение напряжения в момент разрушения и эквивалентное время до разрушения материала при двух существенно различных температурах (например 100 и -30 °С) и получить статистически обоснованные их средние значения для каждой из этих групп.

Имея их, можно на основе уравнения (2а) долговечности составить два уравнения с использованием полученных средних значений для обеих групп стандартных образцов:

$$\sigma_{1\text{cp}} = \frac{U_0}{\gamma} - \frac{k \cdot T_1}{\gamma \cdot \lg e} \cdot (\lg \tau_{1\text{cp}} - \lg \tau_0); \quad (26)$$

$$\sigma_{2\text{cp}} = \frac{U_0}{\gamma} - \frac{k \cdot T_2}{\gamma \cdot \lg e} \cdot (\lg \tau_{2\text{cp}} - \lg \tau_0). \quad (2в)$$

При решении этой системы уравнений определены формулы для численных значений энергии активации U_0 материала в джоулях и единичной долговечности материала τ_0 в виде

$$\lg \tau_0 = \frac{\gamma \cdot \lg e \cdot (\sigma_{1\text{cp}} - \sigma_{2\text{cp}}) + k \cdot (T_1 \cdot \lg \tau_{1\text{cp}} - T_2 \cdot \lg \tau_{2\text{cp}})}{k \cdot (T_1 - T_2)}, \quad (3а)$$

$$U_0 = \gamma \left(\sigma_{2\text{cp}} + \frac{k \cdot T_2}{\gamma \cdot \lg e} \cdot (\lg \tau_{2\text{cp}} - \lg \tau_0) \right). \quad (3б)$$

Отметим, что при этом для получения параметров диаграммы долговечности любого материала требуется не более одной недели, а не многие месяцы или даже годы!!!

В качестве теоретической основы для решения рассматриваемой задачи создания метода адекватного расчета автодорожных мостовых сооружений на выносливость примем также положение о непрерывности и необратимости процесса разрушения стандартных образцов материалов, не имеющих надрезов, под воздействием на них разных уровней напряжений, установленное Бейли и подтвержденное фундаментальными исследованиями С.Н. Журкова и его сотрудников.

В [7; 15] С.Н. Журковым с сотрудниками рассмотрены также сложные особенности прогнозирования разрушения материалов, имеющих надрезы. Применительно к автодорожным мостовым сооружениям они не актуальны, так как в зонах элементов этих сооружений с максимально возможными напряжениями не допускается наличие различного рода концентраторов напряжений.

Необратимость и непрерывность процесса разрушения материалов без надрезов С.Н. Журковым была доказана при сравнении результатов двух режимов загрузки: в первом из них производилось загрузку постоянным во времени напряжением σ и определялась долговечность τ (время от начала загрузки до разрушения материала), а во втором проводилось циклическое загрузку импульсами прямоугольной формы с тем же уровнем напряжений длительностью Δt .

При сравнении результатов испытания при этих разных режимах загрузки было установлено (для алюминия и оргстекла), что в пределах разброса общее время разрушения при циклическом действии нагрузки, независимо от длительности импульса, равно долговечности материала, определяемой при статических испытаниях, то есть $\tau = \sum \Delta t$.

Это позволило С.Н. Журкову принять допущение о том, что тело, находящееся под произвольным законом нагружения, непрерывно и необратимо разрушается в соответствии с характером действующего напряжения. Под действием малых напряжений разрушения накапливаются медленно, при высоких напряжениях происходят значительно быстрее. Постепенно процесс накопления разрушений приводит в некоторый момент времени к полному разрушению.

Если напряжение σ действовало в течение момента времени Δt , а общая долговечность при этом напряжении τ , то произойдет относительное уменьшение долговечности на $\Delta t / \tau$.

В течение следующего периода Δt_2 действия той же нагрузки произойдет новое сокращение долговечности на $\Delta t_2 / \tau$.

Полное разрушение наступит тогда, когда сумма относительных уменьшений долговечности станет равной единице, то есть когда

$$\int_0^{t_{\text{calc}}} \frac{dt}{\tau(\sigma(t), T)} = 1. \quad (4)$$

Соотношение (4), полученное из условия необратимости разрушения материала С.Н. Журковым и еще раньше Бейли, позволяет предсказать долговечность материала в конструкции при любом режиме загрузки, если известна зависимость (1), из результатов испытаний.

Представим закон изменения напряжений в наиболее напряженном элементе пролетного строения с пролетом L при прохождении по нему транспортных средств со скоростью v в следующем, вполне реальном, виде

$$\sigma(t) = \sigma_{\min} + \left(\frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \right) \times \left(1 - \cos \frac{2\pi vt}{L} \right), \quad (5)$$

где σ_{\max} – напряжение в элементе пролетного строения от совместного действия собственного веса, общего и местного действия временной нагрузки с общей массой M ; σ_{\min} – напряжение в том же элементе пролетного строения от действия собственного его веса.

Зависимость (5) позволяет моделировать закон изменения напряжений в элементе конструкции в зависимости от длины пролетного строения и скорости движения транспортного средства при известных размерах элементов пролетного строения, общей массы транспортного средства и погонном весе пролетного строения.

Так, при пропуске с одинаковой скоростью по пролетному строению транспортных средств с различными общими массами, вызывающими максимальные напряжения 42, 36, 30 и 24 МПа при напряжении от собственного веса 14 МПа, закон изменения напряжений будет иметь вид, представленный на рис. 3.

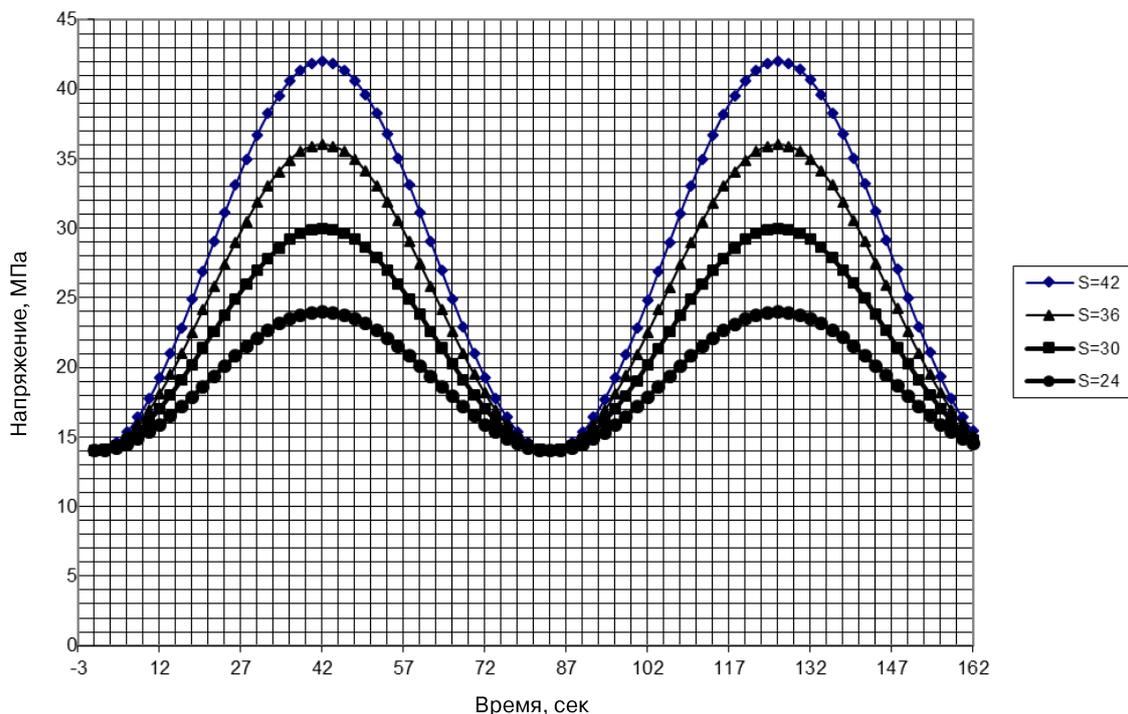


Рис. 3. Изменение напряжений в элементе от транспортных средств с различными общими массами
Figure 3. Change in stresses in the element from vehicles with different total masses

При пропуске по пролетному строению транспортных средств, вызывающими максимальные напряжения 42 МПа при напряжении от собственного веса 14 МПа с разными скоростями, закон изменения напряжений будет иметь вид, представленный на рис. 4.

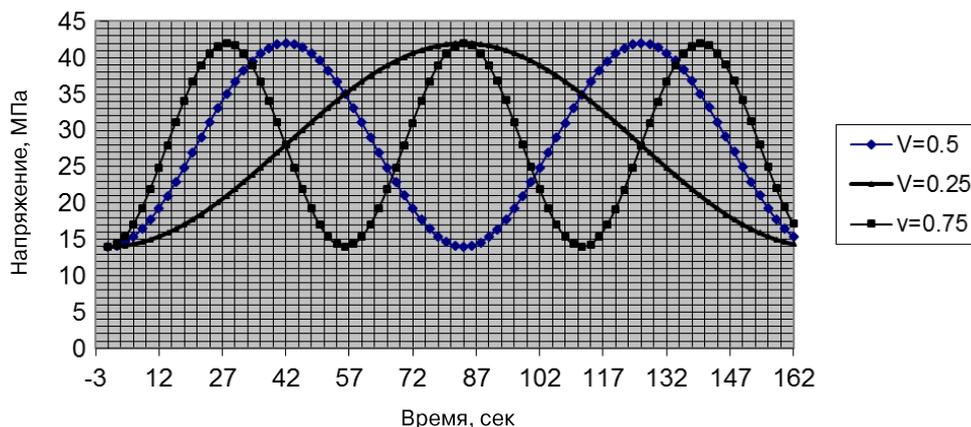


Рис. 4. Зависимость напряжений от скорости движения
Figure 4. Dependence of stresses on the speed of movement

Разные законы напряжений в рассчитываемом элементе на выносливость по-разному влияют на сокращение долговечности материала.

Влияние всех разнообразных факторов на сокращение долговечности материала в конструкции от воздействия режимов нагружения пролетного строения представляется возможным учесть с помощью формулы (1) долговечности материала и интеграла Бейли.

Так, относительное сокращение долговечности материала в конструкции за любой период ее эксплуатации при известных или прогнозируемых режимах ее загрузки в течение этого периода представляется возможным вычислить по формуле с использованием интеграла Бейли:

$$\xi = \sum_{i=1}^n \int_0^{t_{\text{calc}}} \frac{dt}{\tau(\sigma(t), T)}. \quad (6)$$

В этой формуле производится суммирование воздействий транспортных средств различных групп на сокращение долговечности материала в конструкции при возникновении различных законов изменения напряжений.

В случае если по формуле (6) вычислено относительное сокращение долговечности за один год эксплуатации, то при условии, что в последующие годы режим эксплуатации будет аналогичен, представляется возможным вычислить ориентировочный остаточный срок службы мостового сооружения по условию выносливости материала по формуле

$$R_T = \frac{0,9 - \xi}{\xi}. \quad (7)$$

Для реализации изложенной методики требуется проведение ограниченного объема экспериментальных исследований для определения параметров U_0 и τ_0 для применяемых в мостостроении конструкционных материалов.

Заключение

С учетом установленной академиком АН СССР С.Н. Журковым зависимости долговечности конструкционных материалов от уровня действующих в них постоянных напряжений и абсолютной их температуры предложен экономически целесообразный способ определения неизвестных параметров этой зависимости для любых конструкционных материалов. Он не требует длительных испытаний материалов, а основан на использовании результатов кратковременных стандартных машинных разрушений двух групп стандартных образцов материала при двух существенно различных их температурах и использовании системы двух уравнений на основе полученной формулы (2а) для диаграммы долговечности любого конструкционных материала.

Показано, что при использовании результатов испытаний и интегрального критерия Бейли суммирования потерь долговечности материалов представляется возможным выполнить достоверный расчет на выносливость элементов автодорожных мостовых сооружений из любых конструкционных материалов и определить остаточный ресурс долговечности сооружения при прогнозируемом последующем режиме его загрузки реальной временной нагрузкой.

Продемонстрировано, что использование в формуле (1) С.Н. Журкова полученных параметров материала при определении потери долговечности конструкции из этого материала с использованием интеграла Бейли, то есть при расчете на выносливость конструкции, при прогнозируемом воздействии реальных вертикальных нормативных нагрузок и собственного веса пролетного строения представляется возможным вычислить за прошедший срок службы сооружения потерю его долговечности по формуле (6), то есть выполнить строгий расчет на усталость конструкции за прошедший срок эксплуатации.

Если по формуле (6) вычислено относительное сокращение долговечности за один год эксплуатации, возможно вычислить ориентировочный остаточный срок службы мостового сооружения по условию выносливости материала по формуле (7), принимая во внимание, что в последующие годы режим эксплуатации будет аналогичен.

Для реализации предложенной методики расчета элементов мостовых сооружений на выносливость требуется постановка научно-исследовательской работы с целью обоснования параметров диаграммы долговечности материалов под воздействием постоянных напряжений различного уровня.

Список литературы

1. Журков С.Н., Назрулаев В.Н. Временная зависимость прочности твердых тел // Журнал технической физики. 1953. Т. 23. № 10. С. 1677.
2. Журков С.Н., Санфирова Т.П. Температурно-временная зависимость прочности чистых металлов // Доклады Академии наук СССР. 1955. Т. 101. С. 237.
3. Журков С.Н., Аббасов С.А. Температурная и временная зависимость прочности полимерных волокон // Высокомолекулярные соединения. 1961. № 3. С. 441–449.
4. Журков С.Н. Некоторые проблемы прочности твердого тела: сборник статей, посвященных восьмидесятилетию акад. АН УССР Н.Н. Давиденкова. М.: Изд-во АН СССР, 1959. С. 68.
5. Бехетин В.М., Журков С.Н. Временная и температурная зависимость прочности твердых тел // Проблемы прочности. 1971. № 2. С. 39.
6. Журков С.Н. Дилатонный механизм прочности твердых тел // Физика твердого тела. 1983. Т. 25. № 10. С. 3119.
7. Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А. Принципы кинетического подхода к прогнозированию разрушения // Теоретическая и прикладная механика разрушения. 1984. Т. 1. № 3. С. 271.
8. Журков С.Н. Кинетическая концепция прочности твердых тел // Международный журнал переломов. 1984. Т. 26. № 4. С. 295.
9. Zhurkov S.N., Abasov S.A. The temperature and the time dependence of the strength of polymer yarns // Polymer science. Series A. 1999. Vol. 41. No. 12. Pp. 1276–1282.
10. Zhurkov S.N., Eronko S.B., Chmel A. Temperature-time dependence of the radiation resistance of transparent solids // Soviet Physics, Solid State. 1980. Vol. 22. No. 10. P. 1776.
11. Бартенев Г.М. Временная и температурная зависимость прочности твердых тел // Известия АН СССР. ОТН. 1955. Т. 9. С. 53.
12. Бартенев Г.М., Брюханова Л.С. Влияние межмолекулярного взаимодействия, поперечного сшивания и температуры на разрушение и временную зависимость прочности каучукоподобных полимеров // Журнал технической физики. 1958. Т. 28. № 2. С. 287.
13. Панишин Б.И., Бартенев Г.М., Финогонов Г.Н. Прочность пластмасс при повторных нагрузках // Пластические массы. 1960. № 11. С. 47.
14. Саламахин П.М. Временная зависимость несущей способности конструкций из стеклопластиков при разных режимах загрузки // Информационный выпуск трудов ВИКА имени В.В. Куйбышева. 1962. № 3. С. 1–32.
15. Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А. Физические основы прогнозирования механического разрушения // Доклады Академии наук СССР. 1981. Т. 259. № 6. С. 1350

References

1. Zhurkov S.N., Narzullaev B.N. Time dependence of the strength of solids. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 1953;23(10):1677. (In Russ.)
2. Zhurkov S.N., Sanfirova T.P. Temperature-time dependence of the strength of pure metals. *Doklady Akademii Nauk*. 1955;101(2):237. (In Russ.)

3. Zhurkov S.N., Abbasov S.A. Temperature and time dependence of the strength of polymer fibers. *High-Molecular Compounds*. 1961;(3):441–449. (In Russ.)
4. Zhurkov S.N. *Some problems of solid strength: Collection of articles dedicated to the eightieth anniversary of Academician of the Academy of Sciences of the USSR N.N. Davidenkov*. Moscow: Academy of Sciences of the USSR Publ.; 1959. p. 68. (In Russ.)
5. Bekhtin V.M., Zhurkov S.N. Time and temperature dependence of the strength of solids. *Strength Problems*. 1971;(2):39. (In Russ.)
6. Zhurkov S.N. Dilaton mechanism of strength of solid bodies. *Physics of a Solid Body*. 1983;25(10):3119. (In Russ.)
7. Zhurkov S.N., Kuksenko V.S., Petrov V.A. Principles of the kinetic approach to the prediction of destruction. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 1984;1(3):271. (In Russ.)
8. Zhurkov S.N. Kinetic concept of the strength of solid bodies. *International Journal of Fractures*. 1984;26(4):295. (In Russ.)
9. Zhurkov S.N., Abbasov S.A. The temperature and the time dependence of the strength of polymer yarns. *Polymer Science. Series A*. 1999;41(12):1276–1282.
10. Zhurkov S.N., Eronko S.B., Chmel A. Temperature-time dependence of the radiation resistance of transparent solids. *Soviet Physics, Solid State*. 1980;22(10):1776.
11. Bartenev G.M. The time and temperature relationship of the strength of solids. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Otdelenie Tekhnicheskikh Nauk*. 1955;9:53. (In Russ.)
12. Bartenev G.M., Bryukhanova L.S. Effect of intermolecular interaction, cross-linking, and temperature on the fracture and time dependence of the strength of rubber-like polymers. *Zhurnal Tekhnicheskoy Fiziki*. 1958(2):287. (In Russ.)
13. Panshin B.I., Bartenev G.M., Finogenov G.N. The strength of plastics under repeated loads. *Plasticheskie Massy*. 1960;(11):47. (In Russ.)
14. Salamakhin P.M. Time dependence of the load-bearing capacity of fiberglass structures under different loading modes. *Informational Issue of the Proceedings of the Kuibyshev Military Engineering Red Banner Academy*. 1962;(3):1–32. (In Russ.)
15. Zhurkov S.N., Kuksenko V.S., Petrov V.A. Physical bases of prediction of mechanical failure. *Doklady Akademii Nauk*. 1981;259(6):1350. (In Russ.)