

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2021, №2, Том 8 / 2021, N 2, Vol. 8 <https://t-s.today/issue-2-2021.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/10SATS221.pdf>

DOI: 10.15862/10SATS221 (<https://doi.org/10.15862/10SATS221>)

Комплексный анализ существующих методик проверки выносливости гибких штыревых упоров сталежелезобетонных автодорожных мостов по нормативам ряда стран

Козак Н.В.

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»,
Санкт-Петербург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Козак Николай Викторович, e-mail: kozak.spbgasu@gmail.com

Аннотация. В статье автором рассмотрены вопросы проверки выносливости элементов объединения сталежелезобетонных пролетных строений мостов, в частности, гибких штыревых упоров («анкеров Нельсона»). Согласно существующей отечественной нормативной базе, проверка выносливости гибких штыревых упоров для автодорожных мостов не требуется; в то же время, результаты обследований эксплуатируемых пролетных строений свидетельствует о наличии проблем, связанных с недостаточной выносливостью данных элементов. В статье приведены результаты комплексного (качественного и количественного) сравнительного анализа существующих в мире подходов к проверке выносливости элементов объединения. На этапе качественного анализа автором рассмотрены способы проверки выносливости элементов в целом по нормам 8 стран и регионов (Россия, Евросоюз, США, Украина, Австралия, Канада, Япония, Китай) и выделен базовый набор методик для проверки выносливости элементов объединения (Россия, Евросоюз, США, Украина). Модели базового набора были подвергнуты детальному качественному анализу по критериям

используемых моделей и входящих в них параметров. Количественный анализ выбранных методик базового набора, проведённый применительно к существующему мосту, включил в себя анализ воздействий подвижных нагрузок на элементы объединения, прямую проверку элементов по рассматриваемым методикам, а также сравнение проектных повреждений элементов, полученных по гипотезе линейного суммирования Пальмгрена-Майнера. Базируясь на полученных значениях проектных повреждений, были определены и проанализированы значения использования резервов выносливости для каждой из рассмотренных методик и условной модели нагрузки. Опираясь на результаты проведённого качественного и количественного анализа, автором сделаны выводы по итогам сравнения различных методик и выделены рациональные направления путей совершенствования существующей отечественной методики.

Ключевые слова: мост; сталежелезобетон; гибкий штыревой упор; элемент объединения; упор; динамика; долговечность; выносливость; усталость; ресурс

Comprehensive analysis of existing endurance testing methods of flexible dowel crutches of composite reinforced concrete road bridges according to the standards of a number of countries

Nikolai V. Kozak

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia

Corresponding author: Nikolai V. Kozak, e-mail: kozak.spbgasu@gmail.com

Abstract. In the article, the author considers the verification issue of the endurance of the venture elements of steel-reinforced concrete spans of bridges, in particular, flexible dowel crutches ("Nelson's anchors"). According to the existing domestic regulatory framework, the endurance test of the flexible dowel crutches for road bridges is not required; at the same time, the survey's results of the operated superstructures indicate the presence of problems associated with the insufficient endurance of these elements. The article presents comprehensive (qualitative and quantitative) comparative analysis results of the world's existing approaches to testing the endurance of the venture elements. At the stage of qualitative analysis, the author considered methods of checking the endurance of elements in general according to the norms of 8 countries and regions (Russia, the European Union, the USA, Ukraine, Australia, Canada, Japan, China) and highlighted a basic set of methods for checking the endurance of the venture elements (Russia, the European Union, USA, Ukraine). The models of the basic set were subjected to

a detailed qualitative analysis according to the criteria of the models used and the parameters included in them. The quantitative analysis of the selected basic set techniques, carried out in relation to the existing bridge, included an analysis of the effects of moving loads on the venture elements, direct elements verification using the considered methods, as well as the design damage comparison of the elements obtained by the Palmgren-Miner linear summation hypothesis. Based on the obtained values of design damage, the values of the use of endurance reserves were determined and analyzed for each of the considered methods and the conditional load model. Based on the results of the qualitative and quantitative analysis, the author draws conclusions based on the comparison of various methods and highlights the rational directions for improving the existing domestic methodology.

Keywords: bridge; composite reinforced concrete; flexible dowel crutch; venture element; crutch; dynamics; durability; endurance; fatigue; resource

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons "Attribution" («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons "Attribution" 4.0 Global License



Введение

Introduction

Одной из важнейших отличительных особенностей условий работы мостовых конструкций является нестационарный динамический характер их режима нагружения. Транспортные нагрузки перемещаются вдоль моста с определенной и не всегда постоянной скоростью, распределение транспорта в поперечном направлении характеризуется в том числе случайными величинами, а возможные неровности покрытия значительно увеличивают динамическую составляющую воздействия нагрузки. В подобных режимах эксплуатации, включающих большое количество циклов изменения усилий и напряжений в элементах, значительная роль отводится выносливости конструкций [1; 2].

Применительно к конструкциям сталежелезобетонных пролетных строений (далее — СТЖБ ПС), получивших значительное распространение в настоящее время, одним из наиболее неизученных остается вопрос выносливости элементов объединения (далее — ЭО) стальной части и железобетонной плиты. В данном исследовании рассмотрен наиболее распространённый на сегодняшний день в мире вид элементов объединения — гибкие штыревые упоры (англ. stud shear connectors), также известные в нашей стране как «анкеры Нельсона» [3].

Как показывает многолетний опыт обследования существующих мостовых сооружений (например, мосты через реку Сясь, Волхов), после 10–15 лет эксплуатации у сталежелезобетонных пролётных строений наблюдаются провисания на величины до 12 мм, что свидетельствует о снижении жесткости конструкций. Одной из основных гипотез причин снижения жёсткости выступает идея о нарушении работы элементов объединения вследствие усталостных разрушений, вызванных циклическими нагрузками [4]. Косвенным подтверждением актуальности данной гипотезы выступает тот факт, что по современной отечественной нормативной базе проектирования для автодорожных мостов расчет гибких штыревых элементов объединения на выносливость не требуется в принципе, а регламентируется лишь общая проверка прочности [5]. С учетом того, что элементы объединения даже при расчете конструкции в квазистатической постановке подвергаются значительным циклическим нагрузкам [6], оправданность нормативного отказа от проектной проверки выносливости элементов объединения неочевидна.

В данной работе, проводимой в рамках диссертационного исследования автора, были качественно и количественно проанализированы существующие в мире методики проверки выносливости элементов объединения сталежелезобетонных пролетных строений. Для достижения цели были выделены следующие задачи:

1. Общий обзор существующих методик проверки выносливости элементов конструкций с выделением базового набора методик для элементов объединения.
2. Качественный анализ базового набора методик проверки выносливости элементов объединения.
3. Количественный анализ результатов проверки выносливости элементов объединения пролетного строения существующего моста по методикам базового набора.

Обзор существующих методик проверки выносливости

Review of existing methods for testing endurance

Значительная работа по обзору и систематизации существующих методик проверки выносливости была проведена Корнеевым М.М. [7]. Вместе с тем, необходимо отметить, что в проведенных исследованиях рассматривались, в первую очередь, общие методики проверки выносливости. При этом возможные особенности методик проверки выносливости конкретно ЭО во внимание не принимались. Для выявления данных особенностей в рамках текущей работы был проведен двухэтапный обзор методик с последующим анализом результатов.

На первом этапе обзора были проанализированы 8 нормативных документов различных стран и регионов. Анализ проводился по следующим критериям:

- Основная модель (ОМ) проверки выносливости элемента (модель «А» — проверка через понижение расчетного сопротивления; модель «Б» — проверка через сопоставление проектных размахов напряжений с табличными порогами допустимых размахов).
- Регламентация необходимости проверки выносливости ЭО.
- Наличие отличий в модели проверки выносливости ЭО от используемой общей модели проверки.
- Результаты анализа приведены в таблице 1.

Как видно из результатов анализа, нормативные базы подавляющего большинства стран и регионов предлагают к использованию модель проверки, основанную на сравнении размахов напряжений (модель «Б»). Кроме того, во всех указанных методиках регламентируется необходимость проверки выносливости упоров.

Таблица 1 / Table 1

**Сравнительный анализ методик
проверки выносливости по нормативам ряда стран**
**Comparative analysis of methods for testing
endurance according to the standards of a number of countries**

№	Страна / Регион Country / Region	Название документа (документов) Name of the document(s)	ОМ Base model	Формула проверки (ОМ) Verification formula (Base model)	Проверка ЭО Examination Venture element	Отличие модели для ЭО The difference between the model for Venture element
1	Россия Russia	СП 35.13330-2011	А	$\sigma_{\max,ef} \leq \gamma_w \cdot R_y \cdot m$	нет no	-
2	Евросоюз European Union	EN 1994-2 (2005), EN 1993-1-9 (2006)	Б	$\gamma_{Ef} \cdot \Delta\sigma_{E,2} \leq \Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}$	да yes	нет no
3	США USA	AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (2017)	Б	$\gamma \cdot (\Delta f) \leq (\Delta F)_n$	да yes	да yes
4	Украина Ukraine	ДБН В.2.3-26:2010	Б	$\Delta\sigma \leq \Delta\sigma_{R,n} / (\gamma_{Mf} \cdot \gamma_r)$	да yes	нет no
5	Австралия Australia	AS(NZS) 5100	Б	$\gamma_F \cdot \Delta\sigma_{s,k} \leq \Delta\sigma_{R,k} / \gamma_M$	да yes	нет no
6	Канада Canada	CAN/CSA-S6-14	Б	$k \cdot C_L \cdot f_{sr} \leq F_{sr}$	да yes	да yes
7	Япония Japan	JAH-SSHB	Б	$\Delta\sigma_{\max} \leq \Delta\sigma_{ce} \cdot C_R \cdot C_t$	да yes	да yes
8	Китай China	CNS	Б	$\gamma_{Ef} \cdot \Delta\sigma_{E2} \leq k \cdot \Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}$	да yes	нет no

Составлено автором / Compiled by the author

Однако, если в большинстве методик, содержащих в основе модель Еврокода (ЕС, Украина, Китай), для проверки упоров используется формула общей модели с корректировкой отдельных параметров, то в близких между собой методиках США и Канады отдельно для упоров предлагается совершенно иная модель проверки. В Японии общая модель проверки аналогична Еврокоду, однако для проверки упоров предлагается сложная эмпирическая формула, учитывающая, в том числе, податливость упоров [8].

С учетом указанного, для дальнейшего качественного и количественного анализа был определен следующий набор базовых методик:

1. Методика СП 35.13330-2011 (Российская Федерация);
2. Методика Еврокодов (EN 1994-2 (2005) и EN 1993-1-9 (2006));
3. Методика AASHTO LRFD Bridge (США);
4. Методика ДБН В.2.3-26:2010 (Украина).

Украинская методика ДБН В.2.3-26:2010 была включена в набор как пример адаптации модели Еврокода в нормативную систему, схожую по структуре с отечественной. Еще одним аргументом к рассмотрению данной

методики проверки выносливости является используемая нагрузка А15, наиболее приближенная к применяемой в отечественных нормах. Японские нормы, несмотря на их оригинальную модель, включены в набор не были ввиду ограниченности имеющейся информации по деталям их применения.

Качественный анализ методик проверки выносливости гибких штыревых упоров СТЖБ ПС

Qualitative analysis of methods for testing the endurance of flexible dowel crutch composite reinforced concrete decking

Для проведения качественного анализа методик были рассмотрены их ключевые особенности, а затем проведен сравнительный анализ по ряду критериев.

Модель Eurocode (Евросоюз)

Модель для проверки выносливости ЭО, используемая в Еврокодах, основывается на общей модели проверки выносливости и заключается в сравнении эквивалентных размахов напряжений от проектной нагрузки с табличными значениями порогов величин размахов для конкретной детали:

$$\gamma_{Ef} \cdot \Delta\tau_{E,2} \leq \Delta\tau_c / \gamma_{Mf}, \text{ при этом } \Delta\tau \leq 1,5R_y / \sqrt{3}$$

где $\Delta\tau_{E,2}$ — эквивалентный размах касательных напряжений от проектной нагрузки; $\Delta\tau_c = 90 \text{ МПа}$ — табличный порог выносливости для гибких штыревых упоров; γ_{Ef} — коэффициент надежности по нагрузке; γ_{Mf} — коэффициент ответственности элемента конструкции. Переход от проектного размаха напряжений к эквивалентному $\Delta\tau_{E,2} = \lambda \cdot \Delta\tau$ производится путем введения специального коэффициента $\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4 \leq \lambda_{\max}$, учитывающего такие особенности режима эксплуатации мостового сооружения, как проектный срок службы, интенсивность движения и состав транспортного потока, длина загрузки линий влияния и т. д. Для проверки выносливости конкретно элементов объединения вносятся следующие корректировки:

Коэффициент λ_2 принимается по умолчанию равным $\lambda_2 = 1,55$ вне зависимости от характеристик транспортного потока.

Для учета проектного числа циклов используется кривая усталости в виде неограниченной прямой с наклоном $m = 8$ (схемы кривых усталости приведены на рисунке 1).

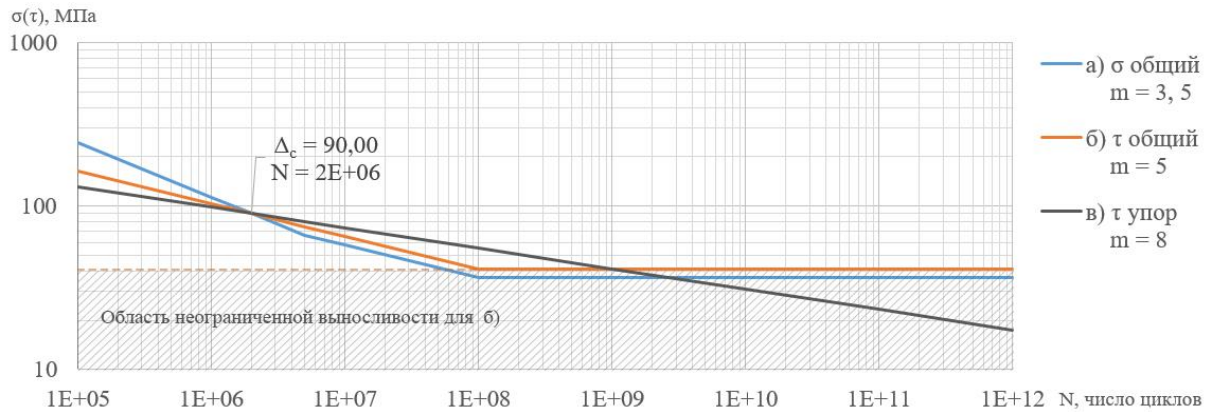


Рисунок 1. Кривые усталости по EN в логарифмических координатах:
 а) Общий случай, для проверки нормальных напряжений; б) Общий случай, для проверки касательных напряжений; в) Для проверки касательных напряжений в гибких штыревых упорах (разработан автором)

Figure 1. Fatigue curves according to EN in logarithmic coordinates: a) General case, for checking normal stresses; b) General case, for checking direct stresses; c) For checking direct stresses in flexible dowel crutch (developed by the author)

Модель ДБН В.2.3-26:2010 (Украина)

Используемая современная методика украинских норм основывается на модели Еврокода, в целом повторяет ее структуру и использует те же таблицы и кривые усталости:

$$\Delta\tau \leq \Delta\tau_{R,n} / (\gamma_{fM} \cdot \gamma_r), \text{ при этом } \Delta\tau \leq 1,5R_y / \sqrt{3}$$

где $\Delta\tau$ — размах напряжений от проектной нагрузки; $\Delta\tau_{R,n}$ — порог выносливости элемента в зависимости от числа циклов N ; γ_{fM} и γ_r — коэффициенты надёжности и ответственности соответственно. Вычисление порога выносливости для заданного числа циклов производится для гибких штыревых упоров с использованием кривой с наклоном $m = 8$ аналогично Еврокоду:

$$\Delta\tau_{R,n} = \Delta\tau \cdot 1 / (\sqrt[8]{N / 2 \cdot 10^6}) = \Delta\tau \cdot k_N$$

Таким образом, в структуре формулы основное отличие заключается в расположении коэффициента учета фактического режима загрузки k_N в правой части, а не в левой, как коэффициент λ в Еврокоде. Необходимо отметить и меньшую параметризацию данного коэффициента, включающего в себя только величину числа циклов, но не учитывающего весовой состав транспортного потока.

Модель AASHTO LRFD (США)

В нормативной базе США проверка выносливости гибких штыревых упоров выделена отдельно от общей модели проверки выносливости элементов. Данная модель была получена в исследованиях американского

ученого Фишера еще в 1966 году [9] и с тех пор сохранилась практически без изменений (необходимо отметить, что именно на результатах данного исследования основываются используемые в отечественных нормах модели проверок прочности гибких штыревых упоров [10]). Для проверки выносливости предлагается следующая формула для погонного сдвигового усилия: $t \leq T_{\text{вын}} \cdot n / a$; она же для сдвигающей силы на 1 упор:

$$T \leq T_{\text{вын}}$$

где T — проектная сдвигающая сила на 1 упор от воздействия временной подвижной нагрузки; $T_{\text{вын}}$ — предельная сдвигающая сила по условию выносливости, определяемая как:

$$T_{\text{вын}}^{[kipf]} = \begin{cases} 5,5 \cdot d^{2[in]}, I > 960ed / \text{сум}, \gamma = 1.50 \rightarrow \text{Fatigue I} \\ (34,5 - 4.28 \cdot \log N) \cdot d^{2[in]}, I < 960ed / \text{сум}, \gamma = 0.75 \rightarrow \text{Fatigue II} \end{cases}$$

где N — проектное число циклов; d — диаметр упора (в формуле использованы величины в американской системе единиц); I — интенсивность движения. Как видно, в зависимости от проектной интенсивности движения расчет производится или на неограниченную выносливость для бесконечного числа циклов (Fatigue I) с пониженным коэффициентом для проектной нагрузки, или на ограниченную выносливость на заданное число циклов (Fatigue II) с повышающим коэффициентом.

Модель СП 35.13330-2011 (РФ)

Как уже отмечалось выше, в отечественных нормах проверка выносливости гибких штыревых упоров не регламентируется; однако для возможности проведения дальнейшего количественного сравнительного анализа были рассмотрены основы используемой в нормах модели.

Проверка выносливости элемента сводится к сопоставлению максимальных возникающих напряжений с пониженным за счет коэффициента γ_w расчетным сопротивлением материала элемента:

$$\tau_{\text{max,ef}} \leq 0,75 \cdot \gamma_w \cdot R_y \cdot m$$

где $\tau_{\text{max,ef}}$ — максимальное касательное напряжение, МПа; R_y — расчетное сопротивление материала, МПа; m — коэффициент условий работы; $\gamma_w \leq 1$ — понижающий коэффициент, вычисляемый по формуле:

$$\gamma_w = \frac{1}{\zeta \cdot \varrho \cdot [(\alpha \cdot \beta + \delta) - (\alpha \cdot \beta - \delta) \cdot \rho]} \leq 1,$$

где ρ — коэффициент асимметрии цикла; β — коэффициент концентрации напряжений; ϑ — коэффициент для учета длины линии влияния; α и δ — «коэффициенты учитывающие марку стали и нестационарность режима нагруженности» (дословно из нормативного документа); $\zeta = 0,7$ — понижающий коэффициент для автодорожных мостов, регулярно подвергаемый критике в отечественной научной среде за необоснованность [1; 2; 4; 5].

Для применения данной модели вне рамок, определенных нормативами, важно понимать действительную роль коэффициентов $\alpha \cdot \beta$ и δ с количественной точки зрения. В основе коэффициента α находится отношение расчетного сопротивления к пределу выносливости элемента при симметричном цикле нагружений $\alpha = R_y / \sigma_{-1} \cdot 0,5 \cdot [k_2 / \xi_2]$, где в скобках — корректирующие коэффициенты: k_2 — величина рассеяния лабораторных данных; ξ_2 — коэффициент режима; таким образом, коэффициент α прямо пропорционально понижает предел выносливости. Коэффициент $\delta = R_y / \sigma_s \cdot 0,5 \cdot [k_2]$ появился в формуле в результате перевода первоначальной модели, основанной на пределе текучести σ_s к модели, основанной на расчетном сопротивлении R_y [11]. Следовательно, более наглядно понижающий коэффициент можно представить как:

$$\gamma_w = \frac{1}{[(A+B) - (A-B) \cdot \rho]} \cdot \left[\frac{1}{\zeta \cdot \vartheta} \right] \leq 1$$

где $A = \alpha \cdot \beta$ — параметр, определяющий предел выносливости элемента при симметричном нагружении; $B = \delta$ — параметр, определяющий свойства материала.

Как видно, отечественная методика не предполагает возможностей учета различного проектного числа циклов; согласно [12] нормативные коэффициенты α и β были определены при 2 млн циклов.

Качественный сравнительный анализ методик проверки выносливости гибких штыревых упоров

Описанные выше методики были проанализированы с точки зрения входящих в них параметров. Качественный анализ выбранных методик проводился по следующим критериям (дополнительно к указанным в таблице 1):

1. Методика основана на экспериментальном пределе выносливости для симметричного цикла.
2. Учитываются свойства материал элемента.

3. Учитывается среднее напряжение в элементе (напряжения от постоянных нагрузок).
4. Учет особенностей расположения элемента, в т. ч.:
 - 4.1. учитывается длина загрузки линии влияния элемента;
 - 4.2. для элементов вблизи деформационных швов вводится повышающий динамический коэффициент.
5. Используются нагрузки, отличные от используемых при расчете на прочность.
6. Учитываются детали проектного режима загрузки, в т. ч.:
 - 6.1. учитывается проектный срок эксплуатации сооружения;
 - 6.2. учитывается проектная интенсивность движения;
 - 6.3. учитывается весовой состав транспортного потока.
7. Учитываются детали режима эксплуатации, в т. ч.:
 - 7.1. учитывают особенности общего режима эксплуатации;
 - 7.2. учитывают возможность обслуживания элементов (ремонт повреждений).

Результаты анализа приведены в таблице 2:

Таблица 2 / Table 2

Качественный сравнительный анализ методик проверки выносливости гибких штыревых упоров на примере нормативных документов РФ, Евросоюза, США и Украины

Qualitative comparative analysis of methods for testing the endurance of flexible dowel crutch on the example of regulatory documents of the Russian Federation, the European Union, the USA, and Ukraine

Модель Model	Формула Formula	Проверка ЭО Examination Venture element	Отличие модели проверки ЭО The difference between the Venture element verification model	Критерии Criteria											
				1	2	3	4.1	4.2	5	6.1	6.2	6.3	7.1	7.2	
СП	$\tau_{\max,ef} \leq 0,75 \cdot \gamma_w \cdot R_y \cdot m$	нет no	-	да yes	да yes	да yes	да yes	нет no	нет no	нет no	нет no	нет no	да yes	нет no	
EN	$\gamma_{Ef} \cdot \Delta\tau_{E,2} \leq \Delta\tau_C / \gamma_{Mf}$	да yes	нет no	да yes	нет no	нет no	да yes	да yes	да yes	да yes	да yes	да yes	да yes	нет no	да yes
AASHTO	$T \leq T_{вын}$	да yes	да yes	да yes	нет no	нет no	нет no	нет no	нет no	да yes	да yes	да yes	нет no	нет no	нет no
ДБН	$\Delta\tau \leq \Delta\tau_{r,N} / (\gamma_{fM} \cdot \gamma_r)$	да yes	нет no	да yes	нет no	нет no	нет no	нет no	нет no	да yes	да yes	да yes	нет no	нет no	да yes

Составлено автором / Compiled by the author

Результаты качественного анализа подтверждают наличие значительных различий в методиках, используемых в России и за рубежом; при этом ключевые отличия заключаются даже не столько в модели применяемой проверки (в США для проверки выносливости упоров также используются не размахи, а максимальные величины), сколько в подходах к регулированию используемой модели путем корректировки входящих параметров.

В отечественной методике к входным параметрам проверки на выносливость относятся предел выносливости элемента при симметричном цикле ($N = 2 \times 10^6$), уточняющие данные по характеристикам отдельного цикла (коэффициент асимметрии) и корректирующий коэффициент, зависящий от длины загрузки линия влияния.

В зарубежных методиках в целом набор регулирующих параметров стандартен и не сильно отличается у методик с разными моделями проверок. В рассмотренных моделях, в отличие от отечественной, характеристики отдельного цикла в расчет не берутся и учет среднего напряжения, таким образом, не производится; непосредственное влияние материала элемента также исключено, предел выносливости при симметричном цикле определяется готовым табличным значением для конкретных элементов. Наиболее важными входными параметрами во всех моделях выступают данные о проектном числе циклов нагружения, рассчитываемых исходя из планируемой интенсивности движения. Самым большим спектром настраиваемых входных данных обладает методика Еврокода, среди дополнительных и важных параметров которой необходимо выделить следующие:

1. Возможность уточненного учета планируемого транспортного потока путем использования данных не только о количестве транспортных средств, но и о их весе.
2. Для участков вблизи деформационных швов для всех элементов конструкций при проверке выносливости может быть применен повышенный динамический коэффициент $1 + \mu = 1,25$.
3. Риски, связанные с невозможностью обслуживания скрытых в плите проезжей части элементов объединения, учитываются введением специальных повышающих коэффициентов ответственности.

По итогам качественного анализа наиболее детальной и подробной представляется методика Еврокода; в то же время, использование большого количества входных данных и многокомпонентного λ -коэффициента для перехода к эквивалентным напряжениям повышает трудоемкость проведения инженерных расчетов. Украинская методика, таким образом, представляет собой «упрощенную» европейскую модель с заменой

λ -коэффициента на простую коррекцию предельного размаха с использованием кривой усталости. В свою очередь, американская модель, основанная на эмпирической формуле, может быть рассмотрена как самая простая из выделенных, с проектным числом циклов в качестве единственного входного параметра.

Количественный анализ методик проверки выносливости гибких штыревых упоров СТЖБ ПС

Quantitative analysis of methods for testing the endurance of flexible pin stops composite reinforced concrete decking

Методика проведения количественного анализа

Количественный анализ методик проверки выносливости гибких штыревых упоров проводился по следующему алгоритму:

1. Определение объекта, применительно к конструкциям которого будет произведён анализ и его проектного режима эксплуатации.
2. Анализ воздействия подвижных нагрузок на штыревые упоры с получением диаграмм нагружения.
3. Проверки выносливости по 4 методикам базового набора для 3 различных режимов эксплуатации: 2 млн циклов (базовый режим); проектное число циклов; неограниченная выносливость или эквивалент в 100 млн циклов (определение согласно Еврокоду).
4. Определение фактических повреждений элементов для соответствующих режимов на основании гипотезы Пальмгрена-Майнера.

Определение объекта и проектного режима эксплуатации

Количественный анализ выбранных методик был проведён применительно к конструкциям существующего и находящегося на момент публикации статьи в стадии капитального ремонта автодорожного СТЖБ моста через реку Вуокса в Ленинградской области. Основные геометрические параметры объекта приведены на рисунке 2.

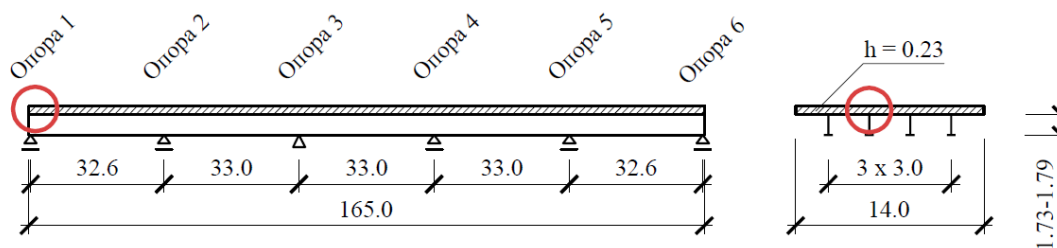


Рисунок 2. Основные геометрические параметры объекта (разработан автором)

Figure 2. Basic geometric parameters of the object (developed by the author)

Проверка проводилась для группы гибких штыревых упоров 2 ряда (всего 3 шт.), расположенных над опорой № 1 на балке В2 (обозначены на рисунке 3).

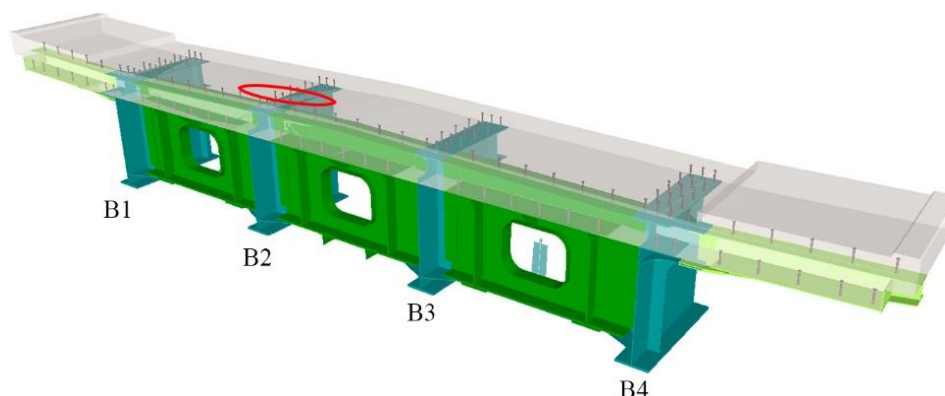


Рисунок 3. Общий вид надопорной часть конструкции ПС; красным обозначены упоры 2 ряда на балке В2 (разработан автором)

Figure 3. General view of the superstructure of the decking; the crutches of the 2nd row on beam B2 are marked in red (developed by the author)

Таблица 3 / Table 3

Параметры режима эксплуатации объекта

Object operation mode parameters

№	Параметр Parameter	Значение Meaning
1	Проектный срок службы моста, лет Bridge design life, years	100
2	Проектное кол-во полос движения для тяжелых ТС (Slow Lanes), шт.* Designed number of lanes for heavy vehicles (Slow Lanes), pcs*	1
3	Интенсивность движения тяжелых ТС, ед./сутки Traffic intensity of heavy vehicles, units/day	1081
4	Последствия разрушения детали (Consequence of failure)* Consequence of failure*	Невысокие Low
5	Допускаемость повреждений (возможность ремонта)* Damage tolerant or Safe Life*	Нет None
6	Средний вес тяжелых ТС, кН The average weight of heavy vehicles, kN	400

*Примечание: Параметры, помеченные *, в отечественной нормативной базе не определяются и приняты по фактической ситуации для исследуемого объекта. Составлено автором*

*Note: The parameters marked with * are not determined in the domestic regulatory framework and are adopted according to the actual situation for the object under study. Compiled by the author*

Для определения режима эксплуатации объекта были использованы значения параметров, указанных в таблице 3. Интенсивность движения тяжелых транспортных средств (ТС) (более 12 тонн) определена по данным изысканий с учетом перспективы в 30 лет. Общее число циклов на проектный срок эксплуатации, таким образом, составило $N = 100 \cdot 365 \cdot 1081 = 39456500 \approx 4E + 7$ циклов.

Анализ воздействия подвижных нагрузок

Для получения данных о режиме нагруженности контролируемой детали, т. е. группы гибких штыревых упоров 2 ряда, был проведен конечно-элементный (КЭ) анализ работы конструкции в программе SOFiSTiK с построением поверхностей влияния для группы упоров. Для анализа была использована КЭ модель с упругими связями заданной жесткости между стальной частью и железобетонной плитой (рис. 4А), что позволило получать непосредственно значения сдвиговых усилий в местах размещения групп упоров. Общий вид поверхности влияния для сдвигового усилия приведен на рисунке 4Б.

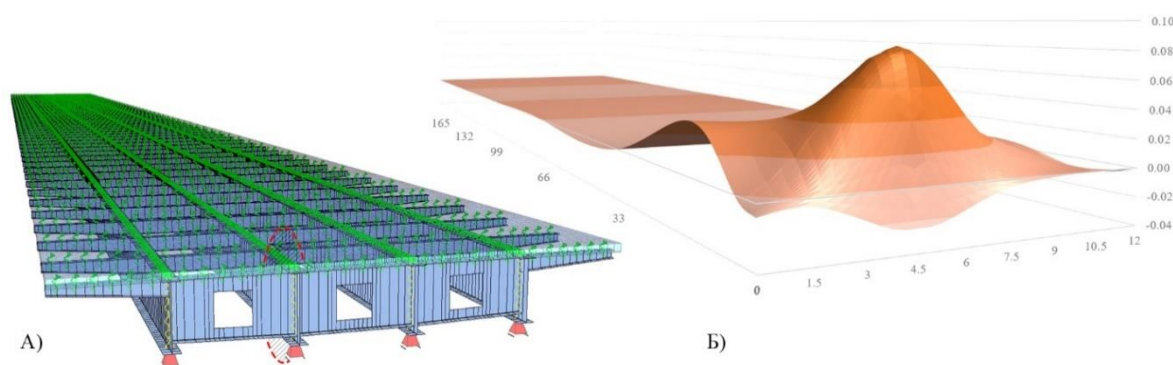


Рисунок 4. Общий вид на расчетную модель (А) и поверхность влияния для группы упоров (Б) (разработан автором)

Figure 4. General view of the design model (A) and the surface of influence for the group of stops (B) (developed by the author)

Далее поверхность влияния с использованием разработанной на языке Python программы [13] загружалась моделями подвижных нагрузок. Были рассмотрены следующие нагрузки:

1. Нагрузка А14 по отечественному СП 35.13330-2011: тележки и распределенная по линиям колеи полосы нагрузка; в соответствии с требованиями СП было выбрано наихудшее расположение трех полос нагрузки.
2. Нагрузки по EN:
 - а. FLM3 (модель из двух тандемов, всего одна на проезжую часть) для проверки ограниченной выносливости;
 - б. FLM1 (тележки и распределенная по площади полосы нагрузка; 2 полосы на проезжую часть) для проверки условной неограниченной выносливости.
3. Нагрузка А15 по украинским нормам ДБН: одна тележка на проезжую часть.
4. Нагрузка вида Fatigue Truck по нормам AASHTO (США): модель грузовика, одна на проезжую часть.

5. Модель стандартного тягача с полуприцепом общей массой 40 т для возможности сравнения с вероятными фактическими усилиями.

По результатам загрузки поверхностей влияния были получены диаграммы изменения величины сдвигающих сил (рис. 5), в дальнейшем преобразованные в величины максимальных касательных напряжений в корне упора: $\tau_{max} = 4/3 \cdot (T [кН] / 3) / A_{упора} = 1,157 \cdot T [кН] = [МПа]$ (табл. 4). Сдвиговые усилия от собственного веса конструкций и мостового полотна, необходимые для проверки по отечественным нормам, были получены в ходе КЭ анализа расчетной модели с учетом стадийности включения плиты в работу и составили $T_{dw} = 22,81кН$ (на группу упоров).

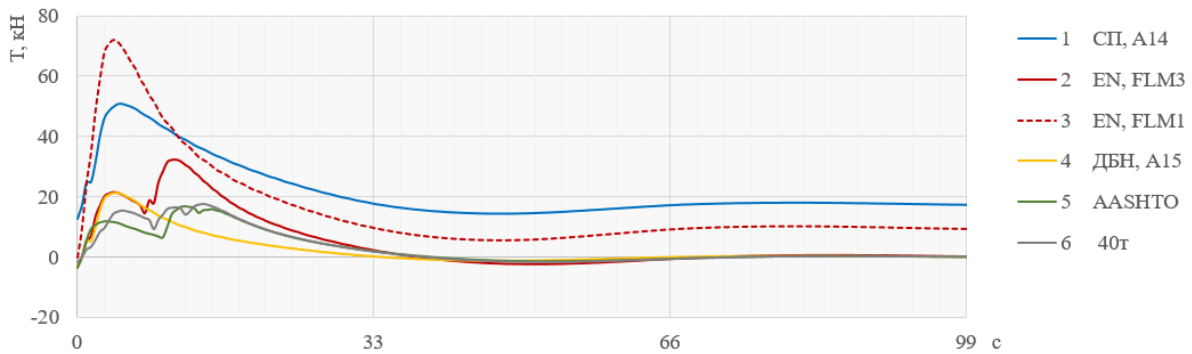


Рисунок 5. Диаграмма изменения сдвиговых усилий на группу КД (3 упора) в зависимости от времени проезда нагрузки из соответствующего загрузения (условная скорость 1 м/с) (разработан автором)

Figure 5. Diagram of the change in shear forces per group of controlled parts (3 crutches) depending on the travel time of the load from the corresponding load (nominal speed 1 m/s) (developed by the author)

Таблица 4 / Table 4

Параметры режимов нагружения элементов для рассматриваемых загрузений (сдвиговые усилия на 1 упор и касательные напряжения по корню упора)

Parameters of loading modes of elements for the considered loadings (shear forces per 1 stop and shear stresses along the root of the crutch)

№ модели загрузки Load Model No.	1	2	3	4	5	6
Размах усилий, ΔT , кН Range of efforts, ΔT , kN	12,68	11,87	24,13	8,19	6,80	6,40
Макс. усилия, T_{max} , кН Max. efforts, T_{max} , kN	24,49	10,78	24,02	7,10	5,61	5,87
Размах напряжений, $\Delta \tau$, Мпа Stress range, $\Delta \tau$, MPa	44,72	41,86	85,10	28,88	23,98	22,58
Макс. напряжения, τ_{max} , Мпа Max. stress., τ_{max} , MPa	86,38	38,03	84,71	25,05	19,80	20,69
Кэфф. асимметрии цикла, ρ Coeff. asymmetry of the cycle, ρ	0,48	-0,10	0,00	-0,15	-0,21	-0,09

Составлено автором / Compiled by the author

Результаты проверки выносливости

Для возможности проведения сравнительного анализ отечественной методики с зарубежными были сделаны следующие предположения:

Используемый коэффициент эффективной концентрации напряжений β в первом приближении принимается равным 2, основываясь на сопоставления таблицы категорий деталей Еврокода и отечественной таблицы коэффициентов концентрации напряжений;

Для возможности учета проектного числа циклов нагрузки N предлагается использовать коэффициент перевода $k_N = \sqrt[m]{2 \cdot 10^6 / N}$, при этом угол наклона кривой усталости принимается в соответствии с европейским нормами $m = 8$.¹

Результаты проверок выносливости для 4 методик приведены в таблице 5. Для отображения соотношения расчетных и предельных значений при проверке был введен показатель $K = \frac{X_{\text{проектное}}}{X_{\text{предельное}}}$.

Таблица 5 / Table 5

Результаты проверок выносливости по рассматриваемым методикам

Results of endurance tests according to the considered methods

№	Модель проверки Checking model	N	Формула проверки Verification formula	Итог Outcome	K
1 ₁	СП	2E+6	$\tau_{\max,ef} = 86,38 \leq 0,75 \cdot \gamma_w \cdot R_y \cdot m = 0,75 \cdot 1,00 \cdot 345 \cdot 1 = 258$	ОК	33 %
1 ₂	СП	4E+7	$\tau_{\max,ef} = 86,38 \leq [0,75 \cdot \gamma_w \cdot R_y \cdot m] \cdot k_N = 259 \cdot 0,69 = 178$	ОК	37 %
1 ₃	СП	1E+8	$\tau_{\max,ef} = 86,38 \leq [0,75 \cdot \gamma_w \cdot R_y \cdot m] \cdot k_N = 259 \cdot 0,61 = 158$	ОК	41 %
2 ₁	EN (FLM3)	2E+6	$\gamma_{Ef} \cdot \Delta\tau_{E,2} = \lambda_{\tau,\max} \cdot \Delta\tau = 0,86 \cdot 41,86 = 36,16 \leq \Delta\tau_c / \gamma_{Mf} = 78,3$	ОК	46 %
2 ₂	EN (FLM3)	4E+7	$\gamma_{Ef} \cdot \Delta\tau_{E,2} = \lambda_{\tau,\max} \cdot \Delta\tau = 1,25 \cdot 41,86 = 52,49 \leq \Delta\tau_c / \gamma_{Mf} = 78,3$	ОК	67 %
2 ₃	EN (FLM1)	1E+8	$\gamma_{Ef} \cdot \Delta\tau_{E,2} = \Delta\tau = 85,10 \leq \Delta\tau_{N=10^8} / \gamma_{Mf} = 55,19 / 1,15 = 48$	Нет по	177 %
3 ₁	AASHTO	2E+6	F-II: $T = 0,75 \cdot 6,8кН = 5,1кН \leq T_{\text{вын}} = 7,53 \cdot 0,86^{2[kipf]} = 24,7кН$	ОК	20 %
3 ₂	AASHTO	4E+7	F-II: $T = 0,75 \cdot 6,8кН = 5,1кН \leq T_{\text{вын}} = 1,96 \cdot 0,86^{2[kipf]} = 6,4кН$	ОК	79 %
3 ₃	AASHTO	1E+8	F-I: $T = 1,5 \cdot 6,8кН = 10,2кН \leq T_{\text{вын}} = 5,5 \cdot 0,86^{2[kipf]} = 18,1кН$	ОК	56 %
4 ₁	ДБН	1E+8	$\Delta\tau = 28,88 \leq \Delta\tau_{R,n} / (\gamma_{Mf} \cdot \gamma_r) = 90 / (1 \cdot 0,85) = 105$	ОК	27 %
4 ₂	ДБН	2E+6	$\Delta\tau = 28,88 \leq \Delta\tau_{R,n} / (\gamma_{Mf} \cdot \gamma_r) = 0,69 \cdot 90 / (1 \cdot 0,85) = 73$	ОК	40 %
4 ₃	ДБН	4E+7	$\Delta\tau = 28,88 \leq \Delta\tau_{R,n} / (\gamma_{Mf} \cdot \gamma_r) = 0,61 \cdot 90 / (1 \cdot 0,85) = 64$	ОК	45 %

Составлено автором / Compiled by the author

Как можно заметить, по показателю соотношения расчетных и предельных значений в области проектных режимов эксплуатации

¹ Мыщик В.С. Методика оценки выносливости стальной ортотропной плиты проезжей части автодорожных мостов: диссертация ... кандидата технических наук: 05.23.11. — Москва, 2007. — 187 с.

($N = 4 \times 10^7$) наибольшие значения наблюдаются при использовании моделей Еврокода и AASHTO. Единственное невыполнение условий проверки выносливости выявлено при использовании нагрузки FLM1 при проверке по Еврокоду на условную ($N = 10^8$) неограниченную выносливость (предположения о чрезмерном весе данной модели уже высказывались в некоторых исследованиях [14]).

По используемому показателю соотношения K при проверке по отечественной методике (с введенными выше предположениями) выносливость элементов объединения можно оценить примерно в 2 раза выше, чем при расчете по моделям ЕС и США, а также примерно на одном уровне с новой моделью, используемой в Украине. В тоже время, данный подход для сравнения результатов применения методов недостаточно точен, так как не соответствует основам теории усталости и, в частности, применяемой модели линейного суммирования повреждений, согласно которой учитываются все происходящие циклы напряжений, а не только максимальные. Таким образом, для получения более корректных результатов сравнение следует проводить по показателям, связанными с поврежденностью элемента по итогам применения той или иной методики.

Результаты расчета полученных повреждений элементов объединения СТЖБ ПС

Основываясь на полученных диаграммах изменения напряжений за один цикл прохода нагрузки (рис. 5) с использованием преобразования «методом дождя» были получены спектры полуциклов напряжений от каждой из рассмотренных нагрузок. Вычисление накопленных повреждений производилось по классической гипотезе Пальмгрена-Майнера с использованием модели кривой усталости с коэффициентом уклона $m = 8$ (рис. 1в):

$$D = \sum_a \frac{n_{a,i}}{N_{a,i}}$$

где $a = \Delta\tau$ — спектр величин напряжений (размахов); $n_{a,i}$ — количество полных циклов величины a_i из набора спектра a ; $N_{a,i}$ — абсцисса кривой усталости для ординаты a_i из набора спектра a .

Результаты спектрального анализа воздействия нагрузок на рассматриваемый элемент приведены на рисунке 6, результаты анализа повреждений приведены на гистограмме на рисунке 7. Диаграмма расчетного количества циклов рассмотренных нагрузок до достижения $D = 1$ приведена на рисунке 8. На основании полученных данных были определены резервы по выносливости элементов при использовании гипотезы о разрушении элемента при достижении $D = 1$. Результаты анализа имеющихся резервов приведены на рисунке 9.

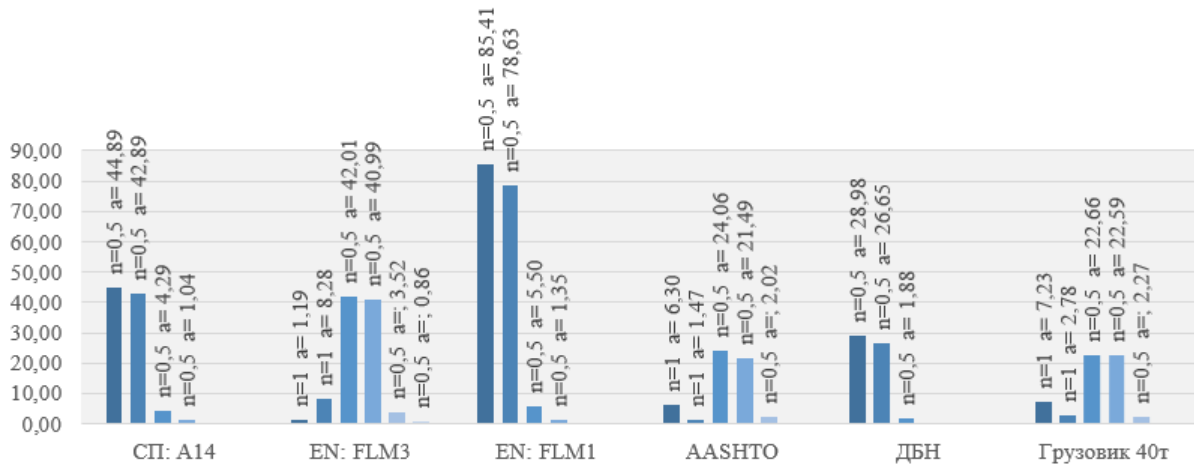


Рисунок 6. Гистограмма спектров циклов ($n = 1$) и полуциклов ($n = 0,5$) касательных напряжений (МПа) от различных подвижных нагрузок (разработан автором)

Figure 6. Histogram of spectra of cycles ($n = 1$) and half-cycles ($n = 0.5$) of tangential stresses (MPa) from various moving loads (developed by the author)

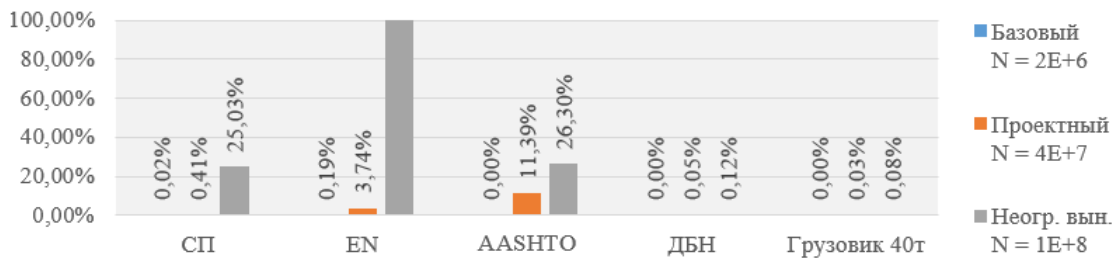


Рисунок 7. Гистограмма накопленных повреждений элемента при проектных нагрузках по 4 методикам при 3 режимах эксплуатации (по кол-ву циклов) (разработан автором)

Figure 7. Histogram of the accumulated damage of an element at design loads according to 4 methods with 3 operating modes (according to the number of cycles) (developed by the author)

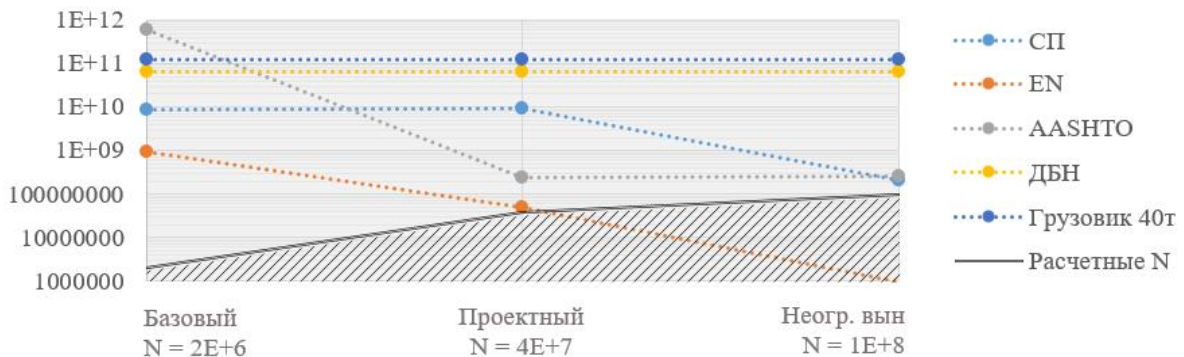


Рисунок 8. Диаграмма расчетного количества циклов нагрузок по критерию $D = 1$ (разработан автором)

Figure 8. Diagram of the calculated number of load cycles according to the criterion $D = 1$ (developed by the author)

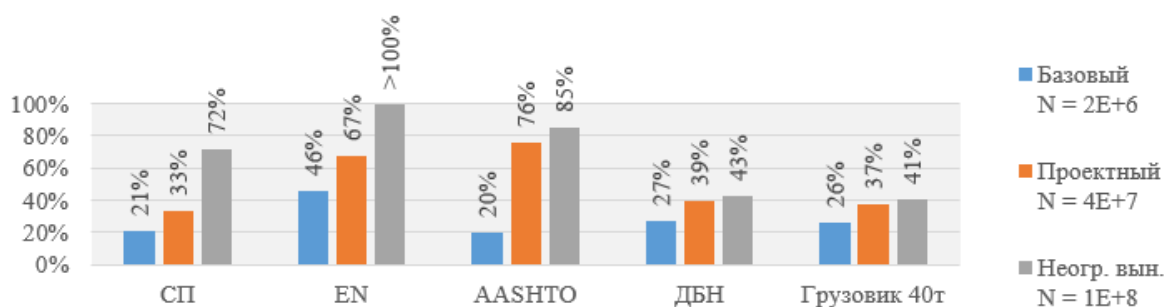


Рисунок 9. Гистограмма использования выносливости по критерию $D = 1$, % от теоретически возможной нагрузки возможной нагрузки (разработан автором)
Figure 9. Histogram of endurance use by criterion $D = 1$, % of the theoretically possible load of the possible load (developed by the author)

Обсуждение результатов анализов

Discussion of test results

Анализ результатов проведенных исследований позволяет сделать следующие выводы:

1. Результаты проверки по Еврокодам по базовому числу циклов ($N = 2 \times 10^6$) дают приблизительно вдвое больший показатель использования резерва выносливости, чем все остальные методики проверок, включая проверку на основе модели 40-тонного автопоезда. Это объясняется высокой степенью параметризации модели проверки по Еврокоду с включением большого числа статистических параметров, идущих в запас при относительно малом числе циклов.

2. Результаты проверки модели Еврокода с использованием нагрузки FLM-1, близкой по структуре к отечественному набору нагрузок АК, для условной неограниченной выносливости значительно отличаются от проверок на $N = 10^8$ циклов по остальным методикам и в целом представляются завышенными; расчетный срок эксплуатации по критерию $D = 1$ для данной модели составил всего 1 млн циклов, что сопоставимо всего с 3 годам эксплуатации при проектной интенсивности в 1000 единиц тяжелого транспорта в сутки.

3. Для проектного числа циклов (40 млн) результаты проверок по нормам США и ЕС дают в целом близкий результат (67 % и 76 % соответственно) и позволяют выдвинуть предположение о рациональности используемой системы конструкций узлов объединения с точки зрения выносливости; в тоже время, по отечественным и украинским нормам запасы примерно в два раза выше (показатель использования 33 % и 39 % соответственно), что свидетельствует о наличии значительных резервах по выносливости при проверке по данным методикам.

4. Проведенный анализ показал, что результаты применения нынешней отечественной методики с учетом введенных предположений по эффективному коэффициенту концентрации напряжений в целом коррелируют с результатами расчета по методикам других стран и регионов; так как ныне используемая модель проверки через максимальные напряжения имеет значительное математическое и физическое обоснование. Совершенствование существующей методики рационально проводить в направлении расширения диапазона входящих корректирующих параметров, в первую очередь — параметров проектного режима нагруженности с учётом его статистических особенностей.

5. С учетом значительной неопределённости о фактическом режиме нагружения скрытых в плите проезжей части элементов объединения сталежелезобетонных конструкций, для повышения качества учета режима нагруженности необходимо проведение дальнейших экспериментальных исследований и дальнейшая разработка верифицируемой модели режима нагруженности на базе полученных экспериментальных данных.

Заключение

Conclusion

В данном исследовании были проанализированы существующие методики проверки элементов на выносливость в целом и элементов объединения сталежелезобетонных конструкций (гибких штыревых упоров) в частности. По результатам качественного и количественного анализа методик были выведены рекомендации по возможностям адаптации методики для расчета гибких штыревых упоров и по дальнейшим совершенствованиям методики с целью повышения ее эффективности при проектировании конструкций сталежелезобетонных пролётных строений автодорожных мостов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Быстров В.А.** Проблемы обоснования режимов фактической динамической нагруженности и ресурса долговечности конструкций сталежелезобетонных автодорожных и городских мостов / В.А. Быстров, Н.В. Козак, Д.А. Ярошутин. — DOI <https://doi.org/10.15862/06SATS419> // Транспортные сооружения. — 2019. — Т 6, № 4. — URL: <https://t-s.today/06SATS419.html> (дата обращения: 12.05.2021).
2. **Быстров В.А.** Методика определения ресурса конструкций сталежелезобетонных и металлических мостов с учетом их фактической динамической нагруженности и дефектности / В.А. Быстров // Инновации и долговечность объектов транспортной инфраструктуры (материалы, конструкции, технологии): Материалы научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 14 ноября 2018 года / Под редакцией М.П. Клековкиной. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2019. — С. 84–89. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41269875> (дата обращения: 18.05.2021).
3. **Imrose V. Muhit** Various Types of Shear Connectors in Composite Structures: A Review / Muhit V. Imrose. — DOI <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1903.0563>. — Сеул: Chung-Ang University, 2015. — 5 с. — URL: https://www.researchgate.net/publication/275340980_Various_Types_of_Shear_Connectors_in_Composite_Structures_A_Review (дата обращения: 20.05.2021).
4. **Быстров В.А.** Совершенствование конструкции и расчета элементов сталежелезобетонных мостов / В.А. Быстров. — Л.: Издательство Ленинградского университета, 1987. — 185 с.
5. **Козак Н.В.** Сравнительный анализ отечественных и зарубежных норм проектирования в области расчетов элементов на выносливость / Н.В. Козак // Инновации и долговечность объектов транспортной инфраструктуры (материалы, конструкции, технологии): Материалы научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 14 ноября 2018 года / Под редакцией М.П. Клековкиной. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2019. — С. 92–97. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41269878> (дата обращения: 18.05.2021).
6. **Leitão F.N.** Fatigue analysis and life prediction of composite highway bridge decks under traffic loading / F.N. Leitão, J.G.S. da Silva, S.A.L. de Andrade. — DOI <https://doi.org/10.1590/S1679-78252013000300004> // Latin American Journal of Solids and Structures. — 2013. — Т 10, № 3. — С. 505–522. — URL: <https://www.scielo.br/j/lajss/a/CSvBWSkSV99xmt67YVwWGj/?lang=en> (дата обращения: 12.05.2021).
7. **Корнеев М.М.** Сталежелезобетонные мосты. Теоретическое и практическое пособие по проектированию / М.М. Корнеев. — СПб.: ПГУПС, 2015. — 400 с.
8. **Xu C.** Fatigue Behavior of the Group Stud Shear Connectors in Steel-Concrete Composite Bridges / C. Xu, K. Sugiura, Q. Su. — DOI [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001261](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001261) // Journal of Bridge Engineering. — 2018. — Т 23, № 8. — С. 4018055. — URL: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29BE.1943-5592.0001261> (дата обращения: 12.05.2021).
9. **Slutter R.G.** Fatigue Strength of Shear Connectors: Fritz Laboratory Reports / R.G. Slutter, J.W. Fisher. — Бетлехем, Пенсильвания: Lehigh University, 1966. — 44 с. — URL: https://digital.lib.lehigh.edu/fritz/pdf/316_2.pdf (дата обращения: 20.05.2021).

10. **Ростовых Г.Н.** Совершенствование методики расчёта гибких упоров в конструкциях сталежелезобетонных мостов / Г.Н. Ростовых // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2007. — № 3. — С. 79–87. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11913797> (дата обращения: 18.05.2021).
11. **Сорокин Е.С.** Динамические характеристики строительных материалов и конструкций / Е.С. Сорокин // Справочник по динамике сооружений / ред. Б.Г. Коренев, И.М. Рабинович М.: Стройиздат, 1972. — С. 38–61.
12. **Корнеев М.М.** Стальные мосты: Теоретическое и практическое пособие по проектированию: в 2 т. Т. 1 / М.М. Корнеев. — Киев: Академпресс, 2010. — 532 с.
13. **Kozak N.V.** Modeling of live load influence in analysis of bridge structures endurance / N.V. Kozak. — DOI <https://doi.org/10.1088/1757-899X/832/1/012025> // International Conference on Digital Solutions for Automotive Industry, Roadway Maintenance and Traffic Control (DS ART 2019) 1 November 2019, Cholpon-Ata, Kyrgyzstan / Чолпон-Ата: IOP Publishing Ltd, 2020. — С. 12025. — URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/832/1/012025> (дата обращения: 18.05.2021).
14. **Al-Emrani M.** Fatigue design of steel and composite bridges / M. Al-Emrani, M. Aygul. — Гетеборг: Chalmers University of Technology, 2014. — 166 с.

Сведения об авторах:

Козак Николай Викторович — аспирант, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», Санкт-Петербург, Россия, e-mail: kozak.spbgasu@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7707-4388>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1018546
Scopus: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57207108767>
LinkedIn: <https://www.linkedin.com/in/kozaknikolai/>

Статья получена: 08.06.2021. Принята к публикации: 22.07.2021. Опубликована онлайн: 03.09.2021.

Благодарности: за научные консультации и помощь в проведении исследования выражаю искреннюю благодарность своему научному руководителю, профессору, к.т.н. Быстрову Владимиру Аполинарьевичу

REFERENCES

1. Bystrov V.A., Kozak N.V., Yaroshutin D.A. Problems of real dynamically loading mode and structure fatigue mode determination in composite steel-concrete city and road bridges. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2019; 6(4): 06SATS419. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/06SATS419>.
2. Bystrov V.A. Technique for Determining the Resource of Constructions of Steel Concrete and Metal Bridges Taking into Account Their Actual Dynamic Loading And Defectness. In: Klekovkina M.P. (ed.). *[Innovation and durability of transport infrastructure (materials, structures, technologies): Materials of the Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, November 14, 2018]*. Saint Petersburg: Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering; 2019. p. 84–89. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41269875> (accessed 18th May 2021). (In Russ., abstract in Eng.).

3. Imrose B. Muhit Various Types of Shear Connectors in Composite Structures: A Review. Seoul: Chung-Ang University; 2015. Available at: https://www.researchgate.net/publication/275340980_Various_Types_of_Shear_Connectors_in_Composite_Structures_A_Review (accessed 20th May 2021). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1903.0563>.
4. Bystrov V.A. [Improving the design and calculation of elements of stolerle-concrete bridges]. Leningrad: Publishing house of Leningrad University; 1987. (In Russ.).
5. Kozak N.V. Analysis of Differences in Russian and World Design Standards in The Field of Calculations for Fatigue. In: Klekovkina M.P. (ed.). [Innovation and durability of transport infrastructure (materials, structures, technologies): Materials of the Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, November 14, 2018]. Saint Petersburg: Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering; 2019. p. 92–97. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41269878> (accessed 18th May 2021). (In Russ., abstract in Eng.).
6. Fernando N. Leitão, José Guilherme S. da Silva, Sebastião A.L. de Andrade. Fatigue analysis and life prediction of composite highway bridge decks under traffic loading. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2013; 10(3): 505–522. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1590/S1679-78252013000300004>.
7. Korneyev M.M. [Stoler concrete bridges. Theoretical and Practical Design Guide]. St. Petersburg: Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University; 2015. (In Russ.).
8. Xu C., Sugiura K., Su Q. Fatigue Behavior of the Group Stud Shear Connectors in Steel-Concrete Composite Bridges. *Journal of Bridge Engineering*. 2018; 23(8): 4018055. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001261](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001261).
9. Slutter R.G., Fisher J.W. Fatigue Strength of Shear Connectors: Fritz Laboratory Reports. Bethlehem, Pennsylvania: Lehigh University; 1966. Available at: https://digital.lib.lehigh.edu/fritz/pdf/316_2.pdf (accessed 20th May 2021). (In Eng.).
10. Rostovykh G.N. Improvement of Methods of Calculation of Flexible Studs in Steel Iron Concrete Bridge Structures. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2007; (3): 79–87. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11913797> (accessed 18th May 2021). (In Russ.).
11. Sorokin E.S. [Dynamic characteristics of building materials and structures]. In: Korenev B.G., Rabinovich I.M. (eds). [Structure Dynamics Handbook]. Moscow: Stroyizdat; 1972. p. 38–61.
12. Korneyev M.M. [Steel Bridges: Theoretical and Practical Guide to Design: in 2 volumes. Vol. 1]. Kiev: Akadempres; 2010. (In Russ.).
13. Kozak N.V. Modeling of live load influence in analysis of bridge structures endurance. In: *International Conference on Digital Solutions for Automotive Industry, Roadway Maintenance and Traffic Control (DS ART 2019) 1 November 2019, Cholpon-Ata, Kyrgyzstan*. Cholpon-Ata: IOP Publishing Ltd; 2020. p. 12025. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/832/1/012025> (accessed 18th May 2021). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/832/1/012025>.
14. Al-Emrani M., Aygul M. Fatigue design of steel and composite bridges. Gothenburg: Chalmers University of Technology; 2014. (In Eng.)

Information about the authors:

Nikolai V. Kozak — Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia, e-mail: kozak.spbgasu@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7707-4388>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1018546
Scopus: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57207108767>
LinkedIn: <https://www.linkedin.com/in/kozaknikolai/>

Submitted: 8th June 2021. Revised: 22nd July 2021. Published online: 3rd September 2021.

Acknowledgments: For scientific advice and assistance in conducting the study, I express my sincere gratitude to my supervisor, professor, Ph.D. Bystrov Vladimir Apolinarevich