

УДК 625.7+519.2+519.85

Майстренко Игорь Юрьевич

кандидат технических наук, доцент

E-mail: igor_maystr@mail.ru

Зиннуров Тагир Альмирович

кандидат технических наук, доцент

E-mail: leongar@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

Майстренко Татьяна Игоревна

специалист по промышленной безопасности

E-mail: maystrenko1496@mail.ru

Егорова Ирина Юрьевна

инженер-проектировщик

E-mail: risha9210@gmail.com

Ерохин Дмитрий Игоревич

техник-проектировщик

E-mail: erokhin1604@mail.ru

ООО Научно-производственный центр «Строй-Экспертиза»

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Калинина, д. 48, оф. 506А

**Оценка ресурсных показателей автодорожных мостов
на основе анализа структурных изменений и накопления повреждений
в конструктивных элементах**

Аннотация

Постановка задачи. Цель исследования – разработать обобщенный алгоритм анализа структурного состояния материала конструктивных элементов мостовых сооружений, позволяющий за счет выбора контрольных и управляемых факторов дать оценку ресурсных показателей мостовых сооружений.

Результаты. Основные результаты исследования состоят в анализе величин условных вероятностей отказов в характерных точках времени эксплуатации (на момент оценки, на глубину до следующего планового обследования и на глубину до ожидаемого исчерпания проектного ресурса), которые характеризуют резервы несущей способности системы по условиям статической прочности и усталостной прочности (выносливости).

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в совершенствовании и оптимизации процедур расчета стальных конструкций автодорожных мостов на прочность и выносливость.

Ключевые слова: автодорожный мост, стальная конструкция, выносливость, анализ структурного состояния, ресурс, транспортный поток.

Введение

Общая концепция определения эксплуатационной пригодности конструкций, эксплуатация которых проходила длительное время в неблагоприятных условиях среды, не всегда позволяет с приемлемым уровнем достоверности своевременно оценить несущую способность ответственных элементов технических систем после определенной наработки. Это связано с тем, что для большинства малых и средних мостов система мониторинга или отсутствует, или не обладает должным уровнем информативности. Обследования зачастую носят периодический, а иногда и «запаздывающий» характер, в силу чего эксплуатация отдельных элементов металлоконструкций происходит в условиях, близких к предельным, а оперативное выявление таких условий не всегда своевременно, что может привести к возникновению аварийных ситуаций.

Одним из перспективных направлений оценки ресурса безопасной эксплуатации технических устройств и строительных конструкций является инженерное направление,

базирующееся на магнитных методах неразрушающего контроля, в частности – на контроле напряженного состояния строительных сталей по коэрцитивной силе. Указанный метод позволяет оперативно оценивать переход стали из упругой в упругопластическую и пластическую зону деформации. Таким образом, разработка и последующая апробация модели оценки ресурса безопасной эксплуатации мостовых сооружений по коэрцитивной силе представляет собой достаточно актуальную задачу.

Вопросам разработки методических приемов использования магнитного контроля напряженно-деформированного состояния для оценки ресурса безопасной эксплуатации технических устройств и строительных конструкций посвящены работы Б.Е. Попова [1], М.А. Мельгуй [2], Г.В. Бида, Э.С. Горкунова, В.М. Шевнина [3], В.М. Мацевитого, Г.Я. Безлюдько, К.В. Вакуленко, И.Б. Казака, В.В. Карабина [4], С.С. Родионовой [5], А.И. Ульянова [6-8] и других авторов [9, 10], характер изменения напряжений в стальной балке представлен в работе Ф.С. Замалиева [11]. При этом отмечено, что подобные задачи решаются применительно к конструкциям, изготовленным, как правило, из сталей в состоянии поставки, имеющих мало искаженную кристаллическую структуру, низкий уровень деформативности и значительный запас пластичности, а также приведены результаты исследования корреляционных связей, позволяющих оценивать по магнитным характеристикам структуру и механические свойства изделий из сталей у различных классов после закалки и отпуска, изотермической закалки, деформационной и деформационно-термической обработок.

Обобщенный алгоритм анализа структурного состояния материала конструктивных элементов мостовых сооружений

В общем виде алгоритм анализа структурного состояния материала конструктивных элементов мостовых сооружений состоит из шести основных этапов.

На первом этапе разрабатывается программа обследования мостового сооружения (определяются цели и задачи, объем и зоны контроля, порядок и методы контроля, а также определяются начальные условия для достижения искомых показателей).

На втором этапе проводится изучение проектной, исполнительной и эксплуатационной документации на объект контроля (выбираются исходные данные об объекте контроля, включая сведения об использованной стали, ее физико-механических и магнитных характеристиках, сведения о ремонтах/реконструкции отдельных узлов, деталей и др.).

На третьем этапе проводится натурный осмотр объекта (выявляются и оцениваются зоны, имеющие видимые дефекты и повреждения, для их последующего включения в план инструментального контроля).

На четвертом этапе проводится инструментальный контроль объекта с использованием методов магнитного (коэрцитиметрический контроль) и акустического (ультразвуковой контроль) видов (собираются выборочные данные для последующего анализа). При магнитном контроле замеры производятся вдоль и поперек листового проката под углом 90° . В случае выявления опасных дефектов, объем контроля корректируется в сторону увеличения (индивидуальный показатель).

На пятом этапе проводится комплексный анализ полученных результатов визуального и инструментального контроля (оценка статистических характеристик выборочных данных, корреляционный анализ параметров отклика, оценка сходимости теоретических предпосылок расчетных моделей с данными инструментального контроля).

На шестом этапе выполняется прогноз изменчивости выходных параметров (коэрцитивной силы, числа нагружений, процессов деградации, вероятности отказов) на глубину времени – до очередного обследования/ремонта/реконструкции/утилизации. Разработка необходимых мероприятий по изменению (в случае необходимости) режима работы объекта (интенсивности движения, грузоподъемности и др.).

Выбор контрольных и управляемых факторов для оценки ресурсных показателей эксплуатируемых мостовых сооружений

Контрольные и управляемые факторы, выделенные для оценки ресурсных показателей эксплуатируемых мостовых сооружений, сгруппированы по наиболее значимым процедурам.

1. Процедура планирования выборочного наблюдения:

- определение начальных условий для достижения искомых показателей – начальные условия выбираются так, чтобы сократить время T достижения цели эксперимента, $\min(T)$;

- ввод значения требуемого уровня достоверности $\beta \geq 0,95$;

- ввод значения степени точности $\alpha \leq 0,05$;

- оценка дисперсии $D \leq 0,25$;

- оценка минимальной численности выборки n , обеспечивающей заданную точность α и достоверность β , $n = \frac{D^2 \times t_p^2}{\alpha^2}$;

- ввод класса точности выполняемых операций и значения коэффициента точности, K_i , устанавливающего число единиц допуска для принятого класса точности;

2. Процедура анализа общих параметров технической системы:

- анализ категории автомобильной дороги, суточной интенсивности движения N_1 и расчетной скорости движения v_D и средней скорости движения грузовых автомобилей v_G , в зависимости от категории автомобильной дороги, а также количества полос движения в одном направлении и фактической загруженности автомобилей η_D (отношение веса перевозимого груза к проектной грузоподъемности);

- анализ доли грузовых автомобилей в общем потоке автотранспорта, α_G ;

- оценка длины загрузки, с учетом номинальной длины пролета L и допуска ΔL на отклонение размера пролета (изготовление, монтаж), $\Delta L = i \times K_i$, $i = \alpha_i (0,8 + 0,001\sqrt{L}) \times (\sqrt[3]{L + 25} + 0,001\sqrt[3]{L^2})$;

- расчет статистических оценок процесса изменчивости скорости движения транспортного потока по однородному участку дороги мода: $v_{G.mod} = \frac{v_G}{\sqrt{\pi/2}}$, медиана

$v_{G.med} = v_{G.mod} \sqrt{\ln(4)}$, стандарт $\Delta_{vG} = \sqrt{v_{G.mod}^2 \left(2 - \frac{\pi}{2}\right)}$;

- оценка времени эксплуатации сооружения к моменту оценки τ и проектного (ожидаемого) ресурса оцениваемой системы θ , $\tau < \theta$.

3. Процедура анализа физико-механических и магнитных свойств стали:

- оценка математического ожидания, $\widehat{\mu}_m$, и дисперсии, $\widehat{\Delta}_m$, предела текучести стали – используется метод аналогов (по результатам статистической обработки результатов испытаний механических свойств строительных сталей);

- оценка базовых параметров магнитных свойств стали (по величине коэрцитивной силы), включающих: исходное значение коэрцитивной силы, которое в отожженном состоянии минимальное для каждой марки стали, H^0 ; значение коэрцитивной силы, соответствующее уровню внутренних напряжений, равных пределу текучести стали, H^m ; значение коэрцитивной силы, соответствующее достижению статической прочности стали, H^c ; значение коэрцитивной силы, соответствующее достижению предела усталостной прочности, H^v ;

- оценка математического ожидания, $\widehat{\mu}_\sigma$, $\widehat{\mu}_H$ и дисперсии, $\widehat{\Delta}_\sigma$, $\widehat{\Delta}_H$ нормальных напряжений $\hat{\sigma}$ и структурного состояния материала \widehat{H}_c – используется метод аналогов (по результатам статистической обработки результатов натурного обследования и коэрцитиметрического контроля) или методом, представленным в работе [12].

4. Процедура оценки характерных и уязвимых зон контроля:

- оценка характерных зон расчетных сечений мостового сооружения по степени концентрации напряжений β_v (в том числе: в зоне перехода при стыковании листов разной толщины; прикрепление элементов в нахлестку; в местах, где обрываются детали; в сечениях по крайнему ряду болтов и др.);

- оценка сечений с наибольшими расчетными усилиями (по расчетной схеме мостового сооружения);

- оценка зон с локальными поражениями вследствие деградации материала конструкции, с учетом характерных дефектов и повреждений, и результатов оценки относительной надежности y_v величины поврежденности ε_v , $y_v = 1 - \varepsilon_v$;

5. Процедура инструментального контроля технической системы:

- формирование репрезентативных выборок для групп однотипных элементов (замеры коэрцитивной силы выполняются вдоль и поперек листового проката под углом

90⁰), $H_{c,1}^i, H_{c,2}^i, \dots, H_{c,j}^i$ – репрезентативность выборки достигается одинаковой возможностью всех элементов генеральной совокупности попасть в выборку;

- выполнение пробных замеров коэрцитивной силы, $H_{c,j}^i$ с расчетом статистических характеристик полученной выборки объемом n_j – выполняется оценка выборочного среднего $\overline{H_{c,j}^i} = \frac{\sum_{j=1}^n H_{c,j}^i}{n_j}$ и корректировка оценки дисперсии D на D_{Hc} с учетом

$$\text{фактической изменчивости фактора } H_{c,j}^i, D_{Hc} = \frac{\sum_{j=1}^n (H_{c,j}^i - \overline{H_{c,j}^i})^2}{n_j};$$

- уточнение количества точек плана контроля – корректировка минимальной численности выборки n на n_{Hc} , обеспечивающей заданную точность α , с учетом фактической дисперсии D_{Hc} фактора $H_{c,j}^i, n_{Hc} = \frac{D_{Hc} \times t_p^2}{\alpha^2}$.

6. Процедура комплексного анализа результатов визуального и инструментального контроля:

- уточнение теоретических предпосылок расчета (анализа) – мера усталостного повреждения определяется на основе гипотезы Пальмгрена-Майнера $D_v = \sum_{i=1}^r \frac{n_i}{N(S_i)}$, не учитываются факторы: многоосное напряженное состояние, скорость нагружения элемента, влияние промежуточных циклов напряжения в составе главного, вынужденные колебания пролетного строения, температура эксплуатации;

- оценка скорости роста коэрцитивной силы, v_{Hc} (показателя скорости накопления повреждений):

$$v_{Hc} = \frac{\max H_{c,j}^i - H_c^0}{\tau}, \tag{1}$$

где $\max H_{c,j}^i$ – максимальное значение коэрцитивной силы в группе однотипных элементов;

- оценка наибольшего ожидаемого числа циклов нагружения за 1 год эксплуатации, $N_{sup,k}$, и за время эксплуатации системы к моменту оценки τ :

$$N_{sup} = \tau \times N_{sup,k}; \tag{2}$$

- оценка числа расчетных нагружений системы с учетом дискретной изменчивости интенсивности и скорости движения автомобилей, N_τ :

$$N_\tau = \sum_{t=1}^{\tau} \sum_{i=1}^{12} \sum_{s=1}^{30} \sum_{k=1}^{24} P_q(k, s, i, t) \times \left(\frac{3600}{l}\right) \tilde{v} \eta_D^n, \tag{3}$$

где n – число автомобилей, одновременно находящихся на мосту; $P_q(k, s, i, t)$ – вероятность появления на мосту q -ой расчетной ситуации нагрузки с учетом коррекции на стеснение транспортного потока; индексы k, s, i, t отвечают значению вероятности в данный час; l – расчетный участок; \tilde{v} – скорость движения смешанного потока автомобилей;

- оценка фактического режима работы системы по текущему значению коэрцитивной силы:

$$\gamma_N^\tau = \frac{N_{sup}}{N_\tau \pm \varepsilon_N^\tau}, \tag{4}$$

$$\varepsilon_N^\tau = t_p \times \sqrt{\frac{D_{N_\tau}}{N_\tau}}, \tag{5}$$

при этом предполагаются следующие оценки: надежный $\gamma_N^\tau \leq 0,5$, контролируемый $0,5 < \gamma_N^\tau \leq 0,75$, критический $\gamma_N^\tau > 0,75$;

- оценка асимметрии цикла переменных нормальных напряжений: начальных ρ_σ и на момент оценки ρ_σ^τ :

$$\rho_\sigma = \frac{\sigma_{\min,ef}}{\sigma_{\max,ef}}, \tag{6}$$

$$\rho_\sigma^\tau = \frac{\sigma_{\min,ef}^\tau}{\sigma_{\max,ef}^\tau}, \tag{7}$$

- оценка показателя динамики накопления усталостных повреждений, $v_{R\sigma}$:

$$v_{R\sigma} = \frac{R_y \gamma_w - \sigma_{\max,ef}}{(R_y \gamma_w^\tau - \sigma_{\max,ef}^\tau) \tau}, \tag{8}$$

где $\gamma_w \sim f(\rho_\sigma, \beta_v), \gamma_w^\tau \sim f(\rho_\sigma^\tau, \varepsilon_v, \beta_v), \sigma_{\max,ef}^\tau \sim f(\sigma_{\max,ef}, \gamma_v)$.

- оценка сходимости теоретических предпосылок расчетных моделей с данными инструментального контроля – выполняется по F-критерию Фишера:

$$F_{N\sigma} < [F_{N\sigma}], \tag{9}$$

$$F_{N\sigma} = \frac{D_{\text{sup}} |(\theta_N^\tau \vee \theta_\sigma^\tau)|}{D_{\text{inf}} |(\theta_N^\tau \vee \theta_\sigma^\tau)|}, \quad (10)$$

где D_{sup} , D_{inf} – соответственно бóльшая и меньшая дисперсия, полученные для оценок θ_N^τ или θ_σ^τ ; $[F_{N\sigma}]$ – критическое значение критерия Фишера исходя из уровня значимости α и степеней свободы $n_i - 1$;

- оценка коэффициента вариации структурных изменений:

$$\omega_H \sim f(D_{N\tau}, U), \quad (11)$$

где U – расширенная неопределенность / допустимая ошибка;

- оценка коэффициента вариации нагрузки:

$$\omega_\sigma \sim f(D_{\sigma\tau}, N_{\text{sup}}, \varepsilon_v). \quad (12)$$

7. Процедура прогноза изменчивости выходных параметров на глубину времени – до очередного обследования/ремонта/реконструкции/утилизации:

- ожидаемое (допустимое с позиции безопасности) число воздействий на систему до достижения предела усталостной прочности:

$$N_\theta^\tau = \exp\left(\frac{H_c^v - \max H_{c,j}^i}{v_{Hc}}\right); \quad (13)$$

- оценка долговечности системы по коэрцитивной силе:

$$\theta_N^\tau = \frac{H_c^v - \max H_{c,j}^i}{v_{Hc}}, \quad (14)$$

- оценка долговечности системы по динамике накопления усталостных повреждений:

$$\theta_\sigma^\tau = \frac{R_y \gamma_w^\tau - \sigma_{\text{max,ef}}^\tau}{v_{R\sigma}}, \quad (15)$$

- анализ системы по условной вероятности отказа для комбинации «удельная прочность – нормальные напряжения»:

$$Q_\sigma(t) = \sum_{k=1}^m \int_0^t \frac{\Delta_\sigma(t)}{\sqrt{\Delta_\sigma^2(t) + \Delta_R^2(t)}} \cdot \exp\left\{-\frac{[\mu_R(t) - \mu_\sigma(t)]^2}{2 \cdot [\Delta_\sigma^2(t) + \Delta_R^2(t)]}\right\} \cdot \frac{\omega_\sigma}{2\pi} dt, \quad (16)$$

где $t = 0 \dots \theta$; $\mu_R(t)$, $\Delta_R(t)$ – математическое ожидание и стандарт, характеризующие процесс изменчивости удельной прочности стали за время t ; $\mu_\sigma(t)$, $\Delta_\sigma(t)$ – математическое ожидание и стандарт, характеризующие процесс изменчивости нормальных напряжений в k -том расчетном элементе системы;

- анализ системы по условной вероятности отказа для комбинации «структурное состояние материала – усталостная прочность»:

$$Q_H(t) = \sum_{k=1}^m \int_0^t \frac{\Delta_H(t)}{\sqrt{\Delta_H^2(t) + \Delta_{Hv}^2(t)}} \cdot \exp\left\{-\frac{[\mu_{Hv}(t) - \mu_H(t)]^2}{2 \cdot [\Delta_H^2(t) + \Delta_{Hv}^2(t)]}\right\} \cdot \frac{\omega_H}{2\pi} dt, \quad (17)$$

где $\mu_{Hv}(t)$, $\Delta_{Hv}(t)$ – математическое ожидание и стандарт, характеризующие процесс изменчивости усталостной прочности стали (по коэрцитивной силе) за время t ; $\mu_H(t)$, $\Delta_H(t)$ – математическое ожидание и стандарт, характеризующие процесс изменчивости коэрцитивной силы в k -том расчетном элементе системы;

- анализ системы по условной вероятности отказа для комбинации «линейное накопление повреждений – усталостная прочность»:

$$Q_N(t) = \sum_{k=1}^m \int_0^t \frac{\Delta_N(t)}{\sqrt{\Delta_v^2(t) + \Delta_N^2(t)}} \cdot \exp\left\{-\frac{[\mu_v(t) - \mu_N(t)]^2}{2 \cdot [\Delta_v^2(t) + \Delta_N^2(t)]}\right\} \cdot \frac{\omega_N}{2\pi} dt, \quad (18)$$

где $\mu_v(t)$, $\Delta_v(t)$ – математическое ожидание и стандарт, характеризующие процесс изменчивости усталостной прочности стали (по гипотезе линейного накопления повреждений) за время t ; $\mu_N(t)$, $\Delta_N(t)$ – математическое ожидание и стандарт, характеризующие динамику накопления повреждений в k -том расчетном элементе системы.

Производственная апробация алгоритма анализа структурного состояния материала конструктивных элементов мостовых сооружений

Для производственной апробации алгоритма оценки ресурсных показателей автодорожных мостов на основе анализа структурных изменений и накопления повреждений в конструктивных элементах, выбран объект исследования – Мост находится на автомобильной дороге III технической категории и расположен в

Республике Татарстан вблизи села Аппаково (рис. 1). Мост был построен в 1990 году. Проектная нагрузка – А11, НК80. Мост трёхпролетный, выполнен по балочно-разрезной схеме с пролетами 13,55×3 м. Пролетное строение в поперечном сечении состоит из трех балок, выполненных из труб $\text{Ø}1020 \times 10$ по ГОСТ 8696. Поперечная схема моста: К1,4+3,7×2+К1,4. Габарит моста 8,4 м. Ширина тротуаров с обеих сторон по 1,0 м. Покрытие проезжей части асфальтобетонное, уложенное на сборные железобетонные плиты толщиной 20 см.

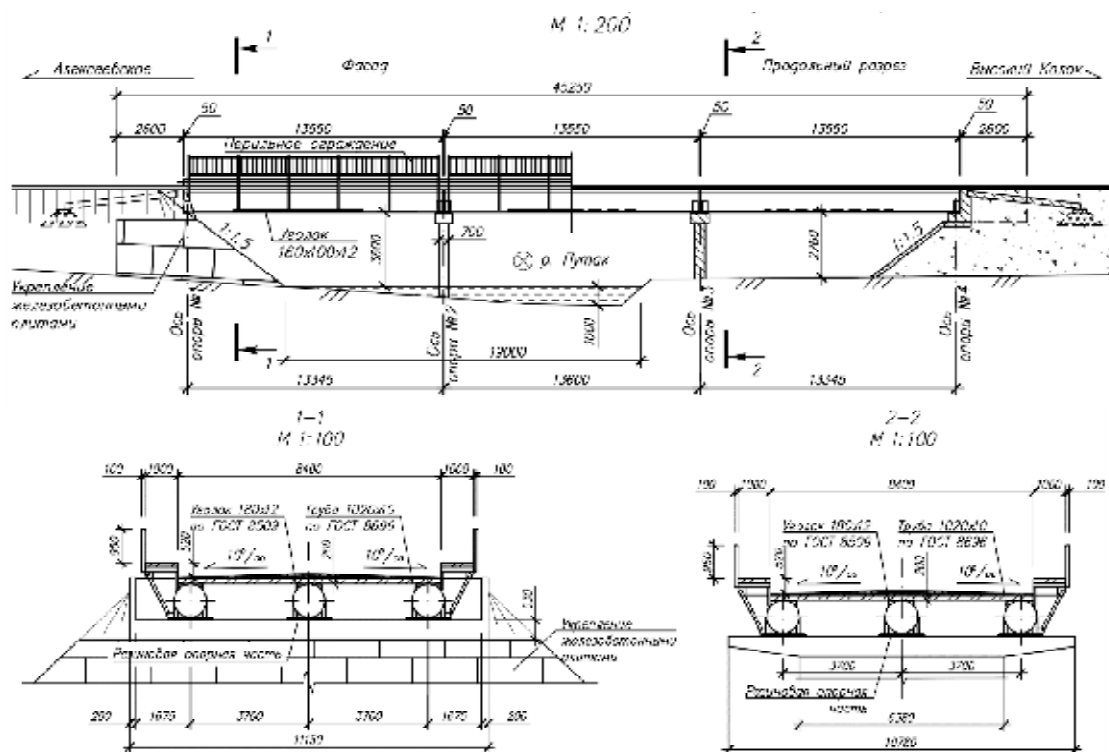


Рис. 1. Продольный и поперечный профиль моста (иллюстрация авторов)

Ультразвуковая толщинометрия элементов металлоконструкций несущих балок показала, что имеются повреждения элементов в виде общей поверхностной коррозии, слой коррозии равномерный в пределах 1,39 мм. По результатам измерений твердости металла был определен класс по прочности стали для труб $\text{Ø}1020 \times 10$ – С285 по ГОСТ 27772.

При формировании исходных данных для оценки ресурса безопасной эксплуатации мостовых сооружений объекта исследования, а также в процессе аналитических и расчетных преобразований, связанных с переходом от исходных и промежуточных и/или выходных параметров, были приняты определенные теоретические предпосылки и ограничения области исследования. Это, прежде всего, обусловлено необходимостью упрощения алгоритма расчета до приемлемого уровня, позволяющего с наименьшей трудоемкостью (как машинного времени, так и времени натурного обследования) обеспечить минимальные требования, предъявляемые к точности и достоверности в области строительных конструкций, применительно к мостовым сооружениям.

Учитывая, что большое значение имеет само понятие цикла нагрузки, сделаем определение этого и связанного с ним понятий:

- цикл нагрузки – периодическое изменение нагрузки, связанное с продолжительностью одного прохода подвижной нагрузки по заданному отрезку, представляющее собой статистическую оценку суммарного числа воздействий этой нагрузки;

- число воздействий нагрузки – расчетное нагружение системы отдельным колесом автомобиля, следствие непрерывного движения нагрузки по мосту в течение короткого промежутка времени;

- цикл при усталостном нагружении – одна полная последовательность изменения знака приложенной нагрузки, которая повторяется периодически.

Статистическая модель смешанного транспортного потока на мосту составлена на основе усеченного закона Пуассона и позволяет учесть изменение режима движения автомобилей во времени, при этом сделаны следующие предпосылки:

- скорость v и интенсивность движения приняты постоянными в течение короткого промежутка времени $d\tau$;
- обгон автомобилей на мосту запрещается;
- расстояние между автомобилями, попадающими в заданный отрезок l (длина пролета), принимается не менее минимально возможного расстояния безопасности;
- влияние соседних и встречных колонн автомобилей не учитывается;
- смена расчетных ситуаций на заданном отрезке происходит дискретно через каждый указанный промежуток времени, равный l/v ;
- оценка ожидаемого числа событий одновременного нахождения j автомобилей на отрезке l за интервал времени $d\tau$ выполняется с учетом дискретно-переменной интенсивности и скорости движения транспорта во времени;
- взаимное расположение разных типов автомобилей в колонне предполагается произвольным, но при этом учитывается их загруженность (то есть отношение веса перевозимого груза к проектной грузоподъемности автомобиля).

Изменчивость физико-механических и магнитных свойств сталей возникает за счет возможности неблагоприятных отклонений от нормативных значений вследствие случайного характера свойств материалов. Снижение безопасности, вызванное изменчивостью физико-механических и магнитных свойств сталей, учитывается коэффициентом надежности по материалу.

Для эффективного планирования эксперимента начальные условия выбраны так, чтобы сократить время достижения цели эксперимента. При этом используется принцип Парето при выявлении достаточности наиболее значимых управляемых факторов, доля которых в общем объеме составляет порядка 20 %.

Начальные исходные параметры расчета получены на основе изучения проектной и исполнительной документации на объект, а параметры расчета, принятые на момент оценки, получены путем прямых инструментальных измерений, выполненных с участием авторов при натурном обследовании в 2018 и 2019 годах.

Для выполнения расчетов были составлены аналитические и программные модули при использовании многофункциональной вычислительной системы Mathcad 14, которые позволили реализовать многопараметрическое взаимодействие управляемых и контрольных факторов в приемлемое для практики время машинного эксперимента (время решения задачи не превышает 30 минут на ПК с процессором типа Intel®Core™ i7-8700, включая время ввода значений изменяемых факторов).

Полученные результаты анализа системы по условной вероятности отказа для различных комбинаций представлены на рис. 2-4.

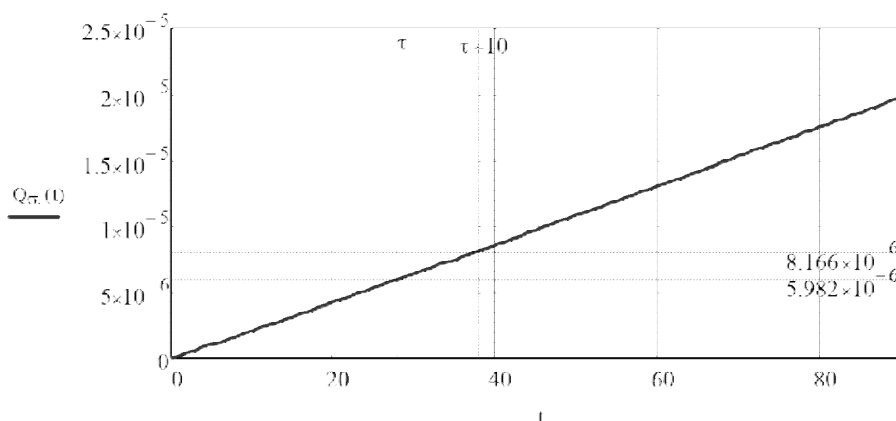


Рис. 2. Анализ системы по условной вероятности отказа для комбинации «удельная прочность – нормальные напряжения» (иллюстрация авторов)

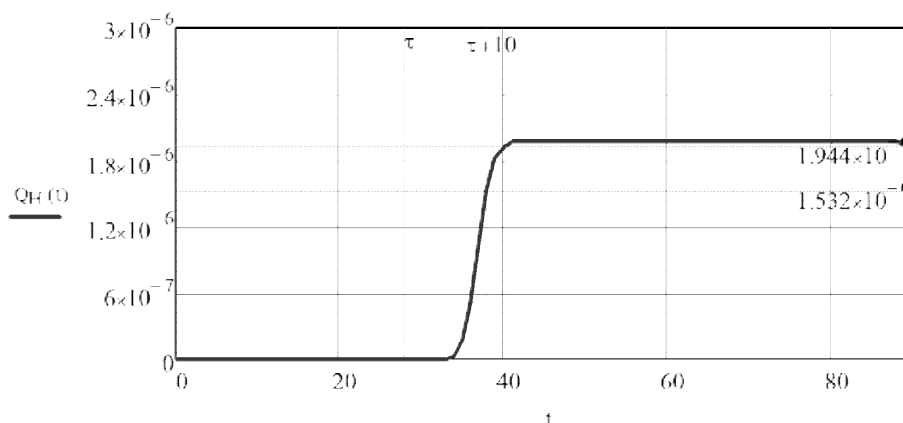


Рис. 3. Анализ системы по условной вероятности отказа для комбинации «структурное состояние материала – усталостная прочность» (иллюстрация авторов)

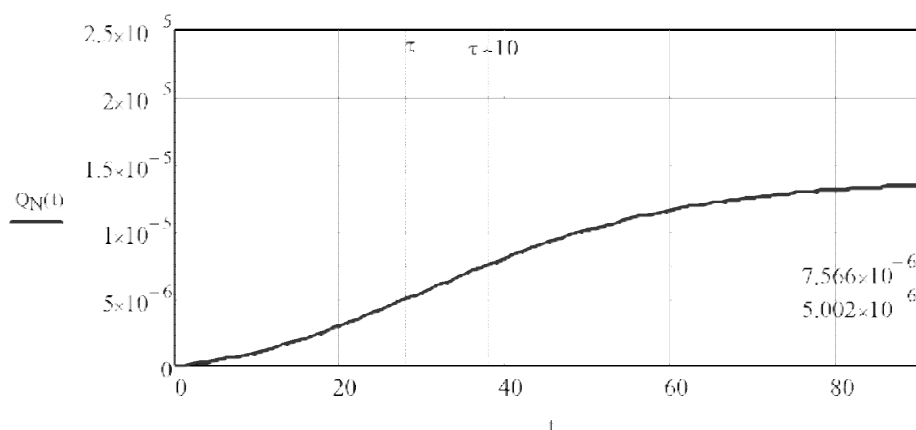


Рис. 4. Анализ системы по условной вероятности отказа для комбинации «линейное накопление повреждений – усталостная прочность» (иллюстрация авторов)

Анализ величин условных вероятностей отказов в характерных точках времени эксплуатации (на момент оценки, на глубину до следующего планового обследования и на глубину до ожидаемого исчерпания проектного ресурса) показал, что для всех рассмотренных комбинаций значение вероятности отказа не оказалось ниже 2×10^{-5} . Это значение определяет уровень надежности расчетного элемента системы (главной балки) для принятого уровня достоверности 0,95 и степени точности 0,05.

Рассмотренные расчетные комбинации оценки условной вероятности отказа по своей сути характеризуют резервы несущей способности системы по условиям статической прочности и усталостной прочности (выносливости).

Заключение

1. Предложенный подход позволяет вести расчет конструктивных элементов мостовых сооружений по фактическому техническому состоянию и режиму эксплуатации с заданным уровнем надежности при условии, что принятые предпосылки расчета будут признаны приемлемыми.

2. Предложенная методология оценки ресурсных показателей мостовых сооружений по коэрцитивной силе, позволяет в общем виде учитывать возникающие неопределенности расчетных параметров за счет использования интервальных оценок, а также давать оценку надежности системы по условной вероятности появления отказа.

3. Выявлен недостаток предложенной системы оценки ресурсных показателей по вероятности безотказной работы (вероятности отказа), который состоит в отсутствии нормативного регулирования граничных значений допустимой вероятности отказа, что затрудняет принятие решений о соответствии системы требуемому уровню безопасности.

Список библиографических ссылок

1. Попов Б. Е. Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса сосудов, работающих под давлением // Безопасность труда в промышленности. 2001. № 3. С. 25–30.
2. Мельгуй М. А. Импульсные магнитные методы и средства контроля механических свойств изделий из ферромагнитных сталей. Екатеринбург, 1993. 45 с.
3. Бида Г. В., Горкунов Э. С., Шевнин В. М. Магнитный контроль механических свойств проката. Екатеринбург : УрО РАН, 2002. 253 с.
4. Мацевитый В. М., Безлюдько Г. Я., Вакуленко К. В., Казак И. Б., Карабин В. В. Некоторые закономерности изменения коэрцитивной силы пластичных (незакаленных) сталей при активном растяжении // Вестник НТУ «ХПИ», 2010. С. 19–24.
5. Родионова С. С. Магнитный контроль структуры и механических свойств стальных изделий после термической обработки и деформационного упрочнения. Екатеринбург, 2002. 214 с.
6. Zakharov V. A., Ul'yanov A. I., Gorkunov E. S. Regularities of the change in the coercive force under biaxial asymmetric deformation of steel 3 // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2010. Vol. 46. № 3. P. 194–205.
7. Ul'yanov A. I., Chulkina A. A. Magnetic properties of cementite and the coercive force of carbon steels after plastic deformation and annealing // The Physics of Metals and Metallography. 2009. Vol. 107. № 5. P. 439–448.
8. Chulkina A. A., Ul'yanov A. I. Effect of the magnetic properties of cementite on the coercive force of high-carbon steels after quenching and tempering // The Physics of Metals and Metallography. 2009. Vol. 108, № 6. P. 548–555.
9. Thompson S. M., Tanner B. K. The Magnetic Properties of Specially Prepared Pearlitic Steels of Various Carbon Content as a Function of Plastic Deformation // J. Mag. Magn. Mater. 1994. Vol. 132. Nos. 1-3. P. 71–78.
10. Moses J. Energy efficient electrical steels: magnetic performance prediction and optimization // Scripta Materialia. 2012. Vol. 67. № 6. P. 560–565.
11. Замалиев Ф. С. Выявление доэксплуатационных напряжений и деформаций стальных балок-ребер сталежелезобетонного перекрытия // Вестник МГСУ. 2013. № 7. С. 33–39.
12. Mirzaee S., Shayesteh S. F., Mahdavi S., Hekmatara S. H. Synthesis, characterization and Monte Carlo simulation of CoFe_2O_4 /Polyvinylpyrrolidone nanocomposites: the coercivity investigation // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2015. Vol. 393. № 11. P. 1–7.

Maystrenko Igor Iurevich

candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: igor_maystr@mail.ru

Zinnurov Tagir Almirovich

candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: leongar@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Maystrenko Tatiana Igorevna

specialist on industrial safety

E-mail: maystrenko1496@mail.ru

Egorova Irina Iurevna

project technician

E-mail: risha9210@gmail.com**Erochin Dmitiy Igorevic**

techic-design

E-mail: erokhin1604@mail.ru**Research and production center «Stroj-Ehkspertiza» LTD**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Kalinin st., 48, off., 506A

**Estimation of road bridges resource indicators based
on the analysis of structural changes and damage accumulation in structural elements****Abstract**

Problem statement. The purpose of the study is to develop a generalized algorithm for analyzing the structural state of bridge structures structural elements, which allows, by selecting control and controlled factors, to assess the resource indicators of bridge structures.

Results. The main results of the study consist in the analysis of the values of the conditional probability of failures at characteristic points of the operating time (at the time of the assessment, to the depth until the next scheduled inspection and to the depth to the expected exhaustion of the project resource), which characterize the reserves of the carrying capacity of the system under the conditions of static strength and fatigue strength (durability).

Conclusions. The significance of the results obtained for the road bridges design consists in improving and optimizing the procedures for calculating the road bridges steel structures for strength and endurance.

Keywords: road bridge, steel structure, durability, structural state analysis, resource, traffic flow.

References

1. Popov B. Ye. Magnetic control of stress-strain state and residual life of pressure vessels // Safety in industry. 2001. № 3. P. 25–30.
2. Mel'guy, Mikhail Aleksandrovich. Pulsed magnetic methods and means of control of mechanical properties of products from ferromagnetic steels. Yekaterinburg, 1993. 45 p.
3. Bida G. V., Gorkunov E. S., Shevnin V. M. Pulsed magnetic methods and means of controlling the mechanical properties of products from ferromagnetic steels. Ekaterinburg : UrO RAN, 2002. 253 p.
4. Matsevityy V. M., Bezlyud'ko G. Ya., Vakulenko K. V., Kazak I. B., Karabin V. V. Some patterns of change in the coercive force of ductile (non-hardened) steels under active tension // Vestnik NTU «KHPI». 2010. P. 19–24.
5. Rodionova Svetlana Sergeyevna. Magnetic control of the structure and mechanical properties of steel products after heat treatment and strain hardening. Yekaterinburg, 2002. 214 p.
6. Zakharov V. A., Ul'yanov A. I., Gorkunov E. S. Regularities of the change in the coercive force under biaxial asymmetric deformation of steel 3 // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2010. Vol. 46. № 3. P. 194–205.
7. Ul'yanov A. I., Chulkina A. A. Magnetic properties of cementite and the coercive force of carbon steels after plastic deformation and annealing // The Physics of Metals and Metallography. 2009. Vol. 107. № 5. P. 439–448.
8. Chulkina A. A., Ul'yanov A. I. Effect of the magnetic properties of cementite on the coercive force of high-carbon steels after quenching and tempering // The Physics of Metals and Metallography. 2009. Vol. 108, № 6. P. 548–555.

9. Thompson S. M., Tanner B. K. The Magnetic Properties of Specially Prepared Pearlitic Steels of Various Carbon Content as a Function of Plastic Deformation // J. Mag. Magn. Mater. 1994. Vol. 132. Nos. 1-3. P. 71–78.
10. Moses J. Energy efficient electrical steels: magnetic performance prediction and optimization // Scripta Materialia. 2012. Vol. 67. № 6. P. 560–565.
11. Zamaliev F. S. Identification of pre-operation stresses and deformation of steel beams-ribsof composite floors // Bulletin of MSUCE. Moscow, 2013. № 7. P. 33–39.
12. Mirzaee S., Shayesteh S. F., Mahdavifar S., Hekmatara S. H. Synthesis, characterization and Monte Carlo simulation of CoFe₂O₄/Polyvinylpyrrolidone nanocomposites: the coercivity investigation // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2015. Vol. 393. № 11. P. 1–7.