УДК 624.94.014.2

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТА ЛОКАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ КОРОБЧАТОГО СЕЧЕНИЯ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ С ЕЗДОВЫМИ БАЛКАМИ ПО ДАННЫМ НЕПРЕРЫВНОГО МОНИТОРИНГА

Грачев А. А., канд. техн. наук
Никитин Г. И.
Плотников Д. Г., канд. техн. наук
Баните А. В.
Бортяков Д. Е., канд. техн. наук
Габриель А. С.

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург*

В статье приведена методика автоматизации расчета локальных напряжений от приложения сосредоточенной нагрузки на дополнительных конструктивных элементах коробчатого сечения пролетных строений с ездовыми балками по данным непрерывного мониторинга для оценки текущего технического состояния и последующего прогнозирования состояния конструкции. Обоснована необходимость применения аналитического подхода к оценке напряженно-деформированного состояния конструкции на начальных стадиях проектирования и технической эксплуатации. Показаны недостатки существующего аналитического подхода к оценке напряжений. С учетом имеющихся ресурсов была разработана и осуществлена приемлемая программа исследования, которая позволила бы получить удовлетворительные результаты. В соответствии с программой проведена серия численных экспериментов с использованием программного обеспечения, дающего возможность моделировать сложные конструкции и решать их с применением метода конечных элементов, направленных на получение массива данных, которые позволили бы повысить точность существующего аналитического решения. С помощью применения программного обеспечения, направленного на обработку массивов научных данных, получены математические зависимости искомых параметров от исходных конструктивных данных. Выведены формулы и исходные данные для вычисления поправочных коэффициентов, которые позволяют повысить точность вычисления локальных напряжений сжатия и изгиба. Эти формулы были совмещены с уже имеющимися аналитическими зависимостями в целях получения несложной методики определения фактических локальных напряжений от приложения опосредованной концентрированной нагрузки. В результате научно-исследовательских изысканий предложен новый способ аналитического определения локальных напряжений изгиба и сжатия в ездовых балках на основании анализа существующей методики и серии численных экспериментов.

Система мониторинга, прогнозирование, техническое состояние, металлическая конструкция, ездовая балка, локальные напряжения

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-2-216-230

Введение

Контроль технического состояния конструкций транспортно-технологических машин и оборудования на протяжении всего жизненного цикла позволит разрабатывать и корректировать дорожные карты технического обслуживания и ремонтов этих объектов.

При использовании технологий непрерывного мониторинга технического состояния инженерных конструкций можно получать наборы данных с датчиков (тензометров, инклинометров, акселерометров и т. д.) для разработки прогнозных моделей технического состояния с учетом воздействия на объект как нагрузок нормального рабочего состояния, так и экстремальных воздействий [1, 2].

Обеспечение безопасной эксплуатации сложных технических систем — одна из приоритетных задач современной промышленности и транспорта [3]. Существенным ее аспектом является обеспечение прочности металлических конструкций крупных транспортных и технологических машин и сооружений транспортной инфраструктуры [4, 5]. При существующем уровне развития технологии не представляется возможным обеспечить безусловную надежность конструкции на этапе проектирования. При моделировании несущей способности конструкций нельзя учесть влияние всех внешних воздействий, а также накопленных повреждений, возникающих при длительной эксплуатации. Поэтому для обеспечения безопасности ответственных объектов используются возможности мониторинга технического состояния конструкции [6–9].

Однако, несмотря на полноту получаемых данных, существенной научной проблемой остается прогнозирование остаточного ресурса конструкции объекта мониторинга [1]. На практике чаще всего применяется анализ трендов, по которому возможно оценить скорость приближения контролируемого параметра к критическому значению, заложенному в проекте. Проблема такого подхода — отсутствие возможности учета локальных напряжений, возникающих в элементах конструкции. Пересчет локальных напряжений по данным цифрового двойника весьма трудоемок и не может дать информацию об уровне указанных напряжений в режиме реального времени. Как следствие, возникает необходимость анализа типовых конструктивных решений для разработки приближенных аналитических методик расчета локальных параметров напряженно деформированного состояния для дальнейшего применения при формировании прогнозов технического состояния.

Цель статьи — исследование локальных напряжений в элементах коробчатого сечения пролетного строения при расположении рельса над стенкой. Подобная

конфигурация характерна, например, для ездовых балок, применяемых в металлических конструкциях грузоподъемных кранов мостового типа.

1. Состояние проблемы

К металлическим конструкциям ответственных машин и сооружений предъявляют особые требования, такие как надежность и долговечность. Эти требования относятся и к кранам различного типа, которые широко используются в разнообразных транспортных и технологических процессах. Основная задача при проектировании металлоконструкции ездовых балок связана с обеспечением прочности и долговечности узла, воспринимающего местное давление от ходовых колес тележки. Все повреждения, вызванные давлением ходовых колес тележки, имеют усталостный характер [10, 11], вследствие чего возникают продольные трещины вдоль поясного шва между поясом и стенкой. Это объясняется тем, что в узле, воспринимающем локальные нагрузки от колеса, возникают высокие местные напряжения. Кроме того, число циклов изменения этих напряжений за срок службы балки обычно превышает число циклов работы крана, т. к. один цикл совершается за проход одного колеса, а по балке движется не менее двух колес.

В ездовых балках наиболее нагружен узел соединения пояса со стенкой, расположенный под рельсом, который называют подрельсовым узлом [12]. Он нагружается сжатием от вертикального давления колеса, а также местным изгибом, который возникает в результате смещения рельса относительно оси стенки. Большое давление, малая длина его распределения, специфические условия контакта колеса с рельсом приводят к состоянию с высоким уровнем напряжений.

На сопротивление усталости подрельсового узла определяющее влияние оказывает местный изгиб стенки. Он возникает из своей плоскости в результате действия целого ряда факторов: эксцентриситета рельса относительно оси стенки, поперечного смещения колеса на рельсе, неплоскостности стенки и пояса над стенкой, а также действия горизонтальной нагрузки. Многие из этих факторов имеют случайный характер. Существует ряд методик определения местных изгибных напряжений в стенке, однако большой разброс параметров нагружения подрельсового узла, как и многообразие сочетаний факторов, обуславливающих местный изгиб, существенно снижают достоверность теоретических оценок. В этой ситуации применение метода конечных элементов может повысить надежность расчета только при наличии достаточно достоверных исходных данных. Для этого должна быть обеспечена точная установка рельса относительно стенки, снижены боковые нагрузки на рельс, сведено к минимуму искривление стенки и пр.

Опыт обследования металлических конструкций крана авторами статьи показывает, что ось кранового рельса редко совпадает с осью подкрановой балки

и нагрузка с рельса передается с некоторым эксцентриситетом, который часто превосходит нормируемое смещение (15 мм) и достигает 40–45 мм. Вместе с увеличением эксцентриситета возрастают сжимающие напряжения с одной стороны стенки. Значения указанных напряжений способны достигать предела текучести материала, а с противоположной стороны могут появиться растягивающие напряжения. В рамках решения задачи об определении локального напряженно-деформированного состояния рельс с поясом можно рассматривать как балку, лежащую на сплошном упругом основании. В результате местного давления рельс с поясом работает на изгиб, а часть стенки балки, представляющая собой упругое основание, — на сжатие. Методика определения напряжений в вертикальной стенке балки от местного воздействия скручивающего момента, возникающего как от вертикальной силы P при действии ее с эксцентриситетом e , так и от горизонтальных приложенных к рельсу сил, разрабатывалась А. А. Апалько [13], О. Ф. Иванковым [14], И. М. Одиным [15], И. Е. Спенглером [16], Г. А. Шапиро [17].

Сложность напряженного состояния и многообразие факторов, влияющих на работу стенки, не позволили получить строгого теоретического решения местного изгиба стенки, и все авторы при решении задачи вводили те или иные упрощения.

Неопределенность передачи нагрузки увеличивается в результате случайного расположения пятен контакта. В верхнем поясе в зоне приложения нагрузки возникают локальные напряжения изгиба σ_x'' и σ_z'' [18]. Распределение этих напряжений на кромке пояса соизмеримы с напряжениями от общего изгиба балки и, суммируясь с общими напряжениями, могут привести к раннему развиту пластичности.

2. Методика исследования

Действующие методики расчета с помощью метода конечных элементов проверялись на основе результатов натурных испытаний статьи [19], выпущенной в журнале «Труды Ленинградского политехнического института» под авторством д. т. н. профессора С. А. Соколова. В статье «Местные напряжения от давления колеса в коробчатой балке в стенке над рельсом» была проверена формула Б. М. Броуде [20] с учетом эксцентриситета. Результаты аналитических формул сопоставили с показаниями тензометров, закрепленных на коробчатых балках. В результате описанного в статье исследования данные, полученные от двух методов исследования, были примерно одинаковыми, что говорило о высокой степени точности предложенных формул.

Для определения локальных напряжений сжатия и изгиба воспользовались формулой Броуде [20], в которую ввели два дополнительных коэффициента: условную ширину пояса и эксцентриситет рельса. Локальные напряжения сжатия определяются следующим образом:

$$\sigma^{\text{сж}} = \frac{P \xi}{\delta_c (\lambda + 2e)}, \quad (1)$$

где P — вертикальная сосредоточенная нагрузка; ξ — коэффициент, учитывающий разгружающее влияние вертикальных ребер жесткости; δ_c — толщина стенки; λ — приведенная длина зоны распределения локального сжатия, e — эксцентриситет.

Приведенную длину зоны распределения локального сжатия можно определить по формуле:

$$\lambda = 3,26 \sqrt[3]{J / \delta_c},$$

где $J = J_p + J_{\Pi}$ — суммарный момент инерции (J_p — момент инерции рельса; J_{Π} — момент инерции пояса).

Коэффициент ξ зависит от суммарного момента инерции J и расстояния между осями диафрагм балки, l :

$$\xi = \frac{1}{0,95(1 + 23 \frac{J}{l^3 \delta_c})}.$$

Локальные напряжения изгиба могут быть определены по следующей зависимости:

$$\sigma^{\text{изг}} = \frac{3 P e R_l}{\delta_c^3 \Lambda \left(1 + \frac{S_c \delta_n^3}{S_n \delta_c^3} \right)}, \quad (2)$$

где R_l — коэффициент влияния опор; Λ — характеристическое выражение балки на упругом основании; S_c , S_n — гиперболические функции; μ — коэффициент Пуассона; h — высота коробчатой балки; b — внутреннее расстояние от стенки до стенки:

$$\Lambda = 1,66 \sqrt[4]{\frac{S_n J_p e^2 l (1 - \mu^2)}{\delta_n \left(1 + \frac{\delta_c^3}{\delta_n^3} \right)}}.$$

Гиперболические функции S_c , S_n зависят от геометрических параметров балки:

$$S_c = h a c t h^2 a h - c t h a h - a h;$$

$$S_{\Pi} = b \operatorname{acth}^2 ab - c \operatorname{th} ab - ab;$$

$$a = \pi / l;$$

$$\eta_x = e^{-\frac{x}{l}} \left(\cos \frac{x}{\Lambda} + \sin \frac{x}{\Lambda} \right).$$

Проверка предложенных расчетных формул осуществлялась замером показателей тензометров, установленных на двух коробчатых балках. Геометрические характеристики и расчетная схема исследуемых балок представлена на рис. 1 и в табл. 1. Для оценки качества аналитической методики [10] провели серию численных экспериментов в среде Femap.

Рис. 1. Расчетная схема коробчатой балки

Таблица 1. Геометрические характеристики коробчатой балки

№ экс-перимента	Индекс модели	Геометрические характеристики модели, мм									P	Марка стали
		δ_n	δ_c	δ_d	l	b	b_{cb}	h	b_p	h_p		
1	M1.1	10	6	6	400	200	25	404	20	20	2	Ст3
2	M1.2	10	6	6	400	200	25	404	40	40	2	
3	M2	18	5	4	400	400	50	428	57	40	10	

3. Анализ полученных результатов и выводы

Расчет был выполнен методом конечных элементов в проектно-вычислительном комплексе Femap with NX Nastran. Комплекс реализует конечно-элементное моделирование статических и динамических расчетных схем, проверку

устойчивости, выбор невыгодных сочетаний усилий, проверку несущей способности стальных конструкций. Расчетная схема в среде Femap with NX Nastran представлена на рис. 2. Геометрические характеристики исследуемых балок представлены в табл. 2. Результаты, полученные при аналитическом и численном моделировании, представлены на рис. 3 и 4.

Рис. 2. Расчетная схема и расчетная модель после разбиения на конечные элементы в среде Femap

Таблица 2. Геометрические характеристики исследуемых балок

№ балки	Геометрические характеристики модели, мм						P , тс
	δ_n	δ_c	δ_d	l	b	$b_{св}$	
1	12	6	6	400	200	25	2
2	20	10					
3	28	14					
4	36	18					
5	40	20					

Сравнение результатов расчета локальных напряжений с применением аналитической методики [20] и с помощью метода конечных элементов показывает значительное расхождение. Аналитический метод расчета демонстрирует результаты, значительно превышающие полученные на основании численного эксперимента.

Однако количества натурных испытаний (3 шт.), приведенных в статье [19], недостаточно, чтобы сделать заключение о некорректности применения методики [20] для оценки локальных напряжений в общем случае. Поэтому было

Рис. 3. Сравнение результатов, полученных для сжимающих напряжений $\sigma^{сж}$ (сплошная линия — аналитическое решение, штриховая — численное моделирование)

Рис. 4. Сравнение результатов, полученных для изгибных напряжений $\sigma^{изг}$ (сплошная линия — аналитическое решение, штриховая — численное моделирование)

принято решение провести серию численных экспериментов с различными геометрическими характеристиками сечения балки и рельса. Сечение рельса для численного эксперимента было выбрано квадратное, а размеры варьировались от 20×20 мм до 50×60 мм. Всего было выбрано 10 вариантов исполнения рельсов: 20×20 мм; 20×40 мм; 30×20 мм; 30×40 мм; 30×60 мм; 40×40 мм; 40×60 мм; 50×40 мм; 50×50 мм; 50×60 мм. Это исследование позволило получить массив данных, позволяющих оценить целесообразность использования проверяемой методики [20] для расчета напряжений в подрельсовом узле.

Обработка результатов серии численных экспериментов показала, что расчетные значения локальных напряжений, полученные аналитическим методом, превышают значения, полученные путем численного моделирования на всем диапазоне варьируемых параметров. В среднем указанное превышение для 50 проведенных опытов составило 0,8 для изгибающих и сжимающих напряжений. Для наглядности представлены графики, показывающие зависимость напряжений от эксцентриситета для двух вариантов анализа (рис. 5).

Рис. 5. Зависимость напряжений от эксцентриситета для двух исследований

Можно сделать вывод о том, что предложенные в [19] формулы (1) и (2) для вычисления локальных напряжений нуждаются в корректировке. Авторы предлагают учесть эту корректировку путем введения безразмерных коэффициентов $\psi^{сж}$ и $\psi^{изг}$ для определения локальных напряжений сжатия и изгиба в коробчатой ездовой балке соответственно.

Безразмерный коэффициент для каждого расчета определялся из равенства произведения значений напряжений, полученным по формулам (1) и (2) с данными конечно-элементного анализа.

В результате обработки полного массива результатов удалось выявить закономерность формирования безразмерного коэффициента и определить формулы для его вычисления.

Так, на основании преобразования формулы (1) локальные напряжения сжатия, могут быть вычислены как

$$\sigma^{\text{сж}} = \frac{P \xi}{\delta_c (\lambda + 2e)} \psi^{\text{сж}}(e),$$

где поправочный коэффициент $\psi^{\text{сж}}$ будет функцией эксцентриситета и аппроксимируется выражением:

$$\psi^{\text{сж}}(e) = \begin{cases} k_{\text{сж}} e + b_{\text{сж}}^{\text{ср}}, & 0 < e \leq 30 \\ \chi_{\text{сж}}, & e > 30 \end{cases}.$$

Коэффициент $\psi^{\text{сж}}$ выбирается в зависимости от $j_r b_{\text{сж}}^{\text{ср}}; b_{\text{изг}}^{\text{ср}}$ — смещение относительно оси ОУ, $\chi_{\text{сж}}; \chi_{\text{изг}}$ — величина отсечки, при которой коэффициент меняется в дальнейшем незначительно и выбирается в зависимости от j_r — отношения моментов инерции (момента инерции рельса к поясу); $k_{\text{сж}}; k_{\text{изг}}$ — коэффициенты поправки функции.

Локальные напряжения изгиба вычисляются в соответствии с предложенным подходом и формулой (2):

$$\sigma^{\text{изг}} = \frac{3 P e R_l}{\delta_c^3 \Lambda \left(1 + \frac{S_c \delta_{\text{п}}^3}{S_{\text{п}} \delta_c^3} \right)} \psi^{\text{изг}}(e),$$

где поправочный коэффициент $\psi^{\text{изг}}$ вычисляется аналогично предыдущему случаю:

$$\psi^{\text{изг}}(e) = \begin{cases} k_{\text{изг}} e + b_{\text{изг}}^{\text{ср}}, & 0 < e \leq 30 \\ \chi_{\text{изг}}, & e > 30 \end{cases}.$$

Заключение

В результате работы были определены выражения для вычисления локальных напряжений сжатия и сгиба в ездовых балках коробчатого сечения. В выражения (3) и (4) в качестве расчетного параметра входит величина нагрузки P . Она определяется на основании данных системы непрерывного мониторинга инженерных конструкций либо прямым методом, либо с помощью методики, описанной в статье [3]. Таким образом, в режиме реального времени могут быть получены как значения локальных напряжений в заданном узле, так и их размах. На основании этих данных можно рассчитать долговечность рассматриваемого узла металлоконструкции под воздействием циклических нагрузок и скорректировать дорожную карту технического обслуживания в соответствии с прогнозом долговечности.

Предложенные функциональные зависимости имеют достаточно простой вид и могут быть легко применимы в случаях, когда требуется получить более точный результат, не прибегая к специальным программным пакетам с использованием метода конечных элементов. В то же время существуют ограничения по их применению, вызванные высокой степенью вариативности рассматриваемых элементов конструкций. Чтобы устранить этот недостаток, необходимо спланировать (на основании существующих границ применимости) и провести дополнительные численные эксперименты для определения предельных границ применимости предложенных зависимостей с учетом достаточной достоверности получаемого результата. Если будут получены неудовлетворительные результаты, нужно провести дополнительные исследования, которые бы позволили охватить максимально возможную область имеющихся конструктивных решений по части подобных конструкций, а также предусмотреть дальнейшее развитие современной металлургии и применение новых материалов и технологий.

Однако существующие недостатки не отменяют того, что применение новых, более точных методик повысят надежность оценки состояния и прогнозирования остаточного ресурса сложных объектов промышленного транспорта при совместном использовании систем непрерывного мониторинга.

Библиографический список

1. Осадчий Г. В., Шинкаренко А. В., Плотников Д. Г., Баните А. В. Принципы построения универсальной платформы непрерывного мониторинга технического состояния инфраструктурных объектов // Автоматика на транспорте. – 2020. – Т. 6. – № 4. – С. 484–498.
2. Sokolov S. Analysis of the Fatigue Strength of Welds in Terms of Local Stress. ISSN 1068-798X, Russian Engineering Research. – 2018. – Vol. 38. – No. 3. – Pp. 151–156. – DOI 10.3103/S1068798X18030218.
3. Sokolov S. A., Plotnikov D. G., Grachev A. A., Lebedev V. A. Evaluation of loads applied on engineering structures based on structural health monitoring data // International Review of Mechanical Engineering. – 2020. – No. 14 (2). – Pp. 146–150. DOI: 10.15866/ireme.v14i2.18269.
4. Соколов С. А. Строительная механика и металлические конструкции машин: учебник. – СПб.: Политехника, 2011. – 450 с.
5. Долинский К. Ю., Белый А. А., Осадчий Г. В. Технические решения по мониторингу инженерных конструкций искусственных сооружений // Мир дорог. – 2013. – № 73. – С. 39–41.
6. Belyi A. A., Karapetov E. S., Efimenko Yu. I. Structural Health and Geotechnical Monitoring During Transport Objects Construction and Maintenance (Saint-Petersburg Example) // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 189. – Pp. 145–151. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.024.
7. Ефанов Д. В., Осадчий Г. В., Плотников Д. Г., Шинкаренко А. В. Универсальные системы мониторинга как жизненно важные составляющие высокоимунных транспортных систем // Транспорт Российской Федерации. – 2020. – № 5. – С. 20–26.

8. Ефанов Д. В., Мячин В. Н., Осадчий Г. В., Зуева М. В. Выбор способа фильтрации диагностических данных в системах непрерывного мониторинга объектов транспортной инфраструктуры // Транспорт Российской Федерации. – 2020. – № 2. – С. 35–40.
9. Smarsly K., Hartmann D. Autonomous Monitoring of Masonry Dams Based on Multi-Agent Technology // The 4th Congress on Dams, Struga, Republic of Macedonia, 28–30 September 2017. – Pp. 1–10.
10. Sokolov S., Grachev A. Local criterion for strength of elements of steel-work. Mechanical Engineering Research and Education // International Review of Mechanical Engineering. – 2018. – Vol. 12. – No. 5. – Pp. 448–453.
11. Shlepetinsky A. Yu., Manzhula K. P., Savelyev A. G. Trajectory and growth speed of fatigue cracks due to poor weld fusion in a weld joint // Transport Engineering and Technology. – 2019. – No. S13. – P. 46.
12. Кикин А. И., Сабуров В. Ф. Исследование подкранового пути на низкомодульных прокладках // Пром. стр-во. – 1975. – М8.
13. Апалько А. А. Напряженное состояние стенок сварных подкрановых балок под действием местных статических нагрузок: автореф. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. – М., 1960.
14. Иванков О. Ф. Исследование местных напряжений в стенках сварных подкрановых балок различной конструктивной формы при центральном и внецентральном приложении нагрузок: автореф. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. – Днепропетровск, 1969.
15. Один И. М. К расчету напряжений в стенках подкрановых балок от смещения рельса // Пром. стр-во. – 1962. – № 3.
16. Спенглер И. Е. Экспериментальное исследование работы подкрановых балок // Сб. тр. МИСИ им. В. В. Куйбышева. – М., 1950. – № 7.
17. Шапиро Г. А. Действительная работа стальных конструкций промышленных цехов. – М., 1952.
18. Manzhula K. P., Valiulina A. A. Local Buckling of Curvilinear Plates in Axial Compression // Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2021. – Pp. 112–121.
19. Соколов С. А., Юшкевич В. Н., Якубовский Ю. Е. Местные напряжения от давления колеса в крановых коробчатых балках с рельсом над стенкой // Тр. ЛПИ-Л. – 1978. – № 362.
20. Броуде Б. М. Распределение сосредоточенного давления в металлических балках. – М., 1950.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Д. В. Ефановым
Поступила в редакцию 02.03.2021, принята к публикации 19.03.2021*

ГРАЧЕВ Алексей Андреевич — кандидат технических наук, директор Высшей школы транспорта Института машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого
grachev_aa@spbstu.ru

НИКИТИН Георгий Игоревич — инженер-исследователь СПбПУ, Институт передовых производственных технологий, отдел кросс-отраслевых технологий
dxdedk@gmail.com

ПЛОТНИКОВ Дмитрий Георгиевич — кандидат технических наук, генеральный директор ООО «Робо-ТеК», доцент Высшей школы транспорта Института машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого
plotnikov_dg@spbstu.ru

БАНИТЕ Аушра Владовна — ассистент Высшей школы транспорта Института машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого
banite_av@spbstu.ru

БОРТЯКОВ Данил Евгеньевич — кандидат технических наук, доцент Высшей школы транспорта Института машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого
bortyakov_de@spbstu.ru

ГАБРИЕЛЬ Антон Сергеевич — старший преподаватель Высшей школы автоматизации и робототехники Института машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого
gabriel_as@spbstu.ru

© Грачев А. А., Никитин Г. И., Плотников Д. Г.,
Баните А. В., Бортяков Д. Е., Габриель А. С., 2021

Grachev A. A., PhD in Engineering
Nikitin G. I.
Plotnikov D. G., PhD in Engineering
Banite A. V., Assistant
Bortiakov D. E., PhD in Engineering
Gabriel A. S.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg

AUTOMATION OF LOCAL VOLTAGE CALCULATION IN BOX-SECTIONAL ELEMENTS OF SPAN STRUCTURES WITH RUNNING BEAMS ACCORDING TO CONTINUOUS MONITORING DATA

The article presents a technique for automating the calculation of local stresses from the application of a concentrated load on additional structural elements of box-section spans with riding beams based on continuous monitoring data to assess the current technical condition and then predict the state of the structure. The necessity of applying an analytical approach to assessing the stress-strain state of a structure at the initial stages of design and technical operation has been substantiated. The drawbacks of the existing analytical approach to stress assessment are shown. Taking into account the available resources, an acceptable research program was developed and implemented, which would lead to satisfactory results. In accordance with the program, a series of numerical experiments

was carried out using software that makes it possible to simulate complex structures and solve them using the finite element method, aimed at obtaining an array of data, the use of which would improve the accuracy of the existing analytical solution. By using software aimed at processing scientific data arrays, mathematical dependences of the required parameters on the initial constructive data were obtained. Formulas and initial data were obtained for calculating correction factors, which improve the accuracy of calculating local compressive and bending stresses. These formulas were combined with the already existing analytical dependencies in order to obtain a simple and easily applicable method for determining the actual local stresses from the application of an indirect concentrated load. As a result of scientific research, a new method for the analytical determination of local bending and compression stresses in riding beams was proposed on the basis of an analysis of the existing methodology and a series of numerical experiments.

Monitoring system, forecasting, technical condition, metal structure, riding beam, local stresses

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-2-216-230

References

1. Osadchiy G. V., Shinkarenko A. V., Plotnikov D. G., Banite A. V. (2020) Printsipy postroyeniya universal'noy platformy nepreryvnogo monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya infrastrukturykh ob'yektov [Principles of building a universal platform for continuous monitoring of the technical condition of infrastructure facilities]. *Avtomatika na transporte [Transport Automation]*, vol. 6, no. 4, pp. 484–498. (In Russian)
2. Sokolov S. (2018) Analysis of the Fatigue Strength of Welds in Terms of Local Stress. *Russian Engineering Research*, ISSN 1068–798X. vol. 38, no. 3, pp. 151–156. DOI 10.3103/S1068798X18030218.
3. Sokolov S. A., Plotnikov D. G., Grachev A. A., Lebedev V. A. (2020) Evaluation of loads applied on engineering structures based on structural health monitoring data. *International Review of Mechanical Engineering*, no. 14 (2), pp. 146–150. DOI: 10.15866/ireme.v14i2.18269.
4. Sokolov S. A. (2011) *Stroitel'naya mekhanika i metallicheskiye konstruksii mashin: Uchebnik [Building mechanics and metal structures of machines: Textbook]*. Saint Petersburg, Politehnika Publ., 450 p. (In Russian)
5. Dolinskiy K. Yu., Belyy A. A., Osadchiy G. V. (2013) Tekhnicheskiye resheniya po monitoringu inzhenernykh konstruktivnykh sooruzheniy [Technical solutions for monitoring engineering structures of artificial structures]. *Mir dorog [World of roads]*, no. 73, pp. 39–41. (In Russian)
6. Belyi A. A., Karapetov E. S., Efimenko Yu. I. (2017) Structural Health and Geotechnical Monitoring During Transport Objects Construction and Maintenance (Saint-Petersburg Example). *Procedia Engineering*, vol. 189, pp. 145–151. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.024.
7. Efanov D. V., Osadchiy G. V., Plotnikov D. G., Shinkarenko A. V. (2020) Universal'nyye sistemy monitoringa kak zhizненно vazhnyye sostavlyayushchiye vysokoimunnykh transportnykh sistem [Universal monitoring systems as vital components of high-immune transport systems]. *Transport Rossiyskoy Federatsii [Transport of the Russian Federation]*, no. 5, pp. 20–26. (In Russian)
8. Efanov D. V., Myachin V. N., Osadchiy G. V., Zueva M. V. (2020) Vybor sposoba fil'tratsii diagnosticheskikh dannykh v sistemakh nepreryvnogo monitoringa ob'yektov transportnoy infrastruktury [Choosing a method for filtering diagnostic data in continuous monitoring systems of transport infrastructure objects]. *Transport Rossiyskoy Federatsii [Transport of the Russian Federation]*, no. 2, pp. 35–40. (In Russian)

9. Smarsly K., Hartmann D. (2017) Autonomous Monitoring of Masonry Dams Based on Multi-Agent Technology. *The 4th Congress on Dams, Struga*, Republic of Macedonia, 28–30 September 2017, pp. 1–10.
10. Sokolov S., Grachev A. (2018) Local criterion for strength of elements of steel-work. Mechanical Engineering Research and Education. *International Review of Mechanical Engineering*, vol. 12, no. 5, pp. 448–453.
11. Shlepetinsky A. Yu., Manzhula K. P., Savelyev A. G. (2019) Trajectory and growth speed of fatigue cracks due to poor weld fusion in a weld joint. *Transport Engineering and Technology*, no. S13, p. 46.
12. Kikin A. I., Saburov V. F. (1975) Issledovaniye podkranovogo puti na nizkomodul'nykh prokladkakh [Investigation of the crane runway on low-modulus gaskets]. *Promyshlennoye stroitel'stvo [Industrial Engineering]*, M 8. (In Russian)
13. Apal'ko A. A. (1960) *Napryazhennoye sostoyaniye stenok svarnykh podkranovykh balok pod deystviyem mestnykh staticheskikh nagruzok*. Avtoref. na soisk. uchen. stepeni kand. tekhn. nauk [The stressed state of the walls of the welded crane girders under the influence of local static loads. Extended abstract of Cand. of tech. sciences dissertation]. Moscow. (In Russian)
14. Ivankov O. F. (1969) *Issledovaniye mestnykh napryazheniy v stenkakh svarnykh podkranovykh balok razlichnoy konstruktivnoy formy pri tsentral'nom i vnetsentral'nom prilozhenii nagruzok*. Avtoref. na soisk. uchen. stepeni kand. tekhn. nauk [Study of local stresses in the walls of welded crane girders of various structural shapes at central and off-center application of loads. Extended abstract of Cand. of tech. sciences dissertation]. Dnepropetrovsk. (In Russian)
15. Odin I. M. (1962) K raschetu napryazheniy v stenkakh podkranovykh balok ot smeshcheniya rel'sa [To the calculation of stresses in the walls of crane girders from the displacement of the rail]. *Promyshlennoye stroitel'stvo [Industrial Engineering]*, no. 3. (In Russian)
16. Spengler I. E. (1950) Eksperimental'noye issledovaniye raboty podkranovykh balok [Experimental study of crane girders]. *Sb. tr./MISI im. V. V. Kuybysheva [Proceedings/Moscow Civil Engineering Institute named after V. V. Kuibyshev]*, no. 7. (In Russian)
17. Shapiro G. A. *Deystvitel'naya rabota stal'nykh konstruktsiy promyshlennykh tsekhov* [The actual work of steel structures in industrial workshops]. Moscow, 1952. (In Russian)
18. Local Buckling of Curvilinear Plates in Axial Compression. Manzhula K. P., Valiulina A. A. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2021, pp. 112–121.
19. Sokolov S. A., Yushkevich V. N., Yakubovsky Yu. E. (1978) Mestnyye napryazheniya ot davleniya koleasa v kranovykh korobchatykh balkakh s rel'som nad stenkoy [Local stresses from wheel pressure in crane box girders with a rail above the wall]. *Trudy LPI [Proceedings of the Leningrad Polytechnical institute]*, no. 362. (In Russian)
20. Broude B. M. (1950) *Raspredeleniye sosredotochennogo davleniya v metallicheskiykh balkakh* [Distribution of concentrated pressure in metal beams]. Moscow. (In Russian)