

УДК: 539.3/6

ПОВЫШЕНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ МОСТОВЫХ КРАНОВ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА К ПРОЕКТИРОВАНИЮ И УПРОЧНЕНИЮ

Медведев Даниил Сергеевич¹, студент

e-mail: admeralrommars@gmail.com

Никитаев Игорь Владимирович¹, кандидат технических наук, доцент

e-mail: inikitaev@bk.ru

¹ Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. В статье рассмотрены основные факторы, определяющие низкую усталостную долговечность типовых сварных подкрановых балок мостовых кранов тяжелых режимов работы (7К, 8К). Выполнен анализ напряженно-деформированного состояния стенки балки с учетом разноасимметричности циклов нормальных и касательных напряжений, возникающих при движении крана. Показано, что традиционные методы расчета, основанные на раздельном учете усилий, не позволяют достоверно оценить ресурс конструкции. Предложен комплексный подход к повышению долговечности, включающий: 1) применение двухстенчатых подкрановых балок, обеспечивающих снижение локальных напряжений и исключение местного кручения стенки; 2) использование вероятностных методов оценки надежности на основе характеристики безопасности; 3) внедрение технологий поверхностного пластического деформирования сварных швов и усиления композитными материалами (углепластиком). Экспериментальные данные и опыт эксплуатации подтверждают, что реализация предложенных решений позволяет увеличить усталостный ресурс в 5–10 раз по сравнению с типовыми конструкциями.

Ключевые слова: мостовой кран, подкрановая балка, усталостная прочность, двухстенчатая балка, концентрация напряжений, поверхностное упрочнение, углепластик, остаточный ресурс.

INCREASING THE FATIGUE LIFE OF METAL STRUCTURES OF BRIDGE CRANES BASED ON AN INTEGRATED APPROACH TO DESIGN AND STRENGTHENING

Daniil S. Medvedev¹, Student

e-mail: admeralrommars@gmail.com

Igor V. Nikitaev¹, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

e-mail: inikitaev@bk.ru

¹ Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article considers the main factors determining the low fatigue life of typical welded overhead crane girders of heavy-duty overhead cranes (7K, 8K). The stress-strain state of the beam web is analyzed taking into account the heterogeneous asymmetry of normal and shear stress cycles

arising during crane movement. It is shown that traditional calculation methods based on separate consideration of forces do not allow for a reliable assessment of the service life of the structure. An integrated approach to increasing durability is proposed, including: 1) the use of double-walled overhead crane girders, which reduce local stresses and eliminate local torsion of the web; 2) the use of probabilistic methods for reliability assessment based on safety characteristics; 3) the introduction of technologies for surface plastic deformation of welded joints and reinforcement with composite materials (carbon fiber reinforced plastic). Experimental data and operating experience confirm that the implementation of the proposed solutions allows for an increase in the fatigue life by 5-10 times compared to typical designs.

Keywords: overhead crane, overhead crane beam, fatigue strength, double-walled beam, stress concentration, surface hardening, carbon fiber reinforced plastic, residual life.

Введение

Мостовые краны являются основным видом подъемно-транспортного оборудования в металлургии, машиностроении и других отраслях промышленности. Их металлоконструкции, в особенности подкрановые балки, эксплуатируются в условиях сложного напряженно-деформированного состояния под действием циклических подвижных нагрузок. Практика эксплуатации показывает, что для кранов групп режимов 7К и 8К первые усталостные трещины в верхней зоне стенки сварных балок появляются уже через 2–3 года [1, 2], что существенно ниже нормативных сроков службы.

Несмотря на значительное количество работ, посвященных исследованию напряженного состояния подкрановых балок [3–5], вопросы комплексной оценки их усталостной долговечности с учетом реальной картины нагружения остаются недостаточно изученными. Традиционные методы расчета [6] не учитывают разнесимметричность циклов компонентов плоского напряженного состояния, что приводит к значительной погрешности при определении ресурса [7].

Целью настоящей работы является разработка комплексного подхода к повышению усталостной долговечности металлоконструкций мостовых кранов, включающего усовершенствованные методы расчета, рациональные конструктивные решения и современные технологии упрочнения.

Материалы и методы исследования

В работе использованы результаты натурных обследований подкрановых конструкций, данные экспериментальных исследований усталостной прочности [8–10], а также результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS [11].

Анализ напряженного состояния выполнялся для типовой подкрановой балки пролетом 12 м под мостовой кран грузоподъемностью 500 кН с нормативным давлением колеса $F_n = 380 \text{ кН}$ [7]. Рассматривались три группы усилий: усилия общего изгиба, местное давление колеса на стенку и местное кручение верхнего пояса.

Для каждой из характерных точек стенки определялись компоненты напряжений. Приведенные напряжения вычислялись по формуле энергетического критерия прочности:

$$\sigma_{ef} = \sqrt{(\Sigma\sigma)^2 - \Sigma\sigma \cdot \Sigma\sigma_{loc} + (\Sigma\sigma_{loc})^2 + 3(\Sigma\tau)^2} \quad (1)$$

где $\Sigma\sigma = \sigma_x + \sigma_{locx} + \sigma_{fx}$, $\Sigma\sigma_{loc} = \sigma_{locy} + \sigma_{fy}$, $\Sigma\tau = \tau_{xy} + \tau_{locxy} + \tau_{fxy}$.

Оценка усталостной долговечности выполнялась с использованием принципа линейного суммирования повреждений Пальмгрена–Майнера и нормативной кривой выносливости по СП 16.13330.2017 [6].

Результаты и их обсуждение

1. Анализ напряженного состояния типовой балки

Расчеты показали, что при движении крана компоненты плоского напряженного состояния имеют различную асимметрию циклов. Для нормальных суммарных напряжений $\Sigma\sigma$ характерен отнулевой цикл ($\rho = \sigma_{min}/\sigma_{max} = 0$) тогда как касательные напряжения $\Sigma\tau$ изменяются по почти симметричному циклу ($\rho = -0,81 \dots -0,99$) [7]. Это принципиально важно, поскольку допускаемые напряжения для разных типов циклов различаются в несколько раз.

На рис. 1 представлена расчетная схема и сечение типовой подкрановой балки, а также характерные точки, для которых проводился анализ напряженного состояния.

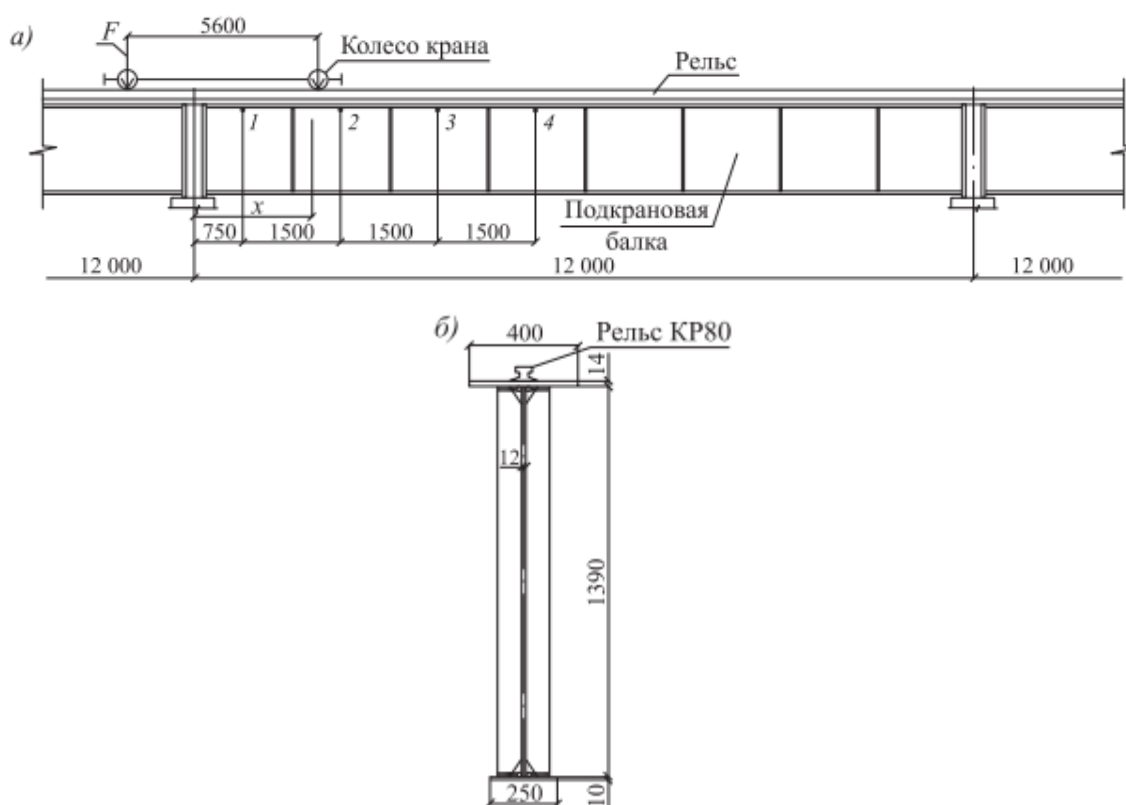


Рисунок 1 – Расчетная схема (а) и сечение (б) типовой подкрановой балки [7]

Предельное число циклов до разрушения для каждой из характерных точек определялось по зависимостям, полученным из уравнения кривой усталости СП 16.13330. Результаты, приведенные в табл. 1, показывают, что предельное количество проездов колес крана составляет $0,67 \cdot 10^6$, а с учетом перемещения без груза $-0,257 \cdot 10^6$ полных циклов. При интенсивности работы $1,0 \cdot 10^6$ циклов за 20 лет это соответствует сроку службы около 5 лет, что хорошо коррелирует с данными натурных обследований [2].

Таблица 1. Число циклов до усталостного разрушения типовой подкрановой балки [7]

Точка	$\Sigma\sigma$	$\Sigma\tau$	Совместное действие
1	$2,56 \cdot 10^6$	$1,19 \cdot 10^6$	$0,81 \cdot 10^6$
2	$1,97 \cdot 10^6$	$1,19 \cdot 10^6$	$0,74 \cdot 10^6$
3	$1,60 \cdot 10^6$	$1,19 \cdot 10^6$	$0,68 \cdot 10^6$
4	$1,50 \cdot 10^6$	$1,19 \cdot 10^6$	$0,67 \cdot 10^6$

2. Эффективность двухстенчатых подкрановых балок

В качестве альтернативного конструктивного решения предложена двухстенчатая подкрановая балка (рис. 2), запатентованная и прошедшая промышленную апробацию [12]. Наличие второй стенки такой же толщины приводит к:

1. увеличению моментов инерции и сопротивления сечения;
2. снижению всех компонентов напряжений в стенке в 1,5–2 раза;
3. отсутствию локального изгиба стенки от крутящего момента, поскольку кручение воспринимается двумя стенками.

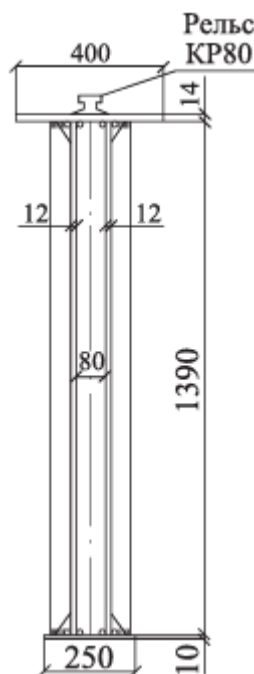


Рисунок 2 – Сечение двухстенчатой подкрановой балки [12]

Расчеты показали, что для двухстенчатой балки предельное число полных циклов составляет $2,6 \cdot 10^6$ (табл. 2), что в 5 раз превышает ресурс типовой балки. При тех же режимах нагружения срок службы увеличивается с 5 до 25 лет.

Таблица 2. Число циклов до разрушения двухстенчатой подкрановой балки [7]

Точка	$\Sigma\sigma$	$\Sigma\tau$	Совместное действие
1	$9,14 \cdot 10^6$	$4,57 \cdot 10^6$	$3,05 \cdot 10^6$
2	$8,14 \cdot 10^6$	$4,57 \cdot 10^6$	$2,93 \cdot 10^6$
3	$6,02 \cdot 10^6$	$4,57 \cdot 10^6$	$2,60 \cdot 10^6$
4	$5,96 \cdot 10^6$	$4,57 \cdot 10^6$	$2,59 \cdot 10^6$

Опыт эксплуатации двухстенчатых балок на объектах ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат» в течение более 20 лет подтверждает их высокую надежность и отсутствие усталостных повреждений.

3. Технологические методы повышения долговечности

Для повышения усталостной прочности сварных соединений и зон концентрации напряжений эффективно применение шарико-стержневого упрочнителя (ШСУ) [13]. На рис. 3 представлены результаты усталостных испытаний тавровых соединений в исходном состоянии, после аргонодуговой обработки и после обработки ШСУ.

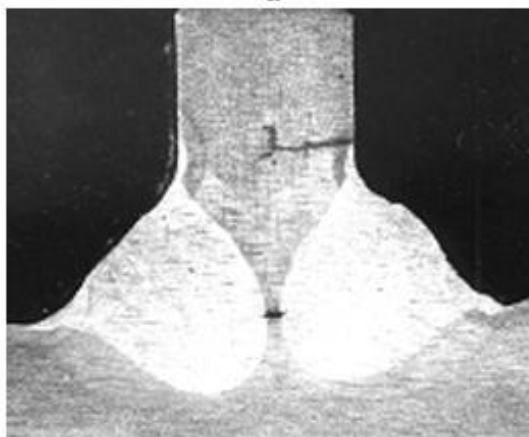


Рисунок 3 – Результаты усталостных испытаний тавровых соединений [13]

Экспериментальные данные свидетельствуют о повышении предела выносливости в 2 раза (с 70 до 140 МПа), а долговечности – в 8–10 раз при одинаковых уровнях напряжений [13]. Поверхностная пластическая обработка создает в поверхностном слое остаточные сжимающие напряжения, измельчает зеренную структуру и увеличивает твердость, что препятствует зарождению и распространению усталостных трещин.

Другим перспективным методом является усиление поврежденных балок углепластиковыми пластинами. Численное моделирование в ANSYS [11] показало, что наклейка пластин из углепластика на растянутую зону снижает коэффициент интенсивности напряжений в вершине трещины и замедляет ее рост. Применение двух армирующих слоев увеличивает усталостную долговечность в 2 раза по сравнению с одним слоем.

Выводы и рекомендации

1. Низкая усталостная долговечность типовых сварных подкрановых балок обусловлена сложным напряженным состоянием стенки с разноасимметричными циклами нормальных и касательных напряжений, что не в полной мере учитывается действующими нормативными методами расчета. Предельное количество полных циклов для типовой балки составляет $0,257 \cdot 10^6$, $0,257 \cdot 10^6$, что при интенсивной эксплуатации соответствует сроку службы около 5 лет.

2. Для кранов тяжелых режимов работы (7К, 8К) наиболее эффективным конструктивным решением являются двухстенчатые подкрановые балки (рис. 2), обеспечивающие пятикратное увеличение ресурса по сравнению с типовыми балками за счет снижения уровня напряжений и исключения местного кручения стенки.

3. Применение технологий поверхностного пластического деформирования (шарико-стержневое упрочнение) позволяет повысить предел выносливости сварных соединений в 2 раза, а долговечность – в 8–10 раз (рис. 3). Усиление поврежденных балок

углепластиковыми композитами также является эффективным методом восстановления их несущей способности и замедления роста усталостных трещин.

4. Рекомендуются внедрение комплексного подхода к обеспечению усталостной долговечности, включающего: а) применение двухстенчатых балок при проектировании новых крановых путей; б) использование вероятностных методов оценки остаточного ресурса; в) своевременное усиление зон концентрации напряжений композитными материалами и поверхностным упрочнением.

Список литературы

1. Кикин А.И., Васильев А.А., Кошутин Б.Н. и др. Повышение долговечности металлических конструкций промышленных зданий. – М.: Стройиздат, 1984. – 302 с.
2. Беленя Е.И., Балдин В.А., Ведерников Ю.А. и др. Особенности действительной работы подкрановых конструкций // Металлические конструкции в строительстве. – М.: МИСИ, 1979. – Вып. 152. – С. 3–28.
3. Складнев А.И. Напряженное состояние стенок стальных подкрановых балок. – М.: Изд-во АСВ, 2017. – 152 с.
4. Сабуров В.Ф., Серебренникова Е.Н., Фердер А.В. О некоторых особенностях формирования напряженно-деформированного состояния в стенке подкрановых балок при движении крана // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2022. – Т. 22, № 2. – С. 14–20.
5. Туснина О.А. Анализ местных напряжений в стенке подкрановой балки // Промышленное строительство. – 2022. – № 10. – С. 20–26.
6. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. – М.: Стандартинформ, 2017. – 148 с.
7. Складнев А.И. Особенности циклического нагружения и рационального проектирования стальных подкрановых балок // Известия вузов. Строительство. – 2025. – № 9. – С. 5–18.
8. Спенглер И.Е. Экспериментальное исследование работы подкрановых балок // Труды МИСИ. – 1950. – № 7. – С. 121–158.
9. Громацкий В.А. Экспериментально-теоретическое исследование работы клепаных подкрановых балок: дис. ... канд. техн. наук. – М.: ЦНИИСК, 1970. – 155 с.
10. Ключев С.В., Гарькин И.Н., Ключев А.В., Сабитов Л.С. Результаты испытаний сборных подкрановых конструкций на выносливость // Строительные материалы и изделия. – 2022. – Т. 5, № 4. – С. 39–49.
11. Михаськин В.В. Влияние динамических нагрузок на усталостную прочность стальных балок, усиленных углепластиком // Строительные материалы и изделия. – 2023. – Т. 6, № 2. – С. 35–46.
12. Патент на полезную модель 163052 РФ. Подкрановая балка со сдвоенными стенками / А.И. Складнев, Н.И. Трухачев, А.В. Полозов, М.А. Рогатовских. Опубл. 10.07.2016. Бюл. № 19.
13. Технология и устройство для упрочнение сварных конструкций и деталей машин, работающих при циклических нагрузках // Электронный ресурс. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=2130403> (дата обращения: 01.04.2026)

