

УДК 624.014.2

С. В. КОЖЕМЯКА, А. В. КРУПЕНЧЕНКО

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

**ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
СТАЛЬНЫХ ПОДКРАНОВЫХ БАЛОК С УЧЕТОМ ДЕФЕКТОВ И
ПОВРЕЖДЕНИЙ**

Аннотация. В представленной статье авторами проанализированы существующие методики определения напряженно-деформируемого состояния подкрановых балок. В большинстве существующих методик основное внимание уделяется разработке и принятию конструктивных решений с целью обеспечения надежности и долговечности подкрановых конструкций. Рассмотренные методики оценки напряженно-деформированного состояния конструкций учитывают влияние одного несовершенства. Анализ отчетов по обследованию стальных подкрановых конструкций выявил вероятность появления сочетаний дефектов. В результате определено, что нет методики определения напряженно-деформируемого состояния подкрановых балок, которая отражает действительное состояние подкрановых конструкций с учетом всех значимых дефектов и повреждений.

Ключевые слова: подкрановые балки, напряженно-деформированное состояние, усталостные трещины.

Восстановление несущей способности строительных конструкций – основная задача, решаемая при ремонте и реконструкции зданий и сооружений. В промышленных зданиях самые повреждаемые конструкции – подкрановые балки, особенно для мостовых кранов с режимом работы 7К-8К. Обусловлено это циклическими знакопеременными нагрузками, при которых характерно интенсивное накопление повреждаемости, усталостные трещины.

С момента появления сварных подкрановых балок остается проблема появления усталостных трещин. Эту задачу пытались решить путем уточнения действительной работы подкрановых балок и конструктивными изменениями. Созданием новых конструктивных форм подкрановых конструкций и рельсов занимались А. С. Довженко, Н. С. Москалев, Е. И. Беленя, Н. С. Стрелецкий, В. А. Горпинченко, И. И. Ведяков, К. К. Нежданов, А. И. Кикин, А. Ф. Сабуров, Б. Н. Васюта, И. В. Попченков, В. В. Мысак, М. А. Карев и другие исследователи.

Исследования несущей способности подкрановых балок можно разделить на три этапа:

- работы 1960-х годов, связанные с анализом напряженно-деформированного состояния (НДС) методами строительной механики и поиском оптимальных конструктивных решений с определением базовых типоразмеров по данным статистической информации о причинах отказов;
- системные исследования причин отказов в 1980–1990-х годах в связи с оценками долговечности в рамках классических методов теории усталости;
- в 2000-х годах детальный анализ предельных состояний, живучести и остаточного ресурса по данным технического диагностирования, оптимальных конструктивных форм на базе методов механики разрушения.

Долговечность сварных подкрановых балок определяется усталостным ресурсом верхней зоны стенки у поясного шва. Именно в поясном шве и верхней зоне стенки чаще всего появляются усталостные трещины. Нормативные документы запрещают работу стальных конструкций с трещинами. Однако опыт показывает, что подкрановые балки продолжают работать при наличии этих дефектов. Для подкрановых балок тяжелого и особо тяжелого режимов работы, которые имеют усталостные трещины, возможен ремонт как временное средство для продления срока их эксплуатации. Практика показывает, что подкрановые конструкции, в том числе и тяжелого и особо тяжелого режима

работы, продолжают эксплуатироваться после ремонта довольно длительное время. До выполнения работ по продлению срока эксплуатации необходимо оценить техническое состояние и определить напряженно-деформированное состояние (НДС) конструкции.

На данный момент существует несколько методик анализа НДС подкрановой балки с учетом дефектов и повреждений.

В. В. Москвичев, Е. А. Чабан в своей работе [1] в качестве основной характеристики для оценки сложного напряженного состояния принимают значения интенсивности напряжений для случаев эксцентричного приложения нагрузки 15 и 30 мм и без эксцентриситета. При проведении численного эксперимента применялся программный комплекс ANSYS 5.7.

В результате численного анализа напряженно-деформированного состояния стенки ПБ авторы установили следующие закономерности: НДС стенки существенно зависит от величины эксцентриситета приложения крановой нагрузки; уровень интенсивности напряжений, возникающих в стенке балки, зависит от места приложения крановой нагрузки по длине балки; по толщине стенки возникает неоднородное напряженное состояние, степень неоднородности которого зависит от величины эксцентриситета. Влияние эксцентриситета приложения крановой нагрузки, а также установленные особенности НДС стенки подкрановой балки могут являться основными отказообразующими факторами, приводящими к возникновению аварийных ситуаций.

В. Е. Овсянников [2] предлагает для объективной оценки состояния подкрановых балок внедрить аппарат прогнозирования их повреждаемости с учетом текущего состояния, времени эксплуатации и характера нагружения. Оценка состояния конструкции определяется по параметрам отклонения от прямолинейности: производятся измерения высотных отметок, проводится базовая плоскость, вычисляются действительные высотные отметки. Далее в среде MathCad выполнены расчеты согласно методике изложенной в рекомендациях по устройству и безопасной эксплуатации наземных крановых путей. В результате получена вероятность появления усталостных трещин, прогнозируемое среднее количество и прогнозируемый рост усталостных трещин в верхней зоне стенки.

Работы Н. С. Стрелецкого и М. Я. Леонова показывают, что при расчете строительных конструкций по предельным состояниям сложилась парадоксальная ситуация, когда метод предельных состояний включает в себя образование трещин и разрушение, а классическая линейная механика разрушения (ЛМР) не приспособлена к определению нагрузок трещинообразования.

В. К. Востров занимался развитием ЛМР [3] до уровня применения в расчетах прочности, конструктивной безопасности и живучести строительных металлоконструкций по методу предельных состояний, включающему в структуру предельных состояний трещинообразование и разрушение. Существенным элементом научной новизны этой работы является разработка критериев и методов расчета перехода локальных зон элементов металлоконструкций с произвольными концентраторами напряжений и трещинами в хрупкие состояния и расчет соответствующих предельных и критических нагрузок.

И. П. Фомина и А. И. Голоднов [4] используют комплексную методику оценки напряженно-деформированного состояния конструкций на основе результатов визуального и инструментального обследования и методов математического моделирования, методов конечных элементов, технического состояния конструкции. Предложена методика расчета остаточного ресурса стальных подкрановых балок с учетом коррозионного повреждения.

Конструктивными изменениями подкрановой системы занимался Г. В. Калашников [5] и частично реализовал идеи профессора В. Ф. Сабурова. Значительно увеличить срок службы подкрановых балок позволило исключение сварки и установка поперечных ребер жесткости на высокопрочных болтах, крепление «тормозного» листа к верхнему поясу подкрановой балки и выполнение монтажных стыков балок на высокопрочных болтах. Разработан принципиально новый узел крепления неразрезных подкрановых балок к колонне. При уточнении нагрузок и определении локальных напряжений в стенке подкрановой балки предложено вертикальное усилие от одного катка, увеличивать на коэффициент, равный 1,8 для кранов с режимом работы 8К и жестким подвесом груза, 1,7 для кранов с режимом работы 8К и гибким подвесом груза и 1,6 для кранов с режимом работы 7К. Коэффициент надежности по нагрузке для кранов с режимом работы 7К и 8К предложено принять 1,2.

Один из эффективных путей повышения долговечности элементов конструкции подкрановых балок, по мнению В. В. Евдокимова, Е. А. Щербакова [8] – применение новых конструктивных решений узлов, обладающих более высоким расчетным сопротивлением усталости. В работе вышеуказанных авторов рассмотрены конструктивные решения узлов крепления поперечных ребер жесткости к стенке и верхней полке подкрановых балок, крепления «тормозного» листа к верхнему поясу и

горизонтальных связей к нижнему поясу балок, а также монтажных стыков подкрановых балок, выполненных на высокопрочных болтах (сдвигоустойчивые соединения). В качестве поперечных ребер жесткости предлагается использовать неравнобокие уголки, устанавливаемые кососимметрично относительно стенки и приваренные к ней, использование поясов из тавров, полученных роспуском прокатных двутавров, а крепление ребер к верхнему поясу балки выполнять на высокопрочных болтах.

Группой ученых – К. И. Еремин, В. В. Епишков, В. А. Плотников, Н. В. Смовж [6] изучено напряжённо-деформированное состояние подкрановых балок длиной 18 м на действующем предприятии. Были выделены зоны исследования напряжённо-деформированного состояния. Несмотря на обнаруженные трещины, обследование и проведённые эксперименты показали, что в целом подкрановые балки находятся в частично работоспособном состоянии.

Моделированием трещины с помощью суперэлементов в вычислительном комплексе «Лира Windows» занимались А. И. Давиденко, В. В. Стоянов [7]. Целью расчетов являлось сопоставление коэффициентов интенсивности напряжений в элементах с трещиной в подкрановой балке и элементов с холстом из углеродных волокон, наклеенных на указанную трещину, расположенную в околошовной зоне, а также выяснение возможности распространения трещины при дальнейшей эксплуатации. Решение по переходу от крупноразмерных конечных элементов к мелкоразмерным выполнено с использованием метода суперэлементов. Наклеивание углеродных волокон приводит не только к снижению напряжений в вершине трещины, но и к повышению трещиностойкости конструкции в целом, остановке роста трещины, а методика и результаты расчета позволяют обоснованно решать вопросы оценки трещиностойкости конструкций.

Нормативные документы Российской Федерации допускают временную эксплуатацию подкрановых балок с усталостными трещинами в верхней зоне стенки подкрановой балки [9]. При этом циклический ресурс балок на стадии роста усталостных трещин сопоставим с ресурсом от начала эксплуатации до появления визуально обнаруживаемых усталостных трещин. В европейских нормах проектирования также упоминается о том, что появление трещины не обязательно означает конец срока эксплуатации подкрановых балок, они должны ремонтироваться [10]. Оценка сопротивления усталости выполняется по пределу выносливости для номинальных размахов напряжений цикла, определяемых по графикам сопротивления усталости, приведенным в [10]. Предел выносливости и предел повреждаемости определяется по категории элемента, которая в свою очередь зависит от описания элемента конструкции и характера соединения.

При расчетах на выносливость стальных конструкций [11] определяется накопление усталостных повреждений за определенное время. Определение граничнодопустимого количества циклов зависит от группы элемента, схемы элемента и расположения расчетного сечения.

В руководстве по определению индивидуального ресурса стальных подкрановых балок [13] трещины сгруппированы по местоположению, есть рекомендации о порядке и последовательности выполнения работ по оценке технического состояния стальных подкрановых конструкций.

Анализ работ по определению напряженно-деформируемого состояния подкрановых балок с дефектами и повреждениями показал, что их авторы рассматривали конструкцию с одним дефектом (коррозионный износ, трещина, нелинейность). В основном приводятся рекомендации для наиболее часто встречающихся и наиболее опасных дефектов – усталостных трещин.

В руководстве по восстановительному ремонту подкрановых конструкций [15] дефекты и повреждения (несовершенства) разделены на три категории в зависимости от степени опасности для дальнейшей эксплуатации. К категории А относят дефекты и повреждения основных несущих элементов и узлов, представляющих непосредственную опасность для дальнейшей эксплуатации конструкции (усталостные трещины в верхней зоне стенки и сварных швах, коррозионный износ более 20 %, ослабление болтовых соединений более 30 %, значительное, более 20 %, разрушение соединения балки и тормозной конструкции, разрушение элементов опорных узлов). При обнаружении таких дефектов и повреждений рекомендуют остановить эксплуатацию.

При появлении дефектов и повреждений категории Б (смещение элементов, искривления, коррозионный износ менее 20 %, ослабление отдельных болтов) происходит перераспределение усилий. По мере развития такие повреждения могут привести к переходу конструкции подкрановой балки в категорию А.

Не снижают прочность дефекты и повреждения категории В (местные повреждения тормозных листов, связей и упоров, ослабление монтажных болтов, разрушение защитных покрытий). Однако эти дефекты влияют на долговечность и могут привести конструкции подкрановой балки в состояние категории Б.

Для каждого из описанных дефектов и повреждений рекомендовано несколько вариантов мероприятий по их устранению. Оговорено, что выбор способа усиления определяется общим техническим состоянием подкрановой балки, но метода определения этого состояния, учитывая сочетания всех несовершенств, нет.

Статистический анализ отчетов по обследованию стальных подкрановых конструкций выявил наиболее вероятные появления сочетаний дефектов [12]. В работе [14] рассмотрены основные методы усиления стальных подкрановых балок с учетом наиболее часто встречающихся групп дефектов и повреждений. Предложено описывать состояние конструкций совокупностью дефектов и повреждений, обнаруженных при обследовании.

Анализ работ по обследованию подкрановых балок показал, что наиболее часто встречаются такие сочетания дефектов:

- 1) коррозионный износ стенки подкрановой балки, погиби верхнего пояса, отсутствие (ослабление) болтов крепления подкрановых балок к колоннам или между собой, разрушение сварного шва крепления тормозного листа к верхнему поясу балок;
- 2) погиби верхнего пояса, отсутствие (ослабление) болтов крепления подкрановых балок к колоннам или между собой, трещины в верхней зоне стенки;
- 3) трещины в верхней зоне стенки и сварном шве в зоне опирания, ослаблены или отсутствуют болты;
- 4) трещины в сварном шве между опорным ребром и нижнем поясом, коррозия сечения, ослаблены или отсутствуют болты соединения балок.

ВЫВОДЫ

Построены уравнения регрессии стоимости и трудоемкости усиления для различных случаев состояния подкрановых конструкций, но нет оценки.

Существующие методики по определению напряженно-деформируемого состояния (НДС) подкрановых балок не учитывают комплексное влияние сочетаний дефектов и повреждений, не оценивается НДС балок до и после выполнения усиления.

Необходимо разработать методику оценки НДС подкрановых балок, которая позволит установить действительное состояние подкрановых конструкций с учетом комплексного влияния выявленных несовершенств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Москвичев, В. В. Исследование напряженно-деформированного состояния подкрановых балок в штатных режимах эксплуатации [Текст] / В. В. Москвичев, Е. А. Чабан // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2016. – № 9(4). – С. 572–584.
2. Овсянников, В. Е. Некоторые аспекты оценки состояния подкрановых балок [Текст] / В. Е. Овсянников // Вестник Курганского государственного университета. Серия : Технические науки. – 2011. – Вып 6, № 1(20). – С. 3–5.
3. Востров, В. К. Прочность, трещиностойкость и конструктивная безопасность строительных металлоконструкций на базе развития линейной механики разрушения [Текст] : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук : 05.23.01 / Востров Владимир Кузьмич. – М., 2009. – 53 с.
4. Фомина, И. П. Обоснование продления срока эксплуатации стальных балок [Текст] / И. П. Фомина, А. И. Голоднов // Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В. М. Шимановського. – 2013. – Выпуск 11. – С. 140–147.
5. Калашников, Г. В. Настоящее и будущее подкрановых балок [Текст] / Г. В. Калашников // Монтажные и специальные работы в строительстве. – 2007. – № 7. – С. 2–9.
6. Изучение напряжённо-деформированного состояния подкрановых конструкций [Электронный ресурс] / К. И. Еремин, В. В. Епишков, В. А. Плотников, Н. В. Смолж // Градостроительство, прогрессивные строительные конструкции, технологии, инженерные системы: Межвуз. сб. науч. тр. / Магнитогорский гос. технический ун-т им. Г. И. Носова ; отв. ред. В.С. Баталов. – Магнитогорск : МГТУ, 2000. – С. 65–71.
7. Давиденко, А. И. Исследование методом математического моделирования повышения трещиностойкости подкрановой балки в районе трещины с углепластиковой накладкой [Текст] / А. И. Давиденко, В. В. Стоянов // Металлические конструкции. – 2008. – Том 14, № 4. – С. 245–251.
8. Евдокимов, В. В. К вопросу повышения расчетной долговечности элементов конструкции подкрановых балок [Текст] / В. В. Евдокимов, Е. А. Щербаков // Промышленное и гражданское строительство. – 2008. – № 5. – С. 18–21.

9. СТО 22-05-04. Руководство по определению индивидуального ресурса стальных подкрановых балок с усталостными трещинами в стенках для допущения их временной эксплуатации [Текст]. Часть 1. Основные положения (предназначено для экспертов). – Новосибирск : [б. и.], 2004. – 32 с.
10. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций [Текст]. Часть 1–9. Усталостная прочность. – Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2010. – 43 с.
11. ДБН В.2.6-163:2010. Конструкції будівель і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу [Текст]. – На заміну СНиП П-23-81* окрім розділів 15*-19, СНиП III-18-75 окрім розділів 3–8, СНиП 3.03.0187 у частині, що стосується сталевих конструкцій окрім п.п. 4.78-4.134 ; чинні від 2011-12-01. – К. : Мінрегіонбуд України, 2011. – 127 с.
12. Кожемяка, С. В. Оценка состояния подкрановых балок в процессе длительной эксплуатации [Текст] / С. В. Кожемяка, А. В. Крупенченко // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения : материалы Международных академических чтений РААСН / Под ред. С. И. Меркулова [и др.]. – Курск : Курский государственный университет, 2016. – С. 116–122.
13. СТО 22-05-04. Руководство по определению индивидуального ресурса стальных подкрановых балок с усталостными трещинами в стенках для допущения их временной эксплуатации [Текст]. Часть 1. Основные положения. – Новосибирск : [б. и.], 2004. – 22 с.
14. Крупенченко, А. В. Технология усиления стальных подкрановых балок с учетом выявленных дефектов [Текст] / А. В. Крупенченко // Містобудування та територіальне планування / КНУБА. – К., 2013. – Вип. № 48. – С. 227–232.
15. Руководство по восстановительному ремонту подкрановых конструкций [Текст] / Министерство металлургии СССР. – М. : Министерство металлургии СССР, 1991. – 118 с.

Получено 05.10.2017

С. В. КОЖЕМЯКА, Г. В. КРУПЕНЧЕНКО
ОЦІНКА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СТАЛЕВИХ
ПІДКРАНОВИХ БАЛОК З УРАХУВАННЯМ ДЕФЕКТІВ І ПОШКОДЖЕНЬ
ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

Анотація. У представленій статті авторами проаналізовано існуючі методики визначення напружено-деформованого стану підкранових балок. У більшості існуючих методик основна увага приділяється розробці і прийняттю конструктивних рішень з метою забезпечення надійності і довговічності підкранових конструкцій. Розглянуті методики оцінки напружено-деформованого стану конструкцій враховують вплив однієї недосконалості. Аналіз звітів із обстеження сталевих підкранових конструкцій виявив ймовірність появи поєднань дефектів. В результаті визначено, що немає методики визначення напружено-деформованого стану підкранових балок, яка відображає дійсний стан підкранових конструкцій з урахуванням всіх значущих дефектів і пошкоджень.

Ключові слова: підкранові балки, напружено-деформований стан, втомні тріщини.

SERGEY KOZHEMYAKA, ANNA KRUPENCHENKO
ESTIMATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF STEEL CRANE GIRDERS
TAKING INTO ACCOUNT DEFECTS AND DAMAGES
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract. In the presented article, the authors analyzed the existing methods for determining the stress-strain state of crane girders. Most of the existing methods focus on the development and adoption of design solutions to ensure the reliability and durability of crane structures. The considered methods for estimating the stress-strain state of structures take into account the influence of one imperfection. Analysis of reports on the inspection of steel crane structures revealed the probability of combinations of defects. As a result, it is determined that there is no technique for determining the stress-strain state of crane girders, which reflects the actual state of crane structures with all significant defects and damages taken into account.

Key words: cranial beams, stress-strain state, fatigue cracks.

Кожемяка Сергей Викторович – кандидат технических наук, профессор кафедры технологии и организации строительства ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: технология и организация работ при реконструкции зданий и сооружений, автоматизация технологического проектирования.

Крупенченко Анна Викторовна – ассистент кафедры технологии и организации строительства ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: технология и организация работ при реконструкции зданий и сооружений.

Кожемяка Сергій Вікторович – кандидат технічних наук, професор кафедри технології і організації будівництва ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: технологія і організація робіт при реконструкції будівель і споруд, автоматизація технологічного проектування.

Крупенченко Ганна Вікторівна – асистент кафедри технології і організації будівництва ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: реконструкція промислових і цивільних споруд

Kozhemyaka Sergey – Ph. D. (Eng.), Professor; Technology and Management in Construction Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: technology and organization of works in reconstructing building and structures, automation of technological designing.

Krupenchenko Anna – assistant, Technology and Management in Construction Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: reconstruction of industrial and civil buildings.