УДК 624.072.22:621.874 DOI: 10.33622/0869-7019.2020.12.61-67

Повышение эксплуатационного ресурса подкрановых балок

Владимир Федорович ТАККИ, главный конструктор, e-mail: vladimir.takki@yandex.ru

Игорь Федорович ЕГОРОВ, главный инженер проекта, e-mail: scaut2005@inbox.ru

ЗАО «ИТЦ «СКАУТ», 144000 г. Электросталь, ул. Советская, 5

Ольга Александровна ТУСНИНА, кандидат технических наук, доцент, e-mail: tusninaoa@mgsu.ru

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337 Москва, Ярославское ш., 26

Аннотация. *В зданиях и сооружениях с кранами тяжелого и особо тяжелого режимов работы при интенсивной эксплуатации сварных подкрановых балок по линии сварных швов соединения полки со стенкой балки образуются продольные трещины, часто переходящие в вертикальные трещины по линиям приварки ребер. Провоцирующим фактором разрушения при циклических нагрузках является имеющийся недостаток сварных соединений — ослабление в околошовной зоне и наличие в ней трудно поддающихся учету внутренних напряжений, усугубляющих состояние сварного шва, вокруг которого в подкрановых балках происходят многократные перегибы. При отсутствии такого фактора (как, например, в клепаных балках) эксплуатационный ресурс подкрановых балок возрастает, что подтвердили результаты настоящего исследования предлагаемой конструкции балок с фрикционным соединением верхнего пояса со стенкой. Исследования проводились численным методом с использованием программного комплекса Femap. На основе результатов конечно-элементного расчета проанализировано напряженно-деформированное состояние подкрановых балок со сварным и фрикционным соединением верхней полки со стенкой, приведены изополя и эпюры напряжений в стенке. Показано, что коэффициент использования по усталости балки с фрикционным поясным соединением ниже, чем сварной балки, что говорит о более высокой надежности подкрановых балок с фрикционным поясным соединением по сравнению со сварными при действии циклических нагрузок. Применение фрикционного поясного соединения оказывается эффективным как при новом проектировании подкрановых балок для кранов тяжелого и особо тяжелого режимов работы, так и для усиления существующих сварных балок, имеющих трещины.*

Ключевые слова: *подкрановая балка, усталость стальных конструкций, трещины, сварной шов, усиление, эксплуатационный ресурс, фрикционное соединение, композитная балка, ремонтопригодность, фактор риска.*

INCREASING THE OPERATIONAL LIFE OF CRANE BEAMS

Vladimir F. TAKKI, e-mail: vladimir.takki@yandex.ru

Igor F. EGOROV, e-mail: scaut2005@inbox.ru

ITC «SKAUT», ul. Sovetskaya, 5, Elektrostal 144000, Russian Federation

Olga A. TUSNINA, e-mail: tusninaoa@mgsu.ru

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe shosse, 26, Moscow 129337, Russian Federation

Abstract. *uring intensive operation of welded crane beams, in buildings and structures with heavy duty and extra heavy duty cranes, longitudinal cracks are formed along the weld line of the flange-wall connection, often turning into vertical cracks along the weld lines of the ribs. The provoking factor of destruction under cyclic loads is an innate lack of welded joints - weakening in the near-weld zone and the presence in it of internal stresses that are difficult to account for, aggravating the state of the weld, around which multiple bends occur in the crane beams. In the absence of such a factor (as, for example, in riveted beams), the service life of crane beams increases, which was confirmed by the results of this study of the proposed design of beams with frictional joint of the upper flange with the wall. The studies were carried out by numerical methods using computing program Femap. The stress-strain state of the crane beams with the welded and frictional connection of the upper flange with the wall is analyzed on the basis of the finite element analysis results. Contour plots and stress diagrams in the wall of the beams are shown. It is shown that the fatigue utilization factor of the beam with the frictional connection is lower than that of a welded beam, which indicates a higher reliability of crane beams with the frictional flange-to-web connection as compared to welded beams under the action of cyclic loads. The use of a friction flange-to-web connection turns out to be effective both in the new design of crane beams for heavy and especially heavy duty cranes, and in reinforcement of existing welded beams with the cracks.*

Key words: *crane beam, fatigue of steel construction, cracks, welded seam, reinforcement, service life, frictional connection, composite beam, maintainability, risk factor.*

Активное строительство мартеновских, конвертерных и иных цехов черной металлургии и других отраслей промышленности с кранами тяжелого и особо тяжелого режимов работы (7К, 8К) пришлось на 1960-е—1990-е гг. Подкрановые балки эксплуатируются в таких цехах

© ТАККИ В. Ф., ЕГОРОВ И. Ф., ТУСНИНА О. А., 2020

уже 30—60 лет и в настоящее время находятся на грани исчерпания своего ресурса, что обусловливает актуальность решения проблемы повышения их эксплуатационного ресурса.

В зданиях и сооружениях металлургических и других производств с интенсивно работающими тяжелыми кранами подкрановые балки подвергаются многократному действию нагрузок разных направлений. В результате этого уже на ранних сроках эксплуатации (иногда до трех лет) [1, 2] в сварных балках возникают усталостные трещины, и срок службы таких балок в целом истекает к 15 годам. Например, по данным службы эксплуатации крана режима 7К, работающего в шлаковом пролете конвертерного цеха ПАО «НЛМК», количество проездов крана по подкрановой балке в среднем составляет 150 за сутки, т. е. за 20 лет эксплуатации количество циклов нагружения для рассматриваемой балки было свыше 4 млн. Согласно СП 16.13330.2017 «СНиП II-23-81* Стальные конструкции» (с поправкой, с изменениями № 1, 2) ресурс такой подкрановой балки исчерпан.

Таким образом, подошла пора массового усиления или замены изношенных подкрановых конструкций, а также пересмотра традиционного подхода к конструированию балок для кранов тяжелого и особо тяжелого режимов работы.

В отечественных нормах (СП 16.13330) приведены положения по расчету на усталость стальных конструкций при их проектировании. Однако применение такой методики к балкам, которые были запроектированы по ранее действующим нормам, необходимо рассмотреть особо. Зачастую оказывается так, что при расчете по современным нормам проверка на усталость не выполняется и возникает необходимость провести значительное усиление или замену таких балок, хотя их состояние, выявленное при обследовании, может быть признано работоспособным и балка может сохранять несущую способность еще длительное время [3].

Расчеты на усталостное разрушение по методикам нормативных документов достаточно приближенные и не позволяют получить точные данные о величинах и распределении напряжений в сечениях подкрановой балки, а также определить перемещения и деформации, возникающие при действии нагрузки.

Для более глубокой оценки усталостной прочности подкрановых балок необходим детальный анализ их напряженно-деформированного состояния, а для существующих балок важно еще учитывать и их фактическое состояние [4]. Наиболее близкую к реальной картину дает использование численных методов с применением корректных расчетных моделей, согласующихся с фактическим конструктивным решением балки.

Поскольку несущая способность подкрановых балок при действии многократных крановых нагрузок разного направления, как правило, обусловливается прочностью соединения верхнего пояса со стенкой, именно этому вопросу следует уделить особое внимание, так как конструктивное решение соединения существенно влияет на сопротивление балки циклическому разрушению.

В сварных подкрановых балках двутаврового сечения поясные швы соединения верхней полки со стенкой представляют собой наиболее проблемную зону [5—8]. Эти швы подвержены сложным воздействиям от сосредоточенного крутящего момента, общего изгиба, местного вертикального и горизонтального давления колеса крана. Кроме того, сварной шов — температурный и физический концентратор напряжений, в особенности его околошовная зона, что становится провоцирующим фактором образования и развития трещин по шву, а чаще по околошовной зоне.

Действующие нормы и правила проектирования, изготовления и монтажа предусматривают мероприятия, которые снижают остроту провоцирующих факторов. В их числе контроль качества шва, обработка швов аргонно-дуговым способом, обеспечение регулярного надзора за состоянием балок, причем не только визуального, но и с применением методов неразрушающего контроля [9] и т. д.

Частично смягчают жесткие воздействия нагрузок на подкрановые балки известные конструктивные мероприятия. Например, для снижения концентрации напряжений в зоне перехода от шва к стенке [5] рекомендовано выполнять поясные швы неравнокатетными с вогнутым валиком. Это вызвано тем, что другие формы валика шва ухудшают напряженное состояние в этой зоне и значительно понижают выносливость балки.

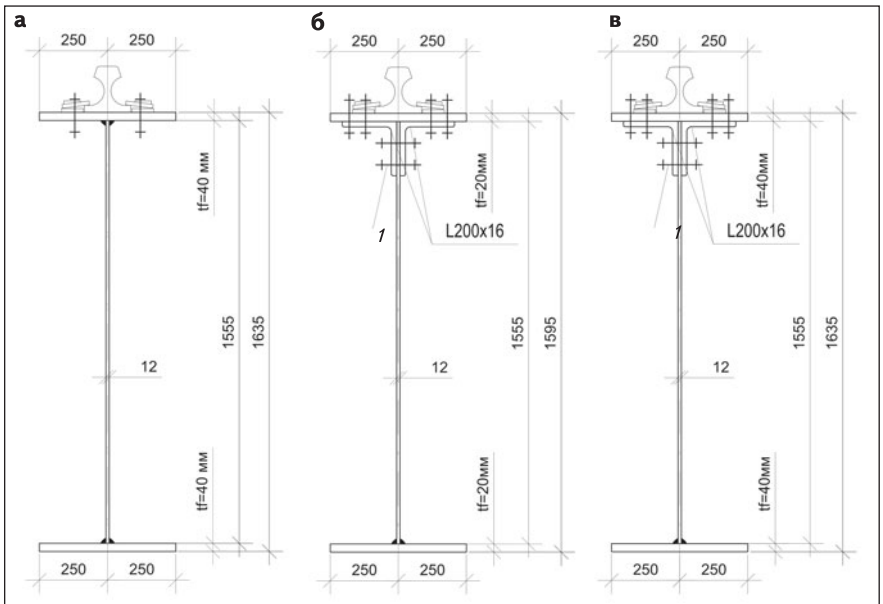
Однако и эти меры не вполне гарантируют предотвращение развития усталостных трещин и их отслеживание, учитывая реальные условия с безостановочной работой металлургического производства, когда вопросам осмотра состояния подкрановых путей не удается уделять достаточного внимания.

Решение проблемы усталостной прочности требует радикального подхода. Видимо, его следует искать не в уменьшении степени влияния имеющихся потенциальных дефектов, а в их исключении.

Хорошим примером в этом отношении служит клепаная подкрановая балка, обладающая

высоким эксплуатационным ресурсом. В таких конструкциях полка соединяется со стенкой с помощью накладных уголков с обеих сторон стенки, верхняя кромка которой пристрогана и плотно подогнана к полке. В результате этого основная часть вертикального давления воспринимается поверхностью контакта стенки с полкой по смятию, а крутящий момент — комбинированными цельными сечениями уголков и пояса балки, более эффективно работающими на кручение относительно продольной оси или, что то же самое, — испытывающими изгиб в плоскости поперечного сечения балки. Для наглядности приведена упрощенная схема работы, отражающая физический смысл, а применение современных методов расчета позволяет учесть более точное распределение напряжений в комбинированном сечении балки с учетом надежности соединения верхнего пояса со стенкой. Аналогом заклепочного соединения стенки с полкой служит фрикционное соединение на высокопрочных болтах *(рис. 1б, в)*.

В связи с отсутствием факторов, провоцирующих развитие трещин, усталостная прочность фрикционного соединения гарантирует продление срока службы подкрановых балок на более длительный период. Это подтверждается практикой, когда в современных условиях производится замена заклепок высокопрочными болтами, и новое усиленное составное сечение продолжает службу долгие годы. Данный прием повышения эксплуатационного ресурса реализован на Магнитогорском металлургическом комбинате [10] и в 2019 г. на Новолипецком металлургическом комбинате (ПАО «НЛМК») при реконструкции подкраново-подстропильных ферм пролетом 24 и 36 м соответственно.



а — сварная; б — комбинированная с фрикционным поясным соединением; в — усиление существующей сварной балки; 1 — высокопрочные болты располагаются в шахматном порядке и не используются для крепления рельса

Рис. 1. ***Рассматриваемые подкрановые балки***

В общем виде расчет на усталость следует выполнять в соответствии с СП 16.13330 по формуле (170)

$$\frac{\sigma_{\max}}{\alpha R_v \gamma_v} \leqslant 1, \qquad (1)$$

где σ_{max} — наибольшее по абсолютному значению напряжение в рассчитываемом сечении элемента; α — коэффициент, учитывающий число циклов нагружений; R_v — расчетное сопротивление усталости; γ_v — коэффициент, зависящий от напряженного состояния и коэффициента асимметрии напряжений.

Коэффициент α снижается с увеличением числа циклов, при этом количество циклов нагружения ограничивается величиной 3,9 млн (для такого числа циклов и более коэффициент $\alpha = 0{,}77$).

Анализируя формулу (1), можно заметить, что для повышения сопротивляемости конструкции усталостному разрушению необходимо:

- применить конструктивные решения, которые позволят снизить максимальные напряжения σ_{max}, возникающие в конструкции при действии нагрузки;
- повысить расчетное сопротивление усталости R_v и увеличить коэффициент α, учитывающий число нагружений n.

Для расчета подкрановых балок на усталость следует использовать рекомендации п. 12.2. СП 16.13330, при этом для кранов режимов работы 7К и 8К коэффициент α всегда принимается равным 0,77. С учетом этого выполняют проверку на усталость подкрановых балок в верхней зоне стенки:

$$(0{,}5\sqrt{\sigma_x^2 + 0{,}36\tau_{xy}^2} + \\ + 0{,}4\sigma_{loc,y} + 0{,}5\sigma_{fy})/R_v \leqslant 1, \qquad (2)$$

где σ_x — нормальные напряжения в стенке от изгибающего момента; τ_{xy} — касательные напряжения в стенке от поперечной силы; $\sigma_{loc,y}$ — локальные напряжения в стенке от давления колеса; σ_{fy} — нормальные напряжения от местного крутящего момента; R_v — расчетное сопротивление усталости, принимаемое для всех марок сталей для балок со сварными поясными соединениями равным 75 МПа и с фрикционными соединениями — 96 МПа.

При одинаковых нагрузках, габаритах и одинаковых значениях σ_{max} и γ_v из-за разных предельных значений расчетного со-

противления усталости R_v левая часть формулы (1) для балки с фрикционными соединениями верхнего пояса со стенкой (см. *рис. 1в)* в 1,28 раза меньше, чем для целиком сварной балки *(рис. 1а):*

$$\frac{\sigma_{\max}}{\alpha R_v^{\text{фрикц}} \gamma_v} < \frac{\sigma_{\max}}{\alpha R_v^{\text{св}} \gamma_v};$$

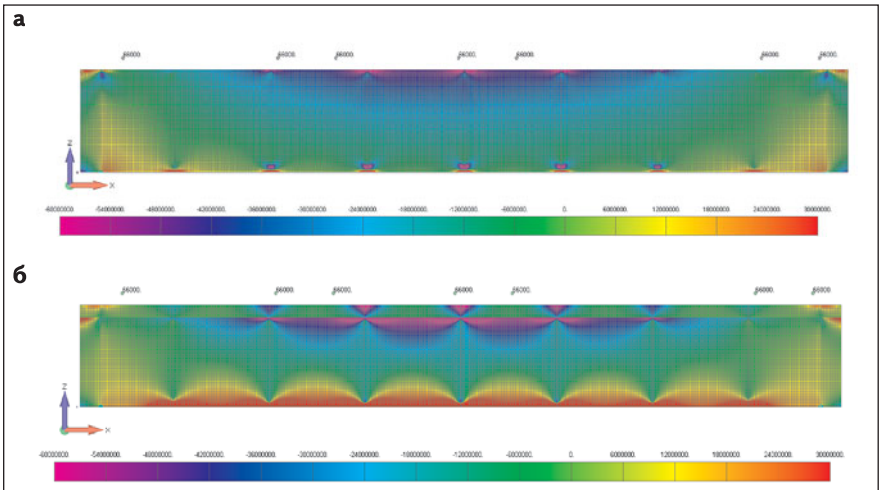
так как $\frac{1}{96} < \frac{1}{75}$ 96:75 = 1,28 (см. формулу 2).

Из этого следует, что предельный срок службы балки с фрикционным поясным соединением (тип 1в) может быть увеличен в 1,28 раза по сравнению с предельным сроком для сварной балки (тип 1а), т. е. доведен почти до 5 млн циклов вместо 3,9 млн. Таким образом, балки с фрикционным поясным соединением не только будут гарантированно работать в течение 3,9 млн циклов нагружения, но и выдерживать по сравнению со сварными балками дополнительно еще более 1 млн циклов.

Для анализа величины действующих напряжений в верхней зоне стенки целиком сварной балки и комбинированной балки с фрикционным соединением верхнего пояса со стенкой выполнены численные расчеты с использованием программного комплекса Femap.

Рассмотрены подкрановые балки двутаврового сечения из стали С355: сварная и с фрикционным соединением верхнего пояса со стенкой *(см. рис. 1).* Балки разрезные, пролетом 12 м.

При расчете численным методом для моделирования применялись плоские четырехугольные конечные элементы. По ширине полки принято 24 конечных элемента, по высоте стенки — 50 элементов. Балки шарнирно опираются сверху на подкрановые ветви колонн. Опирание смоделировано в виде закрепления узлов нижней полки и опорного ребра от всех смещений.



а — сварной двутавр (тип 1а); б — двутавр с фрикционным поясным соединением (тип 1б)

Рис. 2. ***Изополя напряжений от крутящего момента σ_{fy} в стенке балки, Па***

Сравнение напряженного состояния балок

Тип балки	Сечение	Напряжения, МПа					$K_{исп}$
		σ_x	$\sigma_{loc,y}$	σ_{fy}	τ_{xy}	$\sigma_{уст}$	
Сварная балка (1а) R_y = 75 МПа	Стык стенки и полки	−96,9	−62,9	−48,8	24,8	59,1	0,789
Комбинированная балка (1б) R_y = 96 МПа	Стык стенки и полки	−103,8	−28,3	−67,1	27,8	58,5	0,609
	Под уголком	−69,3	−45,4	−90,3	30,4	59,5	0,62
Комбинированная балка (1в) R_y = 96 МПа	Стык стенки и полки	−68,6	−28,7	−62	27,4	46,6	0,485
	Под уголком	−47,6	−50,3	−83,4	29,1	52,3	0,545

Смещение рельса от оси подкрановой балки оказывает значительное влияние на напряженно-деформированное состояние стенки. С увеличением смещения точки приложения вертикального давления колеса крана напряжения в стенке пропорционально возрастают [4, 11]. В случае возникновения трещин в верхней зоне стенки интенсивность их роста также прямо пропорционально зависит от величины эксцентриситета и уровня локальных напряжений в соответствии с СТО 22-05-04 «Руководство по определению индивидуального ресурса стальных подкрановых балок с усталостными трещинами в стенках для допущения их временной эксплуатации. Ч. 1. Основные положения». Для учета этого смещения, а также для моделирования распределения локальных напряжений от давления колеса рельс КР-120 задан стержневым элементом, который соединен с узлами на полке по ширине подошвы b = 170 мм, с учетом возможного смещения e = 0,2b = 34 мм. Нормативное вертикальное давление колеса крана $F_к$ = 330 кН. Кран имеет восемь колес. В соответствии с правилом Винклера принято расположение двух кранов таким

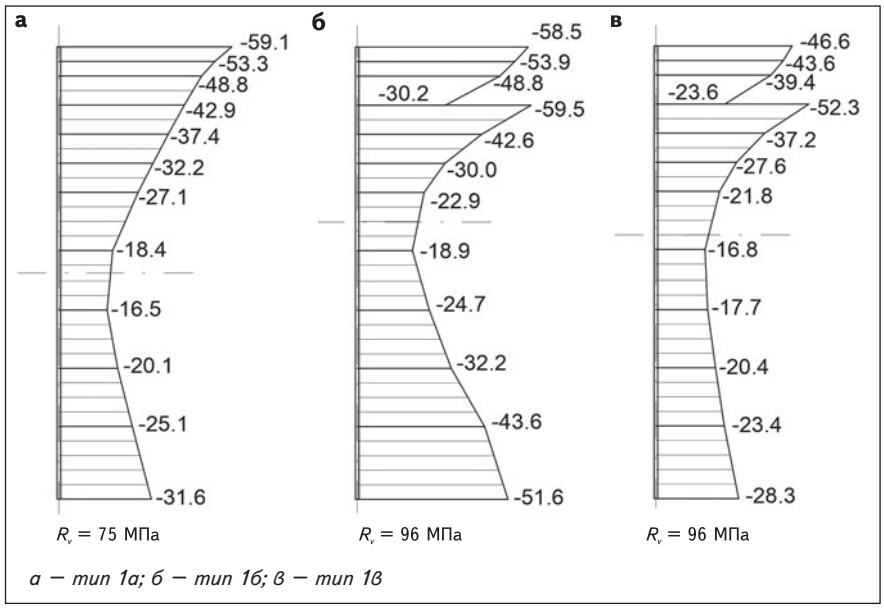


Рис. 3. ***Эпюры суммарных напряжений при проверке на усталость*** $\sigma_{уст}$***, МПа***

образом, чтобы в середине пролета балки возникал максимальный изгибающий момент.

Изополя напряжений от крутящего момента σ_{fy} для балок с различным типом поясных соединений (тип 1а и 1б) приведены на *рис. 2*.

Важно отметить, что зона максимальных напряжений в балке с фрикционным поясным соединением смещается на цельную часть стенки, в то время как в сварном соединении они находятся в зоне поясных сварных швов. В последнем случае в этой зоне складываются одновременно максимальные напряжения от всех видов воздействия и приходятся они на сварной шов, в котором уже действуют сварочные, усадочные и прочие напряжения, трудно поддающиеся учету и снижающие надежность соединения. Если для сварного соединения наиболее опасная зона – сварной стык полки со стенкой, вокруг которого происходят перегибы, то во фрикционном соединении такой зоной будет сплошное сечение с ненарушенной структурой материала, для которого значения предела усталостной прочности выше, чем для сварного шва, в том числе с учетом прил. К и табл. 37 СП 16.13330.

Для определения напряжений в сечении стенки под уголком не существует нормативной методики, поэтому необходимо выполнять численный расчет.

Эпюры суммарных напряжений при проверке на усталость $\sigma_{уст}$ показаны на *рис. 3*. Суммарные напряжения при проверке на усталость определены по формуле

$$\sigma_{уст} = 0{,}5\sqrt{\sigma_x^2 + 0{,}36\tau_{xy}^2} + 0{,}4\sigma_{loc,y} + 0{,}5\sigma_{fy}. \quad (3)$$

Сравнение коэффициентов использования сечений различных типов балок (1а, 1б и 1в) по усталости приведено на *рис. 4* и в *таблице*.

Значение коэффициента использования по усталости получено:

$$K_{исп} = \frac{\sigma_{уст,max}}{R_v}.$$

Одновременно следует сопоставить и факторы риска по разд. 13 «Проектирование стальных конструкций с учетом предотвращения хрупкого разрушения» СП 16.13330. Сравнение суммарного фактора риска для рассматриваемых видов соединений по формуле (174) и табл. 37 СП 16.13330 показывает явное преимущество фрикционного соединения, где большинство слагаемых равно нулю.

Следует учитывать и группу соединений согласно прил. К СП16.13330. Фрикционные соединения относятся к первой группе риска, в то время как тавровое сварное соединение при действии изгиба вокруг шва может быть отнесено к четвертой или даже восьмой группе. Прямого случая такого соединения, к сожалению, в прил. К нет, поэтому воспользуемся аналогией.

Приведенные аргументы служат обоснованием более высокой надежности фрикционного соединения полки со стенкой по сравнению со сварным при действии циклических нагрузок.

Применение фрикционного поясного соединения оказывается эффективным и для усиления сварных балок, имеющих трещины.

Для иллюстрации на конкретном примере обратимся к *рис. 1а* и *1в*. Балки типа 1а и 1в реализуются при реконструкции шлакового пролета конвертерного цеха № 2 ПАО «НЛМК» на разных участках цеха в одном пролете под краны грузоподъемностью 125 т, режима работы 7К. Сварное соединение существующей балки типа 1а после разрушения сварного шва усиливают по типу 1в, а на некоторых участках цеха производится замена имеющихся балок на новые сварные аналогичного сечения (тип 1а).

Поскольку в процессе усиления подкрановая балка разгружена, новое усиление полностью включается в совместную работу с остающимся поясом, исключая из работы сварное соединение и образуя новое – фрикционное.

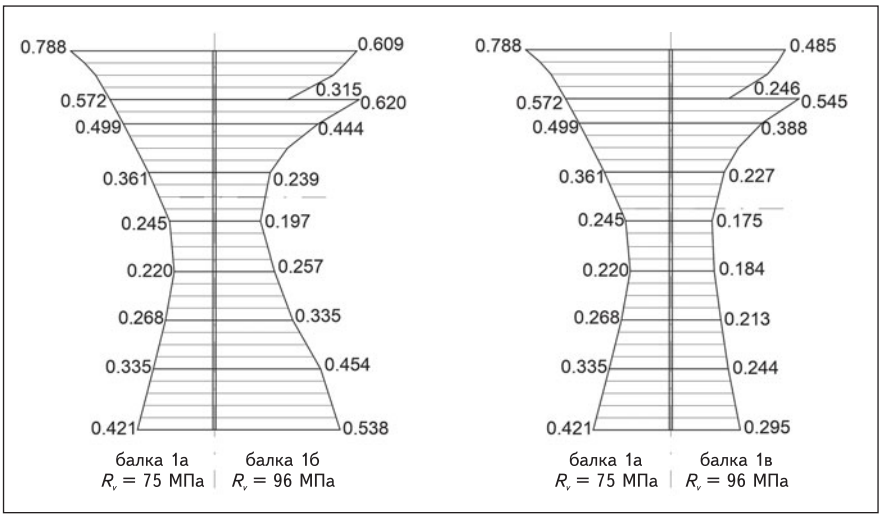


Рис. 4. ***Сравнение коэффициентов использования сечений балок по усталости***

Усиление подкрановых балок таким способом позволяет продлить срок их службы, так как в этом случае включается новый участок стенки, ранее не испытывающий максимальных напряжений и практически сохранивший полный ресурс. Как следствие, в новом фрикционном соединении (1в) $\sigma_{уст}$ имеет меньшее значение, чем в сварной балке (1а), — 52,3 против 59,1 МПа (см. *рис. 3*). Учитывая повышение расчетного сопротивления усталости во фрикционном соединении, коэффициент использования балки с фрикционным поясным соединением в 1,45 раза меньше, чем сварной балки *(см. таблицу).*

Усиление подкрановых балок по типу 1в по сравнению с их заменой по типу 1а позволяет в несколько раз уменьшить расход стали при реконструкции. Для приведенного выше примера замена требует более 460 кг стали на каждый погонный метр балок, в то время как для усиления по типу 1в требуется всего 97 кг на метр длины (т. е. — в 4,7 раза меньше). Усиление по данному способу носит локальный характер и не требует демонтажа существующих подкрановых конструкций, что позволяет допустить работу кранов в пролете при небольших ограничениях. Действие в балке максимального напряжения в 1,84 раза меньше предельного R_v даст возможность продлить срок эксплуатации подкрановых балок на весь период службы сооружения в целом.

Таким образом, применение исследуемого технического решения и методики его расчета при новом проектировании позволит избежать при эксплуатации тех недостатков, которые имеют традиционные решения сварных подкрановых балок.

Выводы

1. Подкрановые балки составного типа с фрикционным соединением верхнего пояса со стенкой (посредством накладных уголков) имеют больший эксплуатационный ресурс и большую надежность, чем сварные балки примерно на 28 % и позволяют соответственно увеличить срок службы.

2. Усиление по предлагаемому способу существующих сварных подкрановых балок, имеющих трещины по линии соединения полки со стенкой, увеличивает ресурс их службы без замены вплоть до срока службы всего здания.

3. Предлагаемый способ обеспечивает высокую ремонтопригодность и возможность усиления исчерпавших ресурс балок в «технологических окнах» практически без остановки работы кранов.

4. Рекомендуется использовать предлагаемый тип поясного соединения при новом проектировании подкрановых балок для кранов тяжелого, особо тяжелого и непрерывного режимов работы.

5. Оценка суммарного фактора риска по табл. 37 и группы конструкций в прил. К СП 16.13330 затруднена из-за отсутствия данных для сварного таврового соединения при действии момента относительно оси сварного шва. В связи с этим требуется внесение уточнения в прил. К и табл. 37 данного стандарта для учета этого важного случая сварного соединения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Фын Сю-Цзюнь, Линь Синь-Шань, Фан Тиан.* Исследование усталостных повреждений верхней зоны стенок стальных подкрановых балок // Промышленное и гражданское строительство. 1994. № 11–12. С. 33–35.
2. *Артюхов В. Н., Щербаков Е. А., Горицкий В. М., Шнейдеров Г. Р.* О состоянии подкрановых конструкций корпуса конверторного производства ОАО «Северсталь» // Промышленное и гражданское строительство. 2001. № 6. С. 31–34.
3. *Скляднев А. И., Сердюк В. В.* Усталостная долговечность и мера повреждаемости верхней зоны стенки сварных подкрановых балок // Безопасность труда в промышленности. 2004. № 11. С. 34–36.

4. *Москвичев В. В., Чабан Е. А.* Несущая способность подкрановых балок в штатных и аварийных условиях эксплуатации // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2018. № 2(58). С. 8–18.
5. *Салимов Р. Д., Иванов М. А., Щербаков И. А.* К вопросу работоспособности углового сварного шва подкрановой балки // Вестник ЮУрГУ. Серия: Металлургия. 2013. № 2(13). С. 147–150.
6. *Кожемяка С. В., Крупенченко А. В., Величко И. И.* Выбор технологии усиления стальных подкрановых балок // Вестник ДонНАСА. 2010. № 3(83). С. 47–53.
7. *Citarelli S., Feldmann M.* Fatigue failure of runway beams due to wheel loads [Усталостное разрушение подкрановых балок от нагрузок от колес] // Special Issue: Proceedings of Nordic Steel. 2019. Vol. 3. Iss. 3–4. Pp. 621–628. The 14th Nordic Steel Construction Conference, September 18–20, 2019, Copenhagen, Denmark.
8. *Wardenier J., de Vries P., Timmermann G.* Evaluation of cracks in an offshore crane runway girder [Оценка трещин в подкрановой балке морского крана] // Steel Construction. 2017. No. 10. Pp. 67–71.
9. *Овсянников В. Е.* Некоторые аспекты оценки состояния подкрановых балок // Вестник КГУ. 2011. № 1. С. 3–5.
10. *Шульга С. Н., Арутюнян Г. А.* Ремонт усталостных трещин в ездовом нижнем поясе подкраново-подстропильной фермы // Предотвращение аварий зданий и сооружений. URL: http://www.pamag.ru/pressa/remont-ustalostnih-treshin (дата обращения: 14.09.2020).
11. *Rykaluk K., Marcinczak K., Rowicski S.* Fatigue hazards in welded plate crane runway girders – locations, causes and calculations [Усталостные дефекты в сварных подкрановых балках – расположение, причины и расчет] // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2018. No. 18. Pp. 69–82.

R E F E R E N C E S

1. Fyn Syu-Tszyun', Lin' Sin'-Shan', Fan Tian. Investigation of fatigue damage to the upper zone of the walls of steel crane beams. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 1994, no. 11–12, pp. 33–35. (In Russian).
2. Artyukhov V. N., Shcherbakov E. A., Goritskiy V. M., Shneyderov G. R. On the state of crane structures of the converter housing of JSC "Severstal". *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2001, no. 6, pp. 31–34. (In Russian).
3. Sklyadnev A. I., Serdyuk V. V. Fatigue life and a measure of damage to the upper wall zone of welded crane girders. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*, 2004, no. 11, pp. 34–36. (In Russian).
4. Moskvichev V. V., Chaban E. A. The bearing capacity of the subcrane beams during regular and emergency operation. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie*, 2018, no. 2(58), pp. 8–18. (In Russian).
5. Salimov R. D., Ivanov M. A., Shcherbakov I. A. To the issue of operability of the fillet weld of the crane girder. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Metallurgiya*, 2013, no. 2(13), pp. 147–150. (In Russian).
6. Kozhemyaka S. V., Krupenchenko A. V., Velichko I. I. Choice technology's of steel under crane runway beams strengthening. *Vestnik DonNASA*, 2010, no. 3(83), pp. 47–53. (In Russian).
7. Citarelli S., Feldmann M. Fatigue failure of runway beams due to wheel loads. *Special Issue: Proceedings of Nordic Steel*, 2019, vol. 3, iss. 3–4, pp. 621–628. The 14th Nordic Steel Construction Conference, September 18–20, 2019, Copenhagen, Denmark.
8. Wardenier J., de Vries P., Timmermann G. Evaluation of cracks in an offshore crane runway girder. *Steel Construction*, 2017, no. 10, pp. 67–71.
9. Ovsyannikov V. E. Some aspects of assessing the condition of crane beams. *Vestnik KGU*, 2011, no. 1, pp. 3–5. (In Russian).
10. Shul'ga S. N., Arutyunyan G. A. Repair of fatigue cracks in the driving lower chord of the crane and rafter truss. *Predotvrashcheniye avariy zdaniy i sooruzheniy*. Available at: http://www.pamag.ru/pressa/remont-ustalostnih-treshin (accessed 14.09.2020). (In Russian).
11. Rykaluk K., Marcinczak K., Rowicski S. Fatigue hazards in welded plate crane runway girders – locations, causes and calculations. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2018, no. 18, pp. 69–82.

Для цитирования: *Такки В. Ф., Егоров И. Ф., Туснина О. А.* Повышение эксплуатационного ресурса подкрановых балок // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 12. С. 61–67. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.12.61-67.

For citation: Takki V. F., Egorov I. F., Tusnina O. A. Increasing the Operational Life of Crane Beams. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2020, no. 12, pp. 61–67. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.12.61-67. (In Russian).

ЖУРНАЛ **«ПРОМЫШЛЕННОЕ И ГРАЖДАНСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО»**
ИНДЕКСИРУЕТСЯ В РОССИЙСКОМ ИНДЕКСЕ НАУЧНОГО ЦИТИРОВАНИЯ (РИНЦ)