

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном техническом
университете

Научный руководитель:

- доктор технических наук, профессор Соколов С. А.

Официальные оппоненты:

- доктор технических наук, профессор Копельман Л. А.
- кандидат технических наук, доцент Волков К. А.

Ведущее предприятие АО «Подъемтрансмаш» (г. Санкт-Петербург)

Защита состоится “ 16 ” мая 2000 года в 16 часов на заседании
диссертационного совета Д 063.38.20 при Санкт-Петербургском государственном
техническом университете по адресу:

195251 г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, корп. 1, ауд. 41.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГТУ.

Ваши отзывы на автореферат в 2 экз., заверенные печатью, просим направлять в
диссертационный совет университета.

Автореферат разослан “ 11 ” *апреля* 2000 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 063.38.20

Кандидат технических наук, доцент

Смирнов В. Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Роль грузоподъемных машин в современной промышленности, на транспорте и в строительстве исключительно высока, в особенности это относится к мостовым кранам общего назначения, как наиболее распространенному типу грузоподъемных кранов. По мере возрастания интенсивности использования грузоподъемных машин для обеспечения механизации транспортно-технологических потоков на производстве, возрастают и требования к надежности этих машин в течении всего срока службы. В условиях сложившейся в России в настоящее время экономической ситуации предприятиям трудно изыскивать средства на обновление парка грузоподъемных машин. По этой причине большую актуальность приобретает возможность prolongation срока эксплуатации крана сверх нормативного.

Большинство подъемно-транспортных машин (ПТМ), кранов, конвейеров, подъемников и пр., относится к разряду потенциально опасных промышленных объектов. Несущая металлическая конструкция является базовым элементом, ее отказ может привести к катастрофическим последствиям, а выход из строя во многих случаях означает достижение предельного состояния машины в целом. В связи с этим методам расчета конструкций, нормированию качества их изготовления и диагностике уделяется большое внимание, как в нормативных материалах, так и в научных работах таких специалистов, как М. М. Гохберг, А. В. Вершинский, В. А. Винокуров, В. А. Ряхин, Л. А. Копельман, В. И. Труфяков и др., значимость и фундаментальность работ которых несомненны.

В настоящее время работоспособность конструкции обеспечивается на этапе проектирования путем назначения соответствующих конструктивных параметров на основании расчетов по условиям прочности, жесткости, устойчивости и сопротивления усталости. Однако на стадии оценки остаточного ресурса необходимо учитывать фактическое техническое состояние конструкции, условия эксплуатации, качество изготовления и т. д., что не предусмотрено су-

существующими методиками. При этом вероятность обеспечения остаточного ресурса должна быть не менее 0,99, отсюда все аргументы вводимые в расчет должны иметь вероятность обеспечения 0,9 ... 0,95.

Основным фактором ограничения ресурса конструкций является усталостное повреждение, с которым связано, как показывает опыт, до 90 % отказов грузоподъемных машин. Это объясняется существенной зависимостью усталостных характеристик сварных узлов от качества их изготовления, а также недостатками существующих методов нормирования усталостных характеристик и инженерных расчетов на сопротивление усталости, которые приводят к значительному разбросу параметров нагруженности и сопротивления усталости. Все это связано с тем, что используемые в настоящее время методы расчета на сопротивление усталости несмотря на современные достижения научных исследований базируются в основном на опыте 20 - 30-ти летней давности. Существующая сейчас в краностроении система нормирования усталостных характеристик сварных соединений, и в частности пределов выносливости, основана на использовании результатов пульсаторных испытаний образцов, моделирующих типовых сварных соединения, встречающиеся в элементах крановых металлических конструкций. Однако размеры образцов и условия их нагружения ограничены возможностями испытательного оборудования, сварка обычно производится в лаборатории высококвалифицированными сварщиками, а в связи с высокой стоимостью таких испытаний их количество не велико и не позволяет сделать надежные статистические обобщения. При таком подходе не учитывается в полном объеме влияние фактических размеров и конструктивно-технологических параметров рассчитываемого элемента. Таким образом, данное обстоятельство не только не позволяет использовать существующие системы нормирования на стадии оценки остаточного ресурса конструкции, как индивидуальной характеристики, но и не дает достаточно надежной оценки долговечности конструкций на стадии проектирования.

Целью диссертационной работы является развитие методического обеспечения прогнозирования остаточного ресурса металлических конструкций остовых кранов. При этом полученные результаты имеют более широкую область применения, так как обеспечивают повышение оперативности и надежности расчетов долговечности конструкций и на стадии проектирования кранов.

Защищаемые научные результаты, полученные лично автором и обладающие научной новизной:

1. Методика и результаты определения границ областей ограниченной и неограниченной долговечности главных балок мостовых кранов общего назначения в пространстве параметров длина пролетного строения и грузоподъемность.
2. Результаты исследования концентрации напряжений методом конечных элементов в сварных соединениях с лобовыми швами и выводы о влиянии на нее различных геометрических параметров данных соединений.
3. Усовершенствование аналитической методики расчета теоретического коэффициента концентрации напряжений в сварных соединениях, обеспечивающее повышение точности расчета.
4. Общая структура системы нормирования пределов выносливости сварных соединений, учитывающая их конструктивно-технологические особенности, систематизация сварных узлов, характерных для крановых металлических конструкций, охватывающая 63 варианта конфигурации, и обоснование базовых характеристик и конструктивно-технологических коэффициентов для соединений с угловыми швами.
5. Рекомендации по минимизации объема исходных данных, используемых в методике В. Н. Юшкевича для определения коэффициентов концентрации соединений с угловыми швами.

Достоверность научных положений и выводов диссертационной работы базируется на использовании современных методов численного анализа напряженно-деформированного состояния сварных соединений, проверенных

программных продуктов, а также результатах сопоставления с данными испытаний образцов и моделей сварных соединений.

Практическая ценность работы. Полученные области ограниченной неограниченной долговечности главных балок мостовых кранов общего назначения позволяют по основным параметрам крана оперативно делать заключения о необходимости выполнения расчета на сопротивление усталости как при проектировании, так и при оценке остаточного ресурса. Разработанная методика нормирования пределов выносливости сварных узлов позволяет существенно повысить достоверность определения усталостных характеристик сварных узлов при минимальных затратах и объемах исходной информации.

Публикации. Основные результаты работы опубликованы в пяти статьях автора.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 119 наименований, 40 рисунков, 15 таблиц. Общий объем основного текста с иллюстрациями составляет 145 стр.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе анализируется состояние проблемы прогнозирования остаточного ресурса, формулируются цели и задачи настоящей работы.

Представлены результаты исследования сопротивления усталости металлических конструкций мостовых кранов общего назначения грузоподъемностью от 5 до 50 тонн и длиной пролета от 10 до 40 метров с листовой двухбалочной конструкцией. При этом исследовались области сочетания параметров крана (грузоподъемности, пролета, группы режима работы и марки стали), в которых выполняется условие ограниченной долговечности, достаточной для соответствующего режима работы, и неограниченной долговечности. Расчет на сопротивление усталости проводился по методу допускаемых напряжений для центрального сечения пролетного строения. При моделировании процесса на-

ружения в запас надежности принимались наиболее жесткие условия эксплуатации: работа с полным грузом (класс нагружения Q4); максимальные значения динамического коэффициента $\psi_m = 1,17$; достаточно полное использование свойств металла по условию прочности ($\sigma_{\max} = 0,8 [\sigma]$ и $\sigma_{\text{max}} = [\sigma]$).

На основе справочных данных была построена формула для расчета весов полумостов мостовых кранов общего назначения

$$G(L, Q) = k_1 k_2 k_3 G_0(L, Q) = k_1 k_2 k_3 L^{1,7} (9,9 \times 10^{-4} Q^{1,5} + 0,22),$$

где $k_1 = 1,3; 1,4$, $k_2 = 1,1$; 1- для малоуглеродистых и низколегированных сталей соответственно, $k_3 = 0,85; 1; 1,15; 1,25$ - для режимов работы крана 1К - 4К, 5К, 6К - 7К, 8К соответственно. В данную формулу грузоподъемность Q следует подставлять в т., пролет L - в м., G получается в кН.

Аналогичным образом выведена аналитическая зависимость веса тележки от грузоподъемности крана (Q)

$$G_{\text{тел}}(Q) = 1,8 \times 10^{-3} Q^{2,5} + 1,89.$$

При оценке процесса нагружения главной балки предполагалось, что кран постоянно работает по наиболее неблагоприятному характерному технологическому циклу (ХТП).

Для графического представления областей параметров, удовлетворяющих условиям неограниченной и ограниченной долговечности по методу допускаемых напряжений, были получены общие уравнения их границ:

$$\frac{\sigma_{-1К}}{n} - \sigma_{-1К} \left(\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{RK}(Q, L)} \right)^{\frac{m}{m-1}} = 0; \quad \frac{\sigma_{-1К}}{n} \left(\frac{N_6}{Z_{кр} n_{31}} \right)^{\frac{1}{m-1}} - \sigma_{-1К} \left(\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{RK}(Q, L)} \right)^{\frac{m}{m-1}} = 0.$$

Здесь $\sigma_{-1К} = 42,5$ МПа - предел выносливости сварного узла при симметричном цикле на базе $N_6 = 5000000$ циклов для сварных узлов с поперечными швами; $\sigma_{RK}(Q, L)$ - предел выносливости того же соединения при фактическом цикле изменения напряжений, зависящий от параметров Q и L ; m и m_{-1} - показатели степени кривой усталости при произвольном и симметричном цикле.

Примеры областей ограниченной и неограниченной долговечности металлических конструкций из стали Ст3 показаны соответственно на рис. 1 и 2 (а – при $\sigma_{\max} = 0,8 [\sigma]$, б - при $\sigma_{\max} = [\sigma]$). Здесь цифрами показаны границы для различных режимов работы крана: на рис. 1 - 1 – режимы 1К - 4К; 2 – 5К; – 6К - 7К; 4 – 8К; а на рис. 2 - 1 - 4К; 2 – 5К; 3 – 6К; 4 - 7К; 5 – 8К.

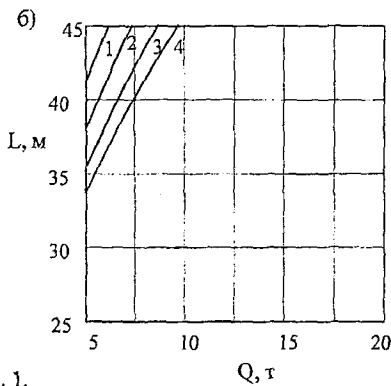
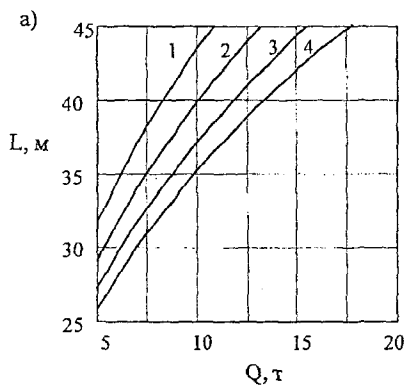


Рис. 1.

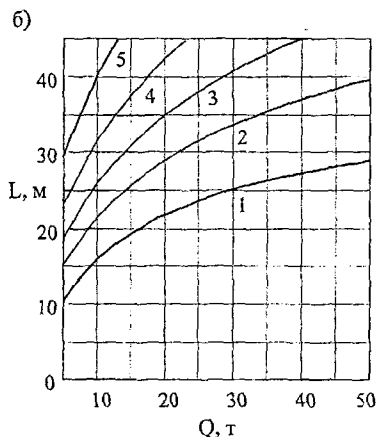
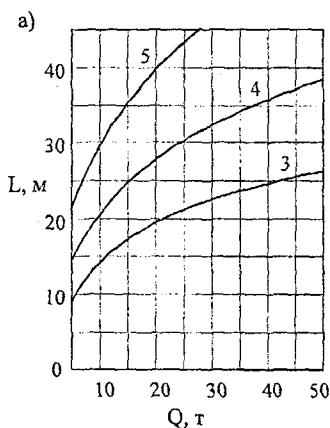


Рис. 2.

Таким образом, опираясь на полученные графики можно рекомендовать следующее. Из графика видно, что практически для всех кранов с пролетом менее 25 м неограниченная долговечность главных балок не обеспечена. Точки, находящиеся выше кривой на рис. 1 соответствуют параметрам кранов, главные

алки которых удовлетворяют условию неограниченной долговечности. В этом случае, если при обследовании крана после окончания установленного срока службы на его металлоконструкции не обнаружено коррозионных и механических повреждений, можно без проведения расчета допускать дальнейшую эксплуатацию данного крана.

Аналогичным образом используя графики на рис. 2 можно обосновать необходимость расчета на сопротивление усталости на стадии проектирования. Как например, всегда существует неопределенность при решении вопроса о необходимости проведения расчета на сопротивление усталости кранов группы режима работы 4К-6К. На основании приведенных графиков можно утверждать, что краны до режимной группы 6К включительно не следует проверять на сопротивление усталости, если их пролет удовлетворяет условию $L \geq 12 + 0,3Q$, где Q в т, L в м.

Во второй главе проводится обзор и анализ существующих российских и зарубежных методов определения и нормирования усталостных характеристик сварных узлов. На основании данного анализа выявлены недостатки, не позволяющие использовать существующие системы нормирования усталостных характеристик для прогнозирования остаточного ресурса листовых крановых конструкций: а) усталостные характеристики назначаются вне зависимости от абсолютных размеров узлов; б) нормативные усталостные характеристики не отражают влияние технологии и качества изготовления конструкции; в) в отечественных системах не указывается вероятность обеспечения нормативных усталостных характеристик.

Предложена новая методика нормирования, которая бы позволяла учитывать информацию, полученную при обследовании конструкции на определенном этапе эксплуатации, и ориентированная на применение в рамках метода предельных состояний. Данная методика содержит следующие компоненты:

1. Таблицу схем сварных узлов (соединений), систематизированных по группам, каждая из которых состоит из базового узла и ряда производных соединений, отличающихся от базового вариацией конструктивных форм
2. Значения пределов выносливости базовых сварных узлов при симметричном цикле нагружения на базе $N = 2 \cdot 10^6$ циклов, соответствующие вероятности обеспечения не менее $P = 0,95$.
3. Систему поправочных конструктивно-технологических коэффициентов для вычисления пределов выносливости производных узлов (соединений), которые учитывают отличия размеров, материала, технологии и качества изготовления производных соединений от базового.

Предлагаемая система нормирования пределов выносливости включает ограниченное число базовых сварных узлов, пределы выносливости, которые могут быть достаточно надежно определены и проверены экспериментально. В качестве базового принимается сварное соединение определенного типа, выполненное ручной сваркой из стали Ст3 с нормативными значениями $\sigma_t = 25$ МПа и $\sigma_b = 380$ МПа, из листов толщиной 10 мм, с горизонтальным и вертикальным катетами 8 мм, при положительном усилении шва и отсутствии подреза, радиусе закругления в месте перехода от шва к основному металлу 0,4 мм.

В соответствии с общими положениями предложенной методики нормирования проведе

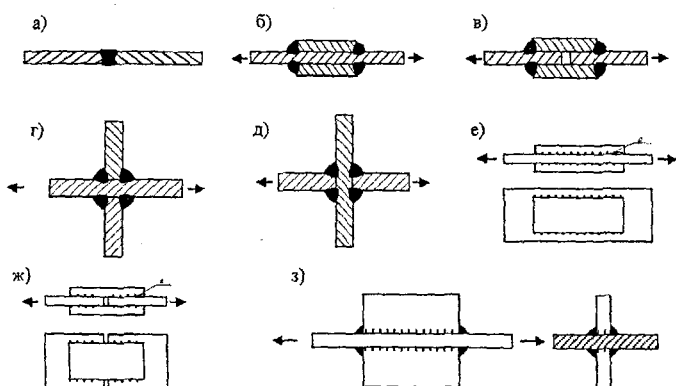


Рис. 3.

на систематизация конструкций типичных для крановых металлических конструкций сварных узлов, охватывая 63 варианта конфигурации п

группам соединений. Схемы базовых соединений для каждой группы представлены на рис. 3.

Приняв за основу расчетную методику определения пределов выносливости В. Н. Юшкевича и используя понятие базового сварного соединения, получено выражение для расчета пределов выносливости производных сварных узлов:

$$\sigma_{-1K} = \Psi \gamma_1 \gamma_2 \eta_{ост} \sigma_{-1K}^6, \quad (1)$$

где σ_{-1K}^6 - предел выносливости базового сварного соединения; γ_1 - технологический коэффициент, учитывающий способ сварки соединения и тип стали; γ_2 - коэффициент влияния местного изгиба; Ψ - коэффициент влияния геометрии шва; $\eta_{ост}$ - коэффициент влияния остаточных напряжений.

$$\gamma_1 = \frac{\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_B} v \chi_B - (1-\beta) \xi \chi_T \Omega}{\frac{\sigma_{-1}^6}{\sigma_B^6} v^6 \chi_B^6 - (1-\beta^6) \xi^6 \chi_T^6 \Omega^6}, \quad \eta_{ост} = \frac{\beta \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_B} \chi_B v - \omega_{ост} (1-\beta) \chi_T \Omega \right)}{\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_B} \chi_B v - (1-\beta) \chi_T \xi \Omega}$$

$$\gamma_2 = \frac{1 + \rho^6 c^6}{1 + \rho c}, \quad \Psi = \frac{\sigma_B}{\sigma_B^6} \frac{\alpha^6 \varphi^6}{\alpha \varphi} = \lambda \frac{\sigma_B}{\sigma_B^6} \frac{\varphi^6}{\varphi}.$$

Здесь $\rho = \alpha_{из} \varphi_{из} / \alpha \varphi$; $\Omega = \sigma_T / \sigma_B$; $\omega_{ост} = \sigma_{ост} / \sigma_T$; c - коэффициент местного изгиба; верхний индекс «б» обозначает принадлежность к базовому сварному соединению.

Третья глава посвящена исследованию и совершенствованию методики определения параметров концентрации напряжений в соединениях с угловыми швами.

Методом конечных элементов (МКЭ) рассчитаны значения теоретического коэффициента концентрации напряжений (ТККН) для сварных соединений с лобовыми швами. При этом рассмотрено более 60 вариантов конечно-элементных моделей с различной формой швов, с подрезами и без и при различных соотношениях размеров элементов.

Выполнена модернизация методики В. Н. Юшкевича по определению ТККН с целью повышения точности результатов и обоснованности учета толщины основного листа. Для этого использованы формулы Нейбера для расчета ТККН при растяжении полосы с надрезом произвольной глубины и упрощенные формулы для мелкой и глубокой ступеней. В результате получены скорректированные формулы для расчета ТККН и коэффициента влияния толщины основного элемента:

$$\alpha = [1 + (\alpha_{\text{ис}} - 1) p_{\phi} p_n p_{\delta} + (\alpha_n - 1)] p_n, \quad (2)$$

где $p_{\delta} = \frac{1}{\sqrt{1 + 3,6 \frac{l_2}{\delta_0}}}$ - коэффициент влияния толщины.

Для проверки адекватности предложенной формулы было проведено сравнение значений ТККН, полученных по формуле В. Н. Юшкевича и по выражению (2) с результатами расчета по МКЭ. Результаты сравнения представлены в графическом виде на рис. 4. Как видно из него расчет по новой формуле

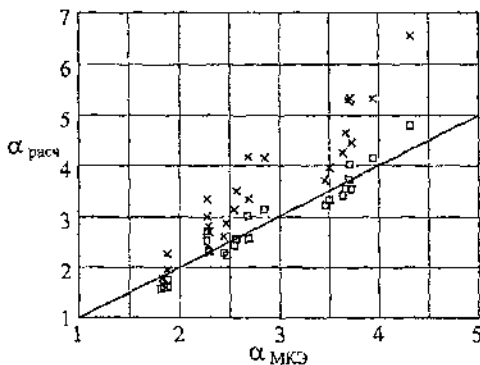


Рис. 4.

(□) дает меньшую погрешности нежели при расчете по формуле В. Н. Юшкевича (x). В численном выражении это выглядит следующим образом: погрешность расчета по новой формуле составляет от -15% до $+30\%$, а по В. Н. Юшкевичу — от -10% до $+85\%$.

Для реализации предлагаемой инженерной системы нормирования пределов выносливости, по возможности сочетающей простоту существующих табличных методов, базирующихся на результатах эксперимента, и многофакторность расчетных методов, необходимо максимально сократить объем исходной информации для расчета и представить ее в табличной форме, удобной для практического применения. С этой целью проведено статистическое исследо-

ание математической модели ТККН по методике В. Н. Юшкевича с учетом вышеописанной корректировки, позволившее определить степень влияния отдельных геометрических параметров. На основании этого анализа некоторые малозначащие параметры, влиянием вариаций которых можно пренебречь, такие как толщины привариваемых накладок (δ_1) или поперечных ребер (δ_n), горизонтальный (k_r) и вертикальный (k_n) катеты, зафиксированы по отношению к толщине основного листа (δ_0) в некоторых интервалах (табл. 1).

Таблица 1.

$\delta_0, \text{мм}$	$6 \leq \delta_0 \leq 12$	$12 < \delta_0 \leq 20$		$20 < \delta_0 \leq 30$		$30 < \delta_0 \leq 40$	
$\delta_1, \text{мм}$	$6 \leq \delta_1 \leq 15$	$6 \leq \delta_1 \leq 15$	$15 < \delta_1 \leq 25$	$6 \leq \delta_1 \leq 15$	$15 < \delta_1 \leq 30$	$7 \leq \delta_1 \leq 16$	$16 < \delta_1 \leq 40$
δ_1/δ_0	1,1	0,65	1,3	0,4	1,0	0,3	0,8
k_r/δ_0	0,9	0,6	0,7	0,4	0,5	0,3	0,38
k_n/δ_0	0,9	0,58	0,68	0,4	0,65	0,32	0,46

В четвертой главе показана реализация предлагаемой системы нормирования пределов выносливости для соединений с поперечными ребрами и накладок, приваренных лобовыми швами.

Для указанных типов сварных соединений по методике В. Н. Юшкевича получены численные значения базовых пределов выносливости: $\sigma_{-1К}^{\text{б. ребр.}} = 35$ МПа; $\sigma_{-1К}^{\text{б. накл.}} = 32$ МПа. Определение поправочных коэффициентов проводилось по вышеприведенным формулам с учетом предложенных корректировок для методики расчета ТККН. Для обоснования дискретизации рекомендуемых значений, как и ранее, использовался метод статистических испытаний. Разыгрывался массив из 10000 комбинаций значений всех геометрических параметров сварных соединений, которые случайным образом выбирались из заданных интервалов по равномерному закону распределения. По каждой комбинации вычислялось значение соответствующего конструктивно-технологического коэффициента. Полученный массив подвергался статистической обработке. На основании данной обработки формировались таблицы значений коэффициентов. Данное исследование в полном объеме выполнено для варных соединений с поперечными ребрами и с накладками, приваренными лобовыми швами. В результате предел выносливости производного соединения

указанного типа, отличающегося от базового размерами, технологией изготовления или качеством, определяется как

$$\sigma_{-1K} = \eta_{ост} \gamma_1 \gamma_2 \lambda \sigma_{-1K}^6 (0,0014 \sigma_B + 0,45),$$

где σ_B - в МПа; γ_1 - определяется по табл. 2; λ - по табл. 3; γ_2 - коэффициент влияния местного изгиба, рассчитывается по формуле

$$\gamma_2 = \frac{1,185}{1 + 0,93c};$$

$\eta_{ост}$ - коэффициент влияния остаточных напряжений, который определяется по выражению

$$\eta_{ост} = \begin{cases} 1,8 - 0,94 \omega_{ост} & \text{при } \omega_{ост} < 0,85; \\ 1 & \text{при } \omega_{ост} \geq 0,85. \end{cases}$$

Таблица 2.

	Ручная сварка	Полуавтоматическая сварка	Автоматическая сварка
Малоуглеродистая сталь	1	1	1
Низколегированная сталь	0,9	1	0,8

Таблица 3

Толщины свариваемых листов, мм.								
δ_0		$6 \leq \delta_0 \leq 12$	$12 < \delta_0 \leq 20$		$20 < \delta_0 \leq 30$		$30 < \delta_0 \leq 40$	
δ_n		$6 \leq \delta_n \leq 15$	$6 \leq \delta_n \leq 15$	$15 < \delta_n \leq 25$	$6 \leq \delta_n \leq 15$	$15 < \delta_n \leq 30$	$7 \leq \delta_n \leq 16$	$16 < \delta_n \leq 40$
$s > 0$	$t_n = 0$	1	1	0,92	0,95	0,84	0,92	0,8
	$0 < t_n \leq 0,5$	0,67	0,71	0,67	0,7	0,64	0,7	0,62
	$0,5 < t_n \leq 1$	0,5	0,6	0,56	0,6	0,55	0,6	0,54
$s < 0$	$t_n = 0$	1,22	1,17	1,05	1,16	0,97	1,13	0,93
	$0 < t_n \leq 0,5$	0,78	0,82	0,76	0,82	0,72	0,81	0,71
	$0,5 < t_n \leq 1$	0,6	0,68	0,63	0,7	0,62	0,68	0,61

Проведена проверка адекватности предложенной методики путем сравнения с результатами пульсаторных испытаний, полученных в различных лабораториях. Сопоставление расчетных пределов выносливости (рис. 5 и 6, по вертикальной оси) с экспериментальными (по горизонтальной оси) показывает, что предлагаемая методика (рис.5,а и 6,а), учитывающая влияние конструктивных технологических характеристик, обеспечивает лучшее соответствие эксперименту, чем существующие нормативные (рис.5,б и 6,б). На рис.5 показаны ре-

льтаты сравнения для поперечных ребер, а на рис.6 – для накладок, риваренных лобовыми швами.

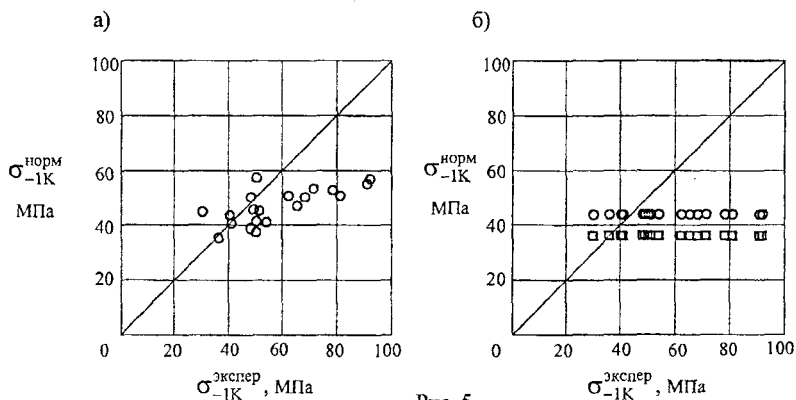


Рис. 5.

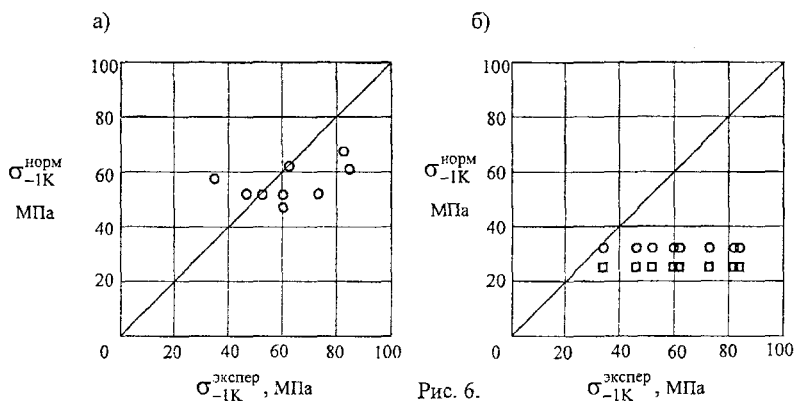


Рис. 6.

Представлены результаты практической реализации методики оценки остаточного ресурса мостового крана с обследованием его конструкции, экспериментальной оценкой нагруженности и расчетом остаточного ресурса с использованием предложенной системы оценки пределов выносливости. При этом использовалась программа ReLiCS, разработанная на кафедре ИТКСМ СПбГТУ в рамках комплексной методики оценки остаточного ресурса мостовых кранов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем диссертационном исследовании автором разработан ряд методических материалов, направленных на развитие и совершенствование методического обеспечения оценки остаточного ресурса грузоподъемных кранов, являющихся новым научным результатом в области обеспечения надежности подъемно-транспортных машин. Основные выводы и результаты диссертационной работы сводятся к следующему:

1. На основании обзора и анализа существующих методик расчета и сопротивления усталости было показано, что они непригодны для оценки остаточного ресурса крановых конструкций, так как не дают возможности учесть существующее техническое состояние и качество изготовления. На основании этой цель настоящей работы определена, как совершенствование методического обеспечения прогнозирования остаточного ресурса металлических конструкций и в первую очередь методики нормирования усталостных характеристик сварных соединений.

2. На основе анализа нагруженности и сопротивления усталости металлических конструкций мостовых кранов общего назначения разработана методика расчета и получены границы областей ограниченной и неограниченно долговечностей в зависимости от их грузоподъемности, пролета, группы режима работы и марки стали. Решение данной задачи позволяет на стадии проектирования оценить необходимость расчета конструкции на сопротивление усталости, а при обследовании старого крана - необходимость расчетной оценки остаточного ресурса.

3. Разработана общая структура методики нормирования пределов выносливости сварных соединений, предназначенная для использования при расчетах крановых конструкций по предельным состояниям. Методика включает таблицы систематизированных схем сварных узлов, значения пределов выносливости для базовых сварных узлов и систему конструктивно-технологические

эффицентов. Предложенная таблица сварных узлов охватывает 63 варианта соединений.

4. Получены уточненные формулы для расчета теоретических коэффициентов концентрации напряжений для сварных соединений с угловыми швами. Для их проверки методом конечных элементов выполнено исследование концентрации напряжений для соединений с лобовыми швами. Рассмотрено более 10 вариантов конечно-элементных моделей. Результаты исследования подтвердили эффективность предложенных аналитических решений и позволили сделать ряд выводов о влиянии отдельных геометрических параметров данных соединений на концентрацию напряжений.

5. С целью получения приемлемой для практического применения табличной формы представления конструктивно-технологических коэффициентов, проведен статистический анализ используемых математических моделей, выявлены малозначащие аргументы, которые зафиксированы по отношению к толщине основного листа в определенных интервалах. Данная процедура позволила сформировать компактные таблицы для определения указанных коэффициентов.

6. Предложенная методика в полном объеме реализована для сварных узлов с поперечными ребрами и накладками, приваренными лобовыми швами. Для них получены численные значения базовых пределов выносливости и конструктивно-технологических коэффициентов. Проведена проверка адекватности данных предложений путем сравнения с результатами пульсаторных испытаний, которая показала преимущество предлагаемой системы по сравнению с существующими.

7. Приведен пример использования разработанного методического обеспечения для оценки остаточного ресурса мостового крана, работающего в цехе химической обработки Балтийского завода. Для этого проведено обследование технического состояния его несущей конструкции, выполнено тензометрическое исследование эксплуатационной нагруженности, по предложенной методике вычислен предел выносливости для сварочного концентратора и с помощью

программы ReLiCS рассчитан остаточный ресурс. Результаты представлены в виде протокола, выдаваемого программой.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Тё В. М., Соколов С. А. Анализ нагруженности и сопротивления усталости металлических конструкций мостовых кранов // Молодежная научная конференция (в рамках 26-ой Недели науки СПбГТУ). Материалы докладов. Ч. I. СПб.: СПбГТУ, 1998. - С. 142 – 143.
2. Тё В. М., Соколов С. А. Исследование усталостных характеристик сварного соединения с угловыми швами // XXVII Неделя науки СПбГТУ (7 – 12 дек. 1998 г.). Ч. II: Материалы межвузовской научной конференции (механико-машиностроительный факультет и факультет технологии и исследования материалов). – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1999. – С. 73 – 74.
3. Соколов С. А., Тё В. М. Система нормирования пределов выносливости сварных соединений // Известия ТулГУ: Подъемно-транспортные машины оборудование. Вып. 2. – Тула: Изд-во ТулГУ, 1999. С. 199 - 207
4. Соколов С. А., Тё В. М. Исследование условий сопротивления усталости металлических конструкций мостовых кранов общего назначения. // Труды СПбГТУ. – 2000. - № 478. – С. 111-116.
5. Тё В. М., Соколов С. А. Исследование концентрации напряжений в сварных соединениях с лобовыми швами // XXVII Неделя науки СПбГТУ. Ч. II: Материалы межвузовской научной конференции (механико-машиностроительный факультет и факультет технологии и исследования материалов). – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000.