

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ
ОДЕССКИЙ
ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ МОРСКОГО ФЛОТА

На правах рукописи

ТРИКОЛЕНКО
Николай Владимирович

УДК 621.875.5:620.17.001.5 (045)

КИНЕТИКА РАЗРУШЕНИЯ КРАНОВЫХ
МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ
В КОРРОЗИОННО-АКТИВНЫХ
МОРСКИХ СРЕДАХ



Специальность 05.05.05

«Подъемно-транспортные машины»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Одесса — 1994

ЛНБ України ім. В. Стефаніка



00777100 (M) зена

в Одеському інституті інженерів морського флоту

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент **Пустовой В. Н.**

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор **Крук Л. Д.** (Одесский институт инженеров морского флота);

кандидат технических наук, доцент **Печенюк С. С.** (Украинский государственный институт краеностроения).

Ведущая организация: Одесская Государственная Морская Академия.

Защита состоится 17 ноября 1994 года в 14⁰⁰ час.
на заседании специализированного ученого Совета К 101.04.03
в Одеськом інституті інженерів морського флоту по адресу:
Україна, 270029, г. Одесса, ул. Мечникова, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Одесского института инженеров морского флота.

Автореферат разослан 11 ноября 1994 года.

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АБ України

Ученый секретарь
специализированного
ученого Совета
кандидат технических наук,
доцент

Л. В. КНЯЗЕВ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ. Metalлоконструкции судовых и портовых грузоподъемных машин работают в условиях коррозионных морских сред, циклических и динамических нагрузок, переменных климатических температур. Усталостное и коррозионное разрушение определяют эксплуатационный ресурс металлоконструкции и грузоподъемной машины в целом.

Известные классические методы усталостных испытаний материалов предполагают испытания в инертных средах. В реальных эксплуатационных условиях усталостное разрушение происходит под воздействием коррозионных сред, различных температур, переменных условий нагружения.

Анализ показывает, что в литературных источниках практически отсутствуют какие-либо исследования по влиянию коррозионных сред на усталостное разрушение и ресурс крановых металлоконструкций, исследования кинетических эффектов торможения или ускорения скорости роста коррозионных трещин, порогов усталости, критических параметров разрушения.

Настоящая работа посвящена исследованию кинетики разрушения сталей и сварных соединений крановых металлоконструкций в условиях коррозионно-активных морских сред на примере конструкционных сталей типа 10ХСНД, 09Г2С, Ст20, St-38-В2, применяемых в краностроении.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ. Исследовать кинетические эффекты коррозионно-усталостных трещин в сталях и сварных соединениях металлоконструкций грузоподъемных машин. Разработать методику расчета остаточного ресурса металлоконструкций с коррозионным повреждением.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА работы заключается в исследовании влия-

ния эксплуатационных коррозионных сред на усталостное разрушение крановых металлоконструкций и создании методики расчета остаточного ресурса металлоконструкции на стадии роста усталостных трещин.

Решение этой задачи основано на методологическом подходе включающем: анализ типовых дефектов металлоконструкций портовых грузоподъемных машин (ПГМ) эксплуатационного происхождения; методику исследования коррозионно-циклической трещиностойкости сталей и зон сварных соединений металлоконструкций ПГМ; методику исследования кинетических эффектов в вершине трещины применительно к сталям крановых металлоконструкций; методику определения коэффициентов интенсивности напряжений для типовых силовых схем элементов крановых металлоконструкций с коррозионно-усталостными трещинами; методику расчета остаточного ресурса сварных металлоконструкций ПГМ.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ работы заключается в разработке эффективной методики прогнозирования остаточного ресурса металлоконструкций грузоподъемных машин, удобной для применения в инженерной практике.

ДОСТОВЕРНОСТЬ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ обеспечена метрологическим контролем с использованием стандартизованных методик, программ расчетов и методов оценки погрешностей исследований.

НА ЗАЩИТУ ВНОСЯТСЯ:

методика расчета коррозионно-циклической трещиностойкости конструкционных сталей и зон сварных соединений в агрессивной морской среде;

характеристики циклической трещиностойкости сталей 10ХСНД и St-38-в2 и зон сварных соединений с учетом влияния эксплуатационных морских сред, характера нагружения;

коэффициенты интенсивности напряжений типовых силовых схем нагружения крановых металлоконструкций;

методика расчета остаточного ресурса сварных крановых металлоконструкций с коррозионными трещинами;

ВНЕДРЕНИЕ. Результаты исследований внедрены на 19 предприятиях с подтвержденным экономическим эффектом 3 млн. руб (цены 1986-1991 г.г) и используются в расчетах при экспертных оценках остаточного ресурса металлоконструкций грузоподъемных машин;

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ. Основные результаты работы доложены и одобрены на научно-технических конференциях Одесского института инженеров морского флота (Одесса, 1987, 1990, 1991, 1992, 1993 г.г), на Республиканской научно-технической конференции "Повышение надежности и долговечности машин и сооружений", институт проблем прочности АН УССР (Киев, 1991г), на Международном симпозиуме по Трибофатике (Гомель, Республика Беларусь, 1993г).

ПУБЛИКАЦИИ. По теме диссертации опубликовано 5 научных работ.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ ДИССЕРТАЦИИ. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (88 наименований) и приложений. Объем работы страниц 147, в том числе рисунков 58, таблиц 3.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

В ПЕРВОЙ ГЛАВЕ "Состояние вопроса и задачи исследования" на основе анализа литературных источников и статистического материала приведены данные по влиянию эксплуатационных сред на прочность и ресурс крановых металлоконструкций. Приведены сведения о характере эксплуатационных нагрузок, температур, типовых дефектов и видах разрушения металлоконструкций перегрузочных машин. Приведены сведения о нормативных сроках эксплуатации и методах оценки остаточного ресурса металло-

конструкций с усталостным повреждением, дан анализ применяемых методов контроля качества металлоконструкций с коррозионным повреждением.

В существующих нормативно-технических документах, регламентирующих безопасную эксплуатацию сварных металлоконструкций грузоподъемных машин, не учитывается наличие в материале скрытых дефектов различного происхождения, а также история и характер нагружения, наличие агрессивных эксплуатационных сред, их влияние на ресурс металлоконструкций в целом.

В системе технической эксплуатации отсутствуют критерии выбраковки и нормы снижения несущей способности элементов конструкций кранов при коррозионном повреждении. Перечисленные вопросы создают неопределенность в установлении нормативных сроков эксплуатации, в оценке предельного состояния металлоконструкции.

Анализ состояния проблемы позволил сформулировать следующие задачи исследования:

исследовать напряженно-деформированное состояние и механизмы коррозионного разрушения металлоконструкций портовых перегрузочных машин с учетом особенностей конструкции, характера нагружения, эксплуатационных сред и климатических температур;

исследовать кинетические эффекты и механизмы разрушения коррозионно-усталостных трещин при пороговых и критических значениях коэффициентов интенсивности напряжений (КИН);

исследовать влияние технологических перерывов в нагружении на скорость роста усталостных трещин и влияние повышенных температур на пороги коррозионной усталости;

исследовать влияние коэффициента асимметрии цикла на коррозионно-циклическую трещиностойкость сталей, зон сварных

соединений;

разработать коэффициенты интенсивности напряжений для типовых силовых схем нагружения, исследовать конструкционные стали и зоны сварных соединений на коррозионно-циклическую трещиностойкость;

разработать методику расчета остаточного ресурса крановых металлоконструкций с коррозионным повреждением на стадии роста усталостных трещин. *

ВО ВТОРОЙ ГЛАВЕ "Кинетика разрушения сталей крановых металлоконструкций" определены основные факторы влияющие на процесс коррозионно-усталостного разрушения сталей, исследованы кинетические эффекты в вершине трещины под воздействием коррозионных сред. Приведен анализ критериев локального разрушения. Определены направления дальнейших исследований.

Основными факторами, влияющими на скорость распространения коррозионно-усталостных трещин в конструкциях, являются температура среды и коррозионная активность среды. Анализ температурных зависимостей механических характеристик исследуемых сталей подтверждает необходимость исследований влияния климатических температур на коррозионно-циклическую трещиностойкость конструкционных сталей.

С целью определения влияния эксплуатационных коррозионно-активных сред на кинетику усталостных трещин в сталях и зонах сварных соединений и ресурс конструкции необходимо исследовать кинетические эффекты, возникающие в вершинах коррозионно-усталостных трещин под воздействием морских агрессивных сред с учетом влияния характера и истории нагружения конструкции.

Анализ силовых и деформационных критериев локального разрушения подтверждает целесообразность выбора критерия Ирвина для исследования механизмов разрушения элементов крановых ме-

таллоконструкций.

Трещины исследуются сквозные, соотношение толщин элементов, размеров пластических зон и длин трещин соответствует условиям автомодельности.

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ приведена методика исследования коррозионно-циклической трещиностойкости сталей и зон сварных соединений; представлены стенды и оборудование использованные при проведении эксперимента.

Целью исследования сталей на коррозионно-циклическую трещиностойкость является установление зависимости между скоростью роста усталостных трещин и полем напряжения в ее вершине, определения характеристик циклической трещиностойкости сталей и зон сварных соединений с учетом влияния агрессивной морской среды.

В ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ приведены результаты исследования конструкционных сталей 10ХСНД, St-38-в2 и зон сварных соединений в агрессивных средах: морской воде; морском тумане; морском тумане насыщенном сульфатом аммония; морском тумане насыщенном сульфатом аммония при повышенных температурах.

Исследованы механизмы коррозионно-усталостного разрушения, эффекты закрытия трещин и коррозионного растрескивания, механизмы торможения и ускоренного роста трещин, пороги коррозионной усталости и критические значения КИН.

Исследована роль параметров нагружения, асимметрии цикла, повышенных температур, технологических перерывов в нагружении, физико-химических и других факторов, влияющих на процесс коррозионного разрушения металлоконструкций.

Влияние коррозионно-активной морской среды вносит существенные изменения в характер развития усталостных трещин. Особенно это сказывается в низко- и среднеамплитудной области кинетических диаграмм циклической трещиностойкости (КЦТ).

Коррозионная среда замедляет рост усталостной трещины на участке низких скоростей (рис. 1), что проявляется в снижении порогового размаха ΔK в сравнении с диаграммой полученной на воздухе. Изменение поля напряжения в вершине трещины обусловлено коррозионным затуплением вершины трещины, влиянием эффекта закрытия трещины за счет образования продуктов коррозии на поверхностях разрушения.

В области средних амплитуд КДЦТ положительное влияние агрессивной среды ослабевает и скорость разрушения увеличивается в 1,5...2 раза (рис. 1), что объясняется увеличением длины трещины, размаха ΔK , и ослаблением эффекта закрытия трещины.

Роль агрессивной среды в пределах высокоамплитудного участка КДЦТ в формировании механической ситуации в вершине усталостной трещины незначительна.

Сравнительный анализ коррозионно-циклической трещиностойкости сталей и зон сварных соединений (металл шва и зона сплавления) свидетельствует о повышении сопротивления росту трещин в зонах сварных соединений по сравнению с основным металлом. Особенно это характерно при малых ΔK .

Увеличение коэффициента асимметрии цикла R от 0 до 0,7 снижает уровень порога коррозионно-циклической трещиностойкости, кинетическая кривая смещается в сторону более низких ΔK .

Снижение R до -1 вызывает повышение трещиностойкости наиболее ошутимое в области средних скоростей роста трещины. Пороговый показатель трещиностойкости стали, например 10ХСНД, увеличивается с 13 до 16,5 МПа $\cdot\sqrt{м}$ за счет интенсификации эффекта закрытия трещины, вызванного усиленным образованием продуктов коррозии в полости трещины вследствие наличия сжимающей части цикла нагружения.

Технологические перерывы в нагружении с выдержкой при

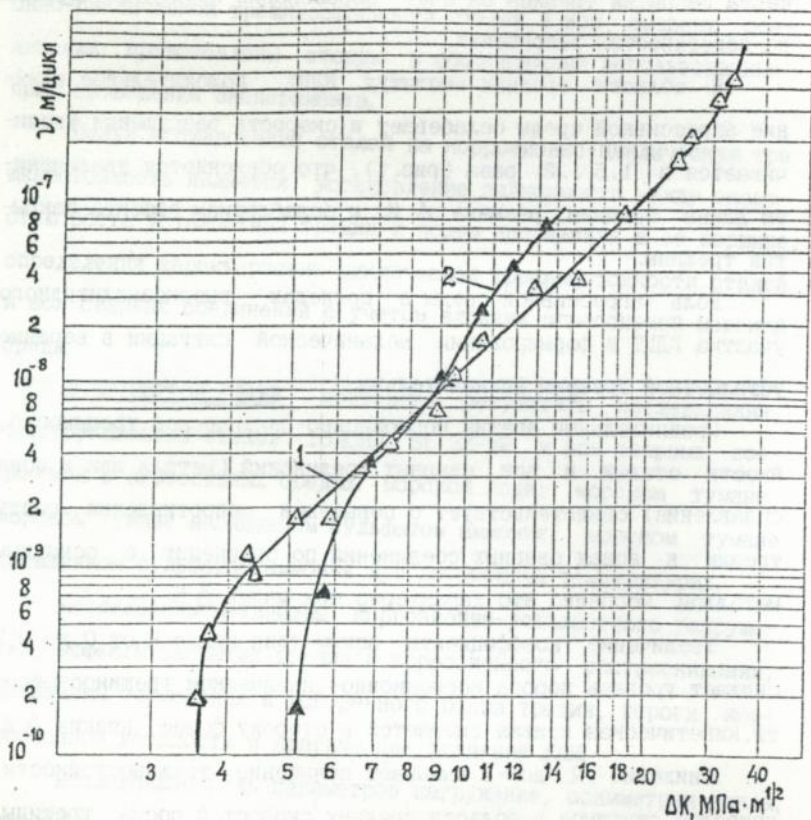


Рис. 1. Кинетические диаграммы усталостного разрушения стали IXCHND, испытанной на воздухе (1) и в морском тумане (2).

Клакс способствуют сопротивлению материала росту коррозионной трещины. При разгрузке трещина, при том же значении размаха ΔK , развивается медленнее. Скорость продвижения трещины снижается и не достигает начального уровня, задаваемого прикладываемым размахом КИН. Торможение трещин менее значительно в припороговой области ΔK и существенно проявляется при повышении размаха ΔK .

При испытаниях в условиях повышенных температур коррозионной среды до $+40^{\circ}\text{C}$ заметно усиливается эффект закрытия трещин в низкоамплитудной области за счет интенсивного образования слоя коррозионных отложений, вызванного изменением температуры среды. В среднеамплитудной области нагружения и выше скорость роста коррозионных трещин растет, эффект закрытия трещин снижается.

В ПЯТОЙ ГЛАВЕ изложены основные положения и принципы расчета долговечности сварных металлоконструкций грузоподъемных машин с коррозионно-усталостными повреждениями на стадии роста трещин в рамках критерия Ирвина.

Приведен метод расчета диаграмм живучести элементов конструкции с трещинами с использованием типовых силовых схем нагружения.

Приведены сравнительные исследования расчетных методов живучести элементов металлоконструкций с реальными трещинами в эксплуатационных условиях.

Предложена методика определения периодичности инспекций и межконтрольных интервалов при обследовании металлоконструкций грузоподъемных машин в системе технической эксплуатации.

Расчет остаточного ресурса металлоконструкций выполняется поэтапно, включая: определение геометрических параметров и расположения дефектов (по рекомендациям изложенным в гл. 1);

определение критерия локального разрушения; наличие, характер возникновения и параметры агрессивной среды; экспериментальное определение характеристик и параметров трещиностойкости материала; определение напряженно-деформированного состояния элемента с трещиной; вычисление критических размеров трещин, построение диаграмм живучести и определение долговечности конструкции с дефектами.

Для крупногабаритных конструкций грузоподъемных кранов в которых возможно наступление хрупкого разрушения целесообразно использовать критерий Ирвина. При этом трещины должны быть сквозные, соотношение толщин, размеров пластических зон и длин трещин удовлетворяют условиям автомодельности.

Характеристики трещиностойкости сталей и зон сварных соединений необходимые для расчета диаграмм живучести получены в настоящей работе для сталей 10ХНД St-38-в2 (гл. 4).

Коэффициенты интенсивности напряжений, которыми оценивается напряженно-деформированное состояние элементов с трещиной, описываются аналитическими выражениями с использованием метода граничной интерполяции. В главе определены КИН для основных силовых схем нагружения--растяжение с центральной, краевой и двумя краевыми симметричными трещинами и силовая схема изгиба с краевой трещиной.

Выражене КИН, на примере силовой схемы с двумя краевыми симметричными трещинами, имеет вид

$$K_{II} = \frac{\rho \sqrt{\pi l} \cdot 1,12(1 + 1,4674 \epsilon_1)^{\frac{1}{2}}}{(1 + 2,0951)^{-\frac{1}{2}}} \Phi(\epsilon_1, \epsilon_2)$$

$$\Phi(\varepsilon_1, \varepsilon_2) = \Phi(\varepsilon_1, 0) + \Phi(0, \varepsilon_2) - 1$$

$$\Phi(\varepsilon_1, 0) = \left[(1 - \varepsilon_1) \cdot (1 + 1,4674 \varepsilon_1) \right]^{-\frac{1}{2}} \quad \text{при } 0 < \varepsilon_1 < 1$$

$$\Phi(0, \varepsilon_2) = \begin{cases} 1 + 1,4 \varepsilon_2^2 - 0,6048 \varepsilon_2^4 & \text{при } 0 < \varepsilon_2 \leq \infty \\ \frac{0,0957 + 0,4533 \varepsilon_2 - 0,6733 \varepsilon_2^2 + 0,333 \varepsilon_2^3}{0,6733 \varepsilon_2} & \end{cases}$$

где, $\varepsilon_1 = \ell/L$; $\varepsilon_2 = \ell/B$; $\eta = B/L$; $\varepsilon_2 = \varepsilon_1/\eta$;

ℓ - длина трещины, L и B ширина и длина элемента с трещиной соответственно.

Расчет остаточного ресурса сводится к исследованию характеристической функции усталостного разрушения

$$V^{-1} = \Phi(\varepsilon) = A \left[\left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_0 - \varepsilon} \right)^m - 1 \right],$$

где, в рамках K_I подхода

$$\varepsilon_0 = 1 - K_{th}/K_{fc}; \quad \varepsilon = 1 - K_{max}/K_{fc},$$

определения характеристик трещиностойкости

и численной реализации интеграла

$$N = \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_c} \Phi(\varepsilon) d\varepsilon,$$

где N - количество циклов нагружения при росте трещины от начальной l_0 до критической длины l_c .

Учитывая реальную эксплуатационную нагрузку, диаграммы живучести построены для четырех уровней нагружения конструкций $(0,1; 0,4; 0,6; 0,8) \sigma_T$ и трех значений η , учитывающих конечность размеров элементов конструкции по длине и ширине ($\eta = \infty$; $\eta = 1$; $\eta = 0,5$).

На рис. 2 приведена диаграмма живучести для стали 10ХСНД, силовая схема растяжения с двумя симметричными краевыми трещинами, где: кривые 1,2,3,4 представляют изменения N от ϵ при уровнях нагружения $(0,2; 0,4; 0,6; 0,8) \sigma_T$, соответственно; сплошные линии, штрихпунктир и двойной штрихпунктир для $\eta = \infty$, $\eta = 1$, $\eta = 0,5$, соответственно.

На основе анализа диаграмм живучести предложена методика расчета периодичности инспекций и методика определения межконтрольных интервалов в системе обслуживания и технической эксплуатации портовых перегрузочных машин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

В диссертации решена важная научно-техническая проблема по влиянию коррозионно-активных морских сред на кинетику разрушения и остаточный ресурс сварных крановых металлоконструкций. Для достижения этой цели решены следующие основные задачи:

1. Исследованы напряженно-деформированное состояние и механизмы коррозионного разрушения сварных металлоконструкций портовых грузоподъемных машин с учетом конструктивных особен-

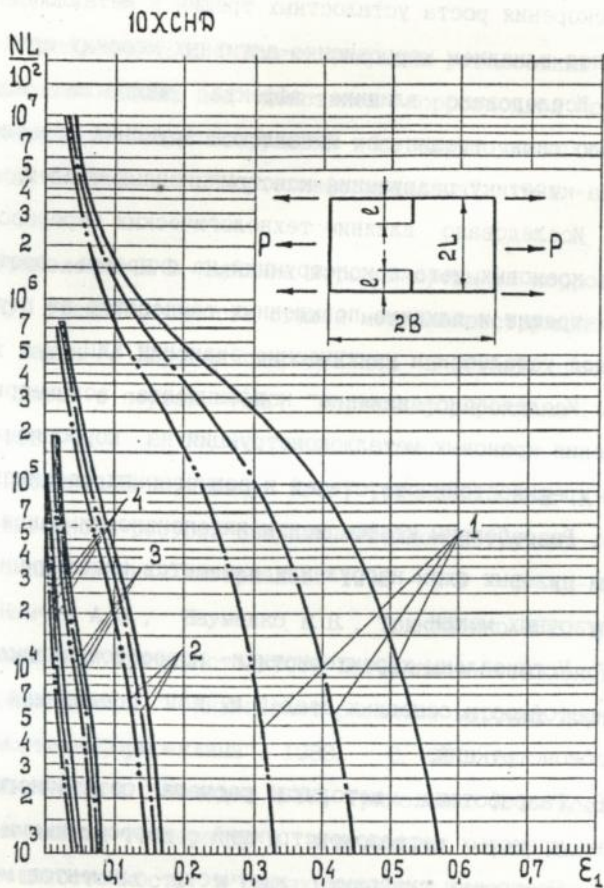


Рис.2. Диаграммы живучести стали 10XCHD

ностей, характера нагружения, эксплуатационных сред и климатических температур.

2. Исследованы кинетические эффекты, механизмы торможения и ускорения роста усталостных трещин в металлоконструкциях ПТМ под влиянием коррозионно-активных морских сред.

3. Исследовано влияние эффекта закрытия коррозионно-усталостных трещин в металлоконструкциях грузоподъемных машин на кинетику разрушения конструкционных сталей.

4. Исследовано влияние технологических перерывов в нагружении крановых металлоконструкций на скорость роста усталостных трещин и влияние повышенных температур на пороги коррозионной усталости и критические значения КИН.

5. Исследовано влияние коэффициента асимметрии цикла нагружения крановых металлоконструкций на коррозионно-циклическую трещиностойкость сталей и зон сварных соединений.

6. Разработаны коэффициенты интенсивности напряжений для типовых силовых схем нагружения элементов конструкции портовых перегрузочных машин.

7. Установлены характеристики коррозионно-циклической трещиностойкости основных сталей и зон соединений крановых металлоконструкций.

8. Разработана методика расчета остаточного ресурса сварных крановых металлоконструкций с коррозионными трещинами.

9. Построены диаграммы живучести элементов металлоконструкций с трещинами для оценки остаточного ресурса крановых конструкций, удобные для применения в инженерной практике.

10. Предложенная методика расчета апробирована в эксплуатационных условиях, подтвердила ее достоверность и возможность применения в инженерных расчетах.

Основные результаты диссертации опубликованы

в следующих работах:

1. Триколенко Н. В. Эффект закрытия усталостных трещин в конструкционных сталях под действием коррозионной среды // Исследование инженерных сооружений и перегрузочного оборудования морских портов. - М.: "Мортехинформреклама", 1991. - С. 108 - 110.

2. Триколенко Н. В. Влияние морской среды на коррозионно-циклическую трещиностойкость сталей металлоконструкций грузоподъемных машин // Морская гидротехника и механизация перегрузочных работ в портах. - М.: "Мортехинформреклама", 1992. - С. 101 - 103.

3. Пустовой В. Н., Немчук А. О., Триколенко Н. В. К определению остаточного ресурса сварных металлоконструкций // Физико-химическая механика материалов. 1992 - № 3 - С. 46-52.

4. Немчук А. О., Науменко В. В., Триколенко Н. В. Исследование циклической трещиностойкости материалов металлоконструкций портовых кранов // Инженерное развитие морских портов. - М.: В/О "Мортехинформреклама", 1988. - С. 66 - 68.

5. Немчук А. О., Молодец И. Г., Триколенко Н. В. Исследование влияния низких температур и агрессивных сред на циклическую трещиностойкость и ресурс крановых металлоконструкций // Морские порты: инженерные сооружения и средства механизации. - М.: В/О "Мортехинформреклама", 1989. - С. 68 - 71.

Зак. 685, тир. 100, подп. к печ. 25.07.94г.
Усл. печ. лист 0,8. КМП ОИИМФ Одесса
ул. Мечникова, 34

Abstract

Trikolenko N. V. Kinetics of Destruction of Crane Metal Constructions in Corrosion Active Seawater Environments.

Thesis on the Scientific Degree of Candidate of Technical Sciences on speciality 05.05.05 - Hoisting Machinery, Odessa Marine Engineering Institute, Odessa, 1994.

The evaluation of operational seawater aggressive environments, character and history of loading on corrosion-cyclic crack tolerance of steels and crane metal construction welded joints was performed. Parameters of corrosion-cyclic crack tolerance of steels 10XCND and St-38-b2 were determined. The technique of evaluation of residual resource of crane metal constructions with corrosion damage was elaborated and tested in service conditions.

Триколенко Н. В. Кинетика разрушения крановых металлоконструкций в коррозионно-активных морских средах.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.05 - подъемно-транспортные машины, Одесский институт инженеров морского флота, Одесса, 1994.

Проведена оценка влияния эксплуатационных морских агрессивных сред, характера и истории нагружения на коррозионно-циклическую трещиностойкость сталей и сварных соединений крановых металлоконструкций. Установлены характеристики коррозионно-циклической трещиностойкости сталей 10XCND и St-38-b2. Разработана и апробирована в эксплуатационных условиях методика расчета остаточного ресурса крановых металлоконструкций с коррозионным повреждением.

Ключові слова : кранові металлоконструкції , корозійно-циклічна тріщиностійкість, залишковий ресурс.

AB 31.043

AB 31.043