

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОПРОТИВЛЯЕМОСТИ ХРУПКИМ РАЗРУШЕНИЯМ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ ШЕЛЬФА АРКТИКИ

Академик РАН **И. В. ГОРЫНИН, А. В. ИЛЬИН**, д-р техн. наук  
(ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», г. Санкт-Петербург, РФ)

Предотвращение хрупких разрушений сварных конструкций шельфа является комплексной проблемой, включающей разработку основных и сварочных материалов высокой хладостойкости, их аттестацию по параметрам трещиностойкости и обоснование применимости в составе конструкции при заданном уровне внешних воздействий на основе подходов механики разрушения. На этом пути необходимо решение ряда теоретических задач, связанных с особенностями испытаний на трещиностойкость структурно-неоднородного материала сварных соединений, интерпретацией результатов испытаний, характеризующихся большим рассеянием, обоснованием основных принципов проведения расчетных оценок. Показано, что обеспечение прочности по критерию предотвращения хрупких разрушений требует не только применения хладостойких материалов, но и оптимизации технологии сварки, совершенствования методов неразрушающего контроля и критериев оценки качества сварных швов, а также регулирования уровня напряжений в конструкциях.

*Ключевые слова:* стационарные и плавучие буровые установки, хладостойкие стали и сварочные материалы, хрупкое разрушение, трещиностойкость, сварные соединения

Освоение углеводородных месторождений шельфа Арктики является одним из наиболее перспективных направлений развития топливно-энергетического комплекса России. Начато строительство морских ледостойких платформ (МЛСП) и плавучих буровых установок (ПБУ), ледоколов и судов ледового плавания для круглогодичной эксплуатации. Одной из ключевых проблем, возникающих при создании материалов для этих конструкций, является предотвращение хрупких разрушений в условиях низких температур (расчетная температура  $T_p$  составляет до  $-50...-60$  °С для замерзающих бассейнов и до  $-35$  °С — для открытых бассейнов). Опасность их возникновения связана с большой толщиной конструкции (до 50...70 мм для МЛСП и ПБУ с отдельными элементами до 130 мм), значительной протяженностью сварных швов, интенсивными циклическими ветроволновыми и ледовыми нагрузками, способствующими развитию дефектов при эксплуатации. В данном направлении ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» выполнен комплекс работ:

созданы хладостойкие стали, сварочные материалы и технологические процессы, обеспечивающие высокую сопротивляемость металла хрупким разрушениям;

исследованы характеристики трещиностойкости металла сварных соединений и выполнена кор-

ректировка методов аттестационных испытаний на сопротивление хрупкому разрушению;

разработаны методики неразрушающего контроля для нового класса конструкций и критерии оценки качества сварных швов по уровню допускаемой дефектности;

получили развитие расчетные методы прогнозирования прочности по отношению к хрупким разрушениям с целью обоснования применимости материалов и технологических процессов.

Ниже представлены основные результаты работ института по этим направлениям.

**Разработка хладостойких материалов, обеспечивающих выполнение требований Регистра.** Согласно нормам Российского морского регистра судоходства (РМРС) [1, 2], гармонизированным с нормами DNV, GL, ABS и других классификационных обществ, контроль хладостойкости металла производится по результатам испытаний образцов Шарпи ( $KV$ ). Регламентируемый уровень работы удара приближенно соответствует неравенству

$$KV [Дж] \geq 0,1\sigma_{0,2} [МПа], \quad (1)$$

(здесь  $\sigma_{0,2}$  — предел текучести), а температура испытаний  $T_{и}$  определяет температурную категорию стали ( $A, B, D, E, F$ ) или сварочного материала (категории 1–5). Категориям  $F$  и 5 соответствует  $T_{и} = -60$  °С.

Выбор температурной категории материала для элементов конструкций хладостойкого исполнения осуществляется исходя из принципа, который выражается неравенством

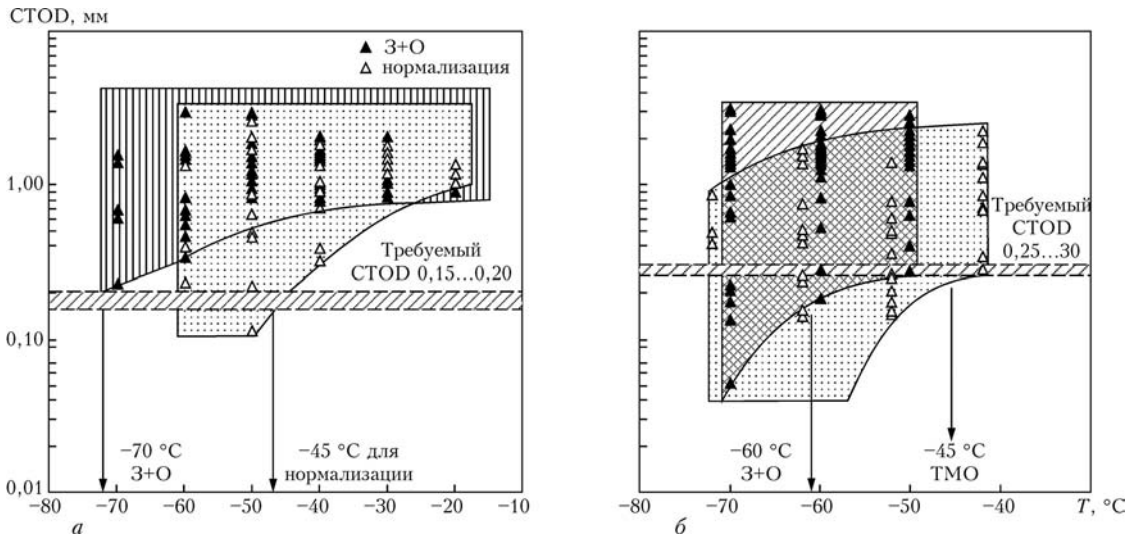


Рис. 1. Результаты определения критического раскрытия вершины трещины CTOD для хладостойких судокорпусных сталей E36...E40 толщиной 30...40 мм (а) при нормализации и закалке с отпуском (З+О) и толщиной 41...50 мм (б) при ТМО и З+О

$$T_{и} \leq T_p - \Delta T(S), \quad (2)$$

где  $T_p$  — расчетная (минимальная) температура эксплуатации;  $\Delta T$  — температурный запас, увеличивающийся с возрастанием категории ответственности элемента конструкции и ее толщины  $S$ .

Для наиболее ответственных узлов требования нормативных документов приблизительно соответствуют условию:  $\Delta T [^\circ\text{C}] = S - 15$  мм. Это означает, что материалы таких узлов, расположенных выше ватерлинии, должны соответствовать температурным категориям  $F$  (для основного металла) и  $5$  (для сварного соединения), а при  $S > 25...30$  мм даже этого оказывается недостаточно. В таких случаях необходимы дополнительные подтверждения применимости материала. Согласно [2], с этой целью используются результаты сертификационных испытаний по программам РМРС, выполняемым при получении свидетельства о признании производителя листового проката, сварочных материалов или при квалификации сварочных процедур на заводе-строителе. В них включены испытания на трещиностойкость по методам механики разрушения: определение параметра CTOD для основного металла и металла сварных соединений, а также результаты контроля температур вязко-хрупкого перехода NDT (температура пулевой пластичности, определяемой при ударном нагружении образцов с хрупкой наплавкой) и  $T_{кб}$  (температура соответствующей 70%-й волокнистой составляющей излома пробы натурной толщины) для основного металла.

В настоящее время ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» разработаны и освоены промышленностью судокорпусные стали повышенной свариваемости категории  $F$  с пределом текучести от 320 до 690 МПа, полученные способами термомеханической обработки (ТМО) и термического улучшения [3]. Благодаря своей высокодисперсной

структуре и низкому содержанию неметаллических включений они обеспечивают выполнение требования по работе удара (1) фактически до  $-100$  °С, а требования РМРС по CTOD — до  $-40...50$  °С (рис. 1). Разработаны сварочные материалы — электроды, проволоки и флюсы [4, 5]. Достижение требований по KV при  $-60$  °С обеспечивается ограничением содержания в сварочной проволоке и сырьевых компонентах серы, фосфора (в сварочной проволоке не более соответственно 0,012 и 0,015 мас. %), низким содержанием кислорода в металле шва, применением комплексных модификаторов и раскислителей в составе электродных покрытий и наполнителей порошковых проволок, а также агломерированных флюсов высокой основности с введением в их состав ферросплавов и металлических материалов для микролегирования и раскисления. Однако испытания показали, что достижение требуемых показателей по CTOD для металла сварных соединений оказывается значительно более сложной задачей, чем соблюдение требований по KV, при этом результат существенно зависит от целого ряда факторов, определяемых выбором методики испытаний, а характерный для предельно низких температур разброс данных затрудняет их интерпретацию.

**Исследование характеристик трещиностойкости металла сварных соединений и разработка методов аттестационных испытаний на CTOD.** Использование параметров нелинейной механики разрушения (НЛМР) для сертификации материала и прогнозирования прочности конструкций шельфа обусловлено высоким уровнем остаточных сварочных и эксплуатационных напряжений — возможность хрупких разрушений конструкции с дефектом в области номинально упругих деформаций должна быть полностью исключена. Для сварных конструкций при испыта-

ниях традиционно предпочтение отдается такому деформационному параметру НЛМР, как СТOD, и его критическому значению  $\delta_{кр}$ . До настоящего времени единственным руководящим документом на этот вид испытаний для нетермообрабатываемых сварных соединений являлся стандарт BS 7448 [6].

В соответствии с Правилами РМРС испытания на СТOD выполняются при аттестации листового проката (так называемый контроль свариваемости стали) при нанесении надреза по металлу зоны термического влияния (ЗТВ) сварного соединения с прямой кромкой шва, а также при квалификационных испытаниях сварочных процедур (в этом случае испытывается соединение, выполненное по штатной технологии, надрез производится по металлу шва, линии сплавления и ЗТВ). Испытания проводятся при  $T_{и} = T_p$ . Согласно требованиям [2], разработанным совместно с ЦНИИ КМ «Прометей», применимость материала при данной температуре не имеет ограничений при

$$\delta_{кр} \geq \eta \sigma_{0,2} S/E, \quad (3)$$

где  $E$  — модуль упругости.

Для металла сварных соединений наиболее ответственных и нагруженных элементов конструкций коэффициент  $\eta$  равен 1,35. Данный уровень при  $\sigma_{0,2} = 360...450$  МПа близок к требованиям стандарта Канады [7], а также стандартов DNV и API на подводные и наземные трубопроводы повышенной эксплуатационной надежности.

Испытания показали, что данные по СТOD металла сварных соединений характеризуются большим рассеянием по сравнению с основным металлом (рис. 2). При низких температурах велика вероятность хрупких разрушений отдельных

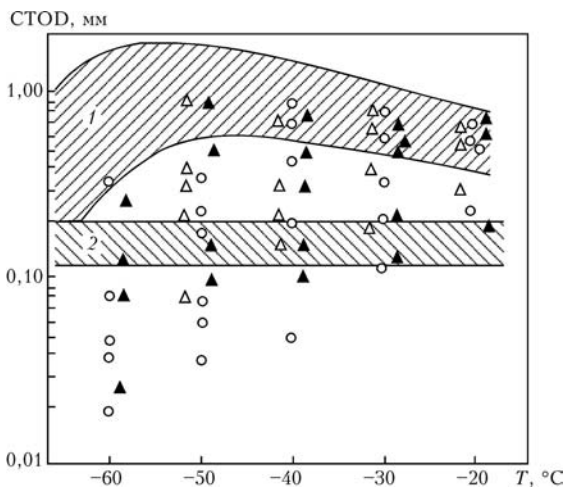


Рис. 2. Результаты определения СТOD для металла ЗТВ судокорпусных сталей E36...E40:  $\circ$  — крупнозернистая составляющая, погонная энергия сварки  $w = 3,5$  кДж/мм;  $\blacktriangle$  — то же,  $w = 0,8$  кДж/мм;  $\triangle$  — зона неполной перекристаллизации,  $w = 3,5$  кДж/мм; 1 — разброс данных для основного металла; 2 — требования по СТOD

структур структурно-неоднородного металла даже при использовании наиболее хладостойких материалов. Следствием этого является сильное влияние на результат испытаний методики их проведения: выбора локальной (целевой) структуры, в которой размещается фронт трещины, критерия корректности испытаний по попаданию в эту структуру (требуемый минимальный процент попадания), ориентации трещины при испытаниях металла шва, технологических процессов сварки, не искажающих результаты испытаний металла ЗТВ. При итоговой оценке результатов испытаний оказывается невозможным сделать заключение о минимальном значении СТOD и необходимо испытывать статистически представительное количество образцов с последующей статистической обработкой данных.

Результаты исследований в этих направлениях приведены в [8]. Определено, что наиболее общим вариантом статистической обработки данных по трещиностойкости является представление интегральной вероятности разрушения  $P$  в виде трехпараметрического распределения Вейбулла:

$$P = 1 - \exp \left\{ - \left[ (\delta - \delta_{c \min}) / (\delta_{c0} - \delta_{c \min}) \right]^b \right\}, \quad (4)$$

где  $\delta_{c0}$  — параметр масштаба;  $b$  — параметр формы;  $\delta_{c \min}$  — минимальное СТOD.

Для основного металла  $b = 2$ , что согласуется с представлением о связи вероятности хрупкого разрушения с объемом «зоны процесса» в вершине трещины. Для металла сварных соединений значения  $b$  варьируются от 1 до 2, причем при испытаниях металла ЗТВ с К-образной разделкой шва и расположением трещины в зоне крупнозернистой составляющей ЗТВ у линии сплавления  $b \approx 1$ , что соответствует зависимости вероятности разрушения не от объема, а от поверхности «зоны процесса».

Статистическая обработка полученных результатов позволяет выявить факторы, определяющие вероятность хрупких разрушений металла ЗТВ. Наиболее критичным является содержание крупнозернистой составляющей ЗТВ на фронте трещины более 15...20% (рис. 3). При этом  $\delta_{c0}$  не зависит от способа производства листового проката, а определяется главным образом погонной энергией сварки. В результате подбора тепловложения и оптимизации раскладки валиков шва можно достичь достаточно высоких показателей по СТOD и для этой зоны (рис. 4).

Применение современных хладостойких сварочных материалов в основном обеспечивает достижение требований Регистра по СТOD при расположении трещины в металле шва при  $-40...50$  °С (рис. 5). Однако в связи со структурной анизотропией металла вдоль и поперек направления сварки и структурной неоднородностью в сечении

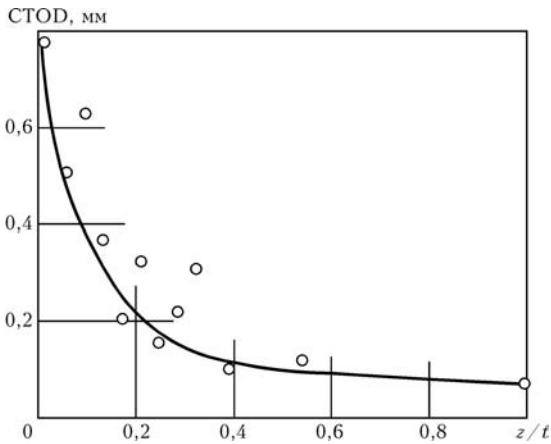


Рис. 3. Зависимость математического ожидания CTOD от относительного содержания хрупкой составляющей  $z/t$  в металле ЗТВ сталей E36...E420:  $z$  — протяженность зоны крупнозернистой составляющей;  $t$  — длина фронта трещины

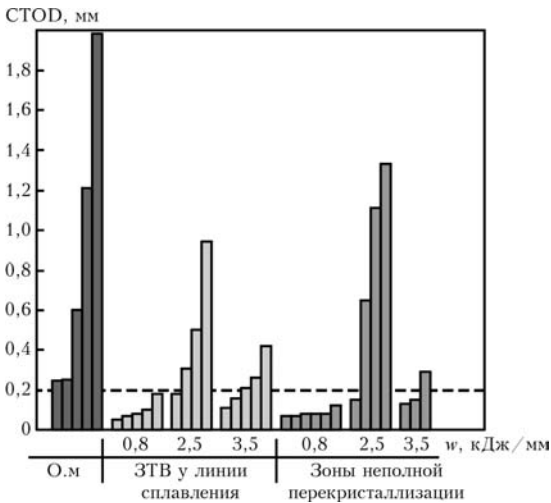


Рис. 4. Зависимость CTOD от погонной энергии сварки  $w$ , полученная для стали E40W толщиной 60 мм с ТМО: о.м — основной металл; штриховая линия — требования РМПС

сварного шва результат испытаний зависит от ориентации надреза (вдоль шва или перпендикулярно поверхности), а также от доли неперекристаллизованной дендритной структуры на фронте трещины (рис. 6), что указывает на необходимость ограничения погонной энергии сварки для ответственных конструкций в хладостойком исполнении. Данные испытаний образцов с надрезом вдоль шва (трещина распространяется перпендикулярно поверхности) в значительной степени зависят от свойств корневой зоны шва и могут быть как существенно выше, так и ниже полученных при распространении трещины вдоль шва.

Необходимо отметить, что ни один из существующих нормативных документов не оговаривает выбор типа образца и других значимых факторов при сертификационных испытаниях на CTOD, оставляя это на усмотрение заказчика испытаний. В связи с этим институтом была разработана одобренная Регистром методика, сущес-

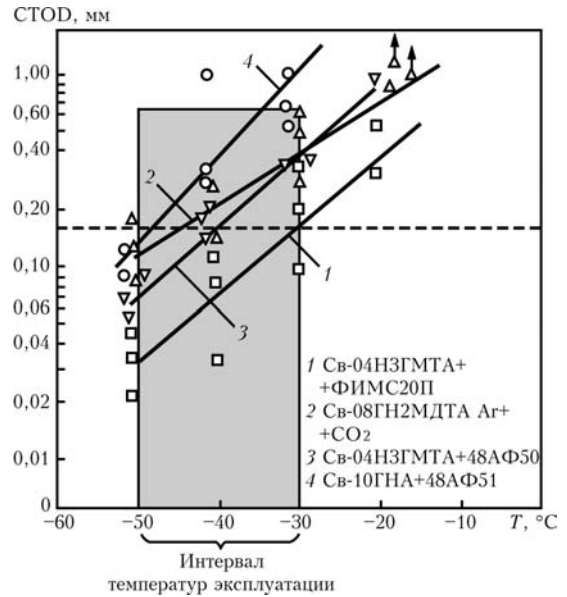


Рис. 5. Результаты определения CTOD для металла сварного шва с трещиной по центру шва (разрушение — вдоль направления сварки): штриховая линия — уровень требований РМПС и зарубежных обществ по параметру CTOD

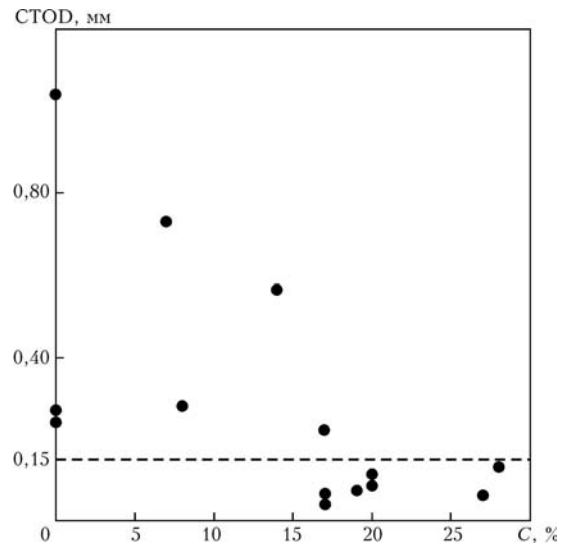


Рис. 6. Изменения CTOD металла шва, выполненного автоматической сваркой (Св-10ГНА+48АФ53), в зависимости от попадания фронта трещины в неперекристаллизованную структуру:  $C$  — доля неперекристаллизованной структуры; штриховая линия — требования РМПС

твенно дополняющая стандарт [6] в части уточнения выбора типа образцов, их подготовки, критериев корректности испытаний, процедур статистической обработки данных.

**Корректировка методики неразрушающего контроля.** Для повышения надежности шельфовых конструкций на стадии постройки институтом были разработаны РД «Контроль качества сварных соединений конструкций МЛСП и ПБУ», которые отличаются от аналогичных норм для судокорпусных конструкций более дифференцированным подходом к регламентации допустимых дефектов, учитывающим категорию ответствен-

ности рассматриваемого узла, его циклическую нагруженность, группу сложности изготовления. При ультразвуковом контроле, являющимся основным для данных конструкций, в дополнение к регламентации условной протяженности дефектов введен критерий оценки качества по эквивалентной площади единичного или суммарного дефектов. Это позволяет связывать результаты контроля и его параметры (нормы поисковой чувствительности) с процедурами оценки прочности по критерию предотвращения хрупких разрушений.

Указанные документы прошли апробацию при строительстве первой МЛСП «Приразломная» на Северном машиностроительном предприятии.

**Разработка расчетных методов прогнозирования хрупкого разрушения.** Целью расчета является проверка приемлемости конструктивных решений и уточнение возможности применения материалов и технологических процессов исходя из результатов испытаний на трещиностойкость. В соответствии с основным постулатом НЛМР, условием прочности является неравенство

$$J \leq J_c/n, \quad (5)$$

где значения  $J$ -интеграла определены с учетом взаимодействия полей остаточных сварочных и эксплуатационных напряжений;  $J_c$  — его критическое значение (параметр трещиностойкости материала), связанное со СТOD формулой

$$J_c = m\sigma_{0,2}\delta_{кр},$$

где  $m$  — числовой коэффициент,  $m = 1...2$ ;  $n$  — коэффициент безопасности.

Для определения расчетного значения  $J$  использован метод «Failure Assessment Diagram» [9], в котором поверхность разрушения, соответствующая условию  $J = \text{const}$ , описывается функцией

$$J = J_{el}f^2, \quad (6)$$

где  $f = (1 - 0,14L_r^2)[0,3 + 0,7\exp(-0,65L_r^6)]$  (процедура «R6»);  $J_{el}$  — упругая составляющая  $J$ ;  $L_r$  — отношение нагрузки к предельной, соответствующей исчерпанию несущей способности.

В рамках данного подхода были уточнены метод учета взаимодействия остаточных и эксплуатационных напряжений (использован принцип суммирования упругих составляющих  $J$ -интеграла, определенных для остаточных  $J_{el}^d$  и эксплуатационных  $J_{el}^d$  напряжений при малых нагрузках) и частичная релаксация первых при больших нагрузках:

$$J_{el} = J_{el}^d + J_{el}^r(1 - 0,67L_r). \quad (7)$$

Значения  $J_{el}^r$  определяются по формулам, интерполирующим результаты численных решений

МКЭ термомодеформационных «сварочных» задач, моделирующих напряженное состояние сварных соединений с трещиноподобными дефектами.

Основным проблемным моментом в проведении подобных расчетных оценок является выбор размеров расчетного дефекта, назначение коэффициента безопасности и доверительной вероятности, с которой должна быть экспериментально определена трещиностойкость материала. При этом использовался принцип взаимного согласования этих параметров таким образом, чтобы результат расчета соответствовал заданной, близкой к 0, вероятности хрупких разрушений. Это условие может быть сформулировано следующим образом: при проведении расчета хрупкой прочности в детерминистической постановке выполнение неравенства

$$J_c/n - J(a, c) < 0 \quad (8)$$

должно означать, что вероятность выполнения неравенства

$$J_c' - J(a') < 0 \quad (9)$$

обеспечена на требуемом уровне, например, равном 0,001, для наиболее ответственных ситуаций. В условии (8) рассматривается среднее значение  $J_c$ , определенное по результатам испытаний, а размеры  $a, c$  расчетного дефекта соответствуют площади дефекта, в 10 раз превышающей заданную поисковую чувствительность при ультразвуковом контроле (УЗК) —  $a:c = 2/3$ . В условии (9)  $J_c'$ ,  $a'$  — случайные значения  $J_c$  и  $a$ , выбранные в соответствии с заданными законами распределения этих параметров. Для стационарного режима нагружения параметр  $a$  должен рассматриваться как единственный случайный фактор, определяющий значение  $J$ ; при нестационарном температурно-силовом режиме, характерном для конструкций морской техники, случайными являются также эксплуатационные напряжения, определяющие  $J$ , и температура их реализации, влияющая на  $J_c$ .

Для численных исследований условий выполнения неравенства (8) использовали метод Монте-Карло и найденные путем статистической обработки экспериментальных данных функции распределения параметров трещиностойкости и максимальных размеров дефекта в заданном объеме металла, обнаруженного после 100%-го контроля УЗК. Результатом расчетов являлось определение связи вероятности разрушения элемента конструкций с параметрами статистического распределения трещиностойкости при минимальной (расчетной) температуре эксплуатации. Это позволяет определить значения коэффициента безопасности (8), обеспечивающие учет реального разброса данных. Для металла сварных соединений наиболее ответственных

узлов определенные таким образом значения  $n$  составили 8,5 для стационарного и 5,0 для нестационарного нагружения.

Указанная методика получила применение при анализе надежности верхних строений МЛСП «Приразломная». По результатам оценок назначен объем неразрушающего УЗК для наиболее нагруженных конструктивных элементов. Применение этой методики особенно целесообразно при использовании высокопрочных судокорпусных материалов, материалов толщиной свыше 50 мм, а также в ситуациях, связанных с определением допустимых режимов эксплуатации конструкции.

#### Перспективные направления исследований.

Результаты выполненных исследований показали необходимость продолжения работ, связанных с повышением вязкости разрушения металла сварных соединений при температурах ниже  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Это особенно актуально для сварки металла большой толщины, высокопрочных сталей с пределом текучести до 690 МПа, а также применительно к конструкциям, размещаемым в прибрежных и внутренних бассейнах Арктики, где ожидаемые расчетные температуры могут достигать  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В случае применения традиционных видов электродуговой сварки перспективы дальнейших работ в данном направлении связываются институтом с использованием модификаторов в виде наночастиц, вводимых в состав флюсов и покрытий электродов. Перспективным направлением работ является внедрение лазерной сварки для строительства морских конструкций. Предварительные исследования работоспособности стыковых сварных соединений хладостойких сталей, полученных этим способом сварки, показали возможность достижения высоких показателей работы удара  $KV$  и по CTOD. При скорости сварки около 40 м/ч в режиме кинжального проплавления металл сварного шва обеспечивает выполнение требований по  $KV$  при температуре до  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а по CTOD — до  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Таким образом, проблема предотвращения хрупких разрушений сварных соединений морских конструкций для шельфа Арктики требует проведения работ в нескольких направлениях: создание хладостойких сварочных материалов,

оптимизацию технологии сварки, совершенствование методик контроля фактического сопротивления структурно-неоднородного материала хрупкому разрушению, обоснованное ужесточение критериев допустимой дефектности и контроль допустимой нагруженности конструкции на основе поверочных оценок прочности. Работы по указанным проблемам, проводимые на протяжении многих лет во ФГУП ЦНИИКМ «Прометей», позволили обеспечить создание первых ледостойких платформ отечественными материалами и решить текущие задачи их проектирования и строительства. Актуально дальнейшее проведение работ по созданию технологических процессов, обеспечивающих безусловное выполнение критериев предотвращения хрупких разрушений до температуры  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  при сварке хладостойких сталей большой толщины и высокопрочных сталей.

1. *Правила классификации и постройки морских судов / Российский морской регистр судоходства.* — СПб.: РМРС, 2005.
2. *Правила классификации и постройки ПБУ и МСП / Российский морской регистр судоходства.* — СПб.: РМРС, 2006.
3. *Создание новых экономнолегированных хладостойких сталей для судостроения и морской техники / И. В. Горынин, В. А. Малышевский, Т. Г. Семичева и др. // Вопр. материаловедения.* — 2005. — 2(42). — С. 27–39.
4. *Шекин С. И., Ямской М. В.* Создание отечественного агломерированного флюса для сварки хладостойких сталей // Там же. — 2003. — 2(34). — С. 61–66.
5. *Бишкоков Р. В., Мельников П. В., Гежа В. В.* Влияние химического состава металла шва, выполненного механизированной сваркой порошковой проволокой на его структуру и механические свойства // Там же. — 2005. — 1(41). — С. 30–37.
6. *BS 7448. Fracture mechanics toughness test.* — Pt. 2: Method for determination of critical CTOD and critical J values of welds in metallic materials. — Publ. 1992.
7. *CAN/CSA-S473–92.* Canadian standard association. Steel structures. — Pt. III: Of the code for the design, construction and installation of fixed offshore structures. — Publ. 1992.
8. *Виноградов О. П., Ильин А. В., Филин В. Ю.* Научно-методические вопросы аттестационных испытаний на трещиностойкость структурно-неоднородного металла сварных соединений // Вопр. материаловедения. — 2004. — 1(37). — С. 75–89.
9. *R6 Revision 3. Assessment of the integrity of structures containing defects.* — British Energy Generation Ltd., Amendments 10, May 1999.

Prevention of brittle fractures of welded structures of a shelf is an integrated problem, including the development of base and welding materials of high cold resistance, their certification by parameters of crack resistance and grounding of their applicability in the structure elements at a preset level of external effects on the basis of fracture mechanics approaches. To follow this path, it is necessary to solve a number of theoretical problems, connected with peculiarities of crack resistance tests of structurally non-homogeneous material of welded joints, interpretation of tests results, characterized by a large scattering, grounding of main principles of conductance of estimations. It is shown that the strength assurance by the criterion of prevention of brittle fractures requires not only the application of cold-resistant materials, but also optimizing of welding technology, updating of methods of non-destructive testing and criteria of assessment of quality of welds, as well as regulation of stress level in the structures.

Поступила в редакцию 07.02.2008