



## ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОЧНОСТИ И РЕСУРСА МОРСКИХ ЛЕДОСТОЙКИХ СТАЦИОНАРНЫХ ПЛАТФОРМ ШЕЛЬФА АРКТИКИ

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

Для обеспечения эксплуатационной надежности корпусных конструкций морских стационарных платформ шельфа Арктики необходимо выполнение комплекса требований к качеству сварных соединений, гарантирующих предотвращение циклических и хрупких разрушений. Анализируются проблемы, возникающие при использовании подходов зарубежных специалистов к обоснованию этих требований, и предлагаются пути их решения на основе методов физического моделирования процессов разрушения. Результаты исследований реализованы в нормативных и методических документах Регистра РФ и использованы при сертификации материалов и технологических процессов сварки для конструкций шельфа.

*Ключевые слова:* морские ледостойкие стационарные платформы, сварные соединения, концентраторы напряжений, циклическая прочность, трещиностойкость

Обеспечение эксплуатационной надежности корпусов морских ледостойких стационарных платформ (МЛСП), работающих при сочетании низких климатических температур (до  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) с многоцикловым ледовым (до  $10^7$ ) и ветроволновым (до  $10^8$ ) нагружением, представляет собой технически сложную задачу. В этих условиях велика опасность хрупких разрушений от исходных технологических дефектов или развившихся при эксплуатации усталостных трещин. Наиболее слабыми звеньями конструкций являются сварные соединения, содержащие концентраторы напряжений — источники возникновения усталостных трещин, зоны с ослабленным сопротивлением хрупкому разрушению и наличием остаточных сварочных напряжений (ОСН) высокого уровня. В связи с этим основным средством обеспечения работоспособности является соблюдение определенных требований к качеству сварных соединений, включающих: требования к вязкости и хладостойкости материала, обеспечивающие предотвращение хрупких разрушений, и требования к конструктивно-технологическому оформлению, обеспечивающие предотвращение усталостных повреждений.

До настоящего времени методическая база для обоснованного назначения этих требований отсутствовала, что вынуждало проектантов обращаться к зарубежным нормативным и методическим документам [1–3 и др.]. Такая практика не могла считаться удовлетворительной из-за отсутствия возможности учета специфики применяемых в России материалов, технологических процессов сварки и методов повышения сопротивления усталости, а также более тяжелых условий эксплуатации на шельфе Арктики по отношению к незамерзающим морским бассейнам (на освоение которых в основном и ориентированы зарубежные нормы). Рас-

сматривая сложившуюся за рубежом систему обеспечения надежности конструкций шельфа, необходимо остановиться на следующих моментах:

*Проектирование с учетом усталости* является обязательным для данных конструкций. Реальный спектр нагрузки по принципу линейного суммирования повреждения заменяется действием эквивалентного напряжения с размахом  $\Delta\sigma_{\text{ев}}$ . Далее используются две расчетные схемы (или их комбинация), которые условно можно назвать методом номинальных напряжений и методом «Hot Spot Stress». По первой схеме сварные соединения по уровню циклической прочности подразделяются на классы (C, D, E, F, F2, G, W и др. по международной классификации), каждый из которых характеризуется определенной кривой допускаемых циклических напряжений (кривой усталости) вида

$$\lg N = \lg \alpha - m \lg \Delta\sigma_{\text{ев}}, \quad (1)$$

где  $N$  — количество циклов до разрушения;  $\alpha$ ,  $m$  — параметры кривой.

Таким образом, положение кривой в интегральном виде учитывает все факторы, определяющие циклическую прочность соединения: концентрацию напряжений, уровень ОСН, структурную неоднородность. Во второй схеме вводится единая «базовая» кривая усталости, также интегрально учитывающая все факторы, связанные с наличием сварного шва, а фактор масштаба и конфигурации соединения учитывается путем расчета величины «Hot Spot Stress» — напряжений в «горячей точке», рассматриваемых как номинальные в формуле (1).

Практика использования обеих схем позволяет заключить, что в их рамках сложно выявить влияние на циклическую прочность отдельных факторов (размера и конфигурации свариваемых элементов, условий нагружения, особенностей технологии сварки, определяющих уровень ОСН и геометрию концентраторов), а следовательно, и решать задачу выбора технологии сварки в зави-



симости от требуемого циклического ресурса. Метод «Hot Spot Stress» позволяет отделить конструктивные факторы от технологических, но он замкнут на дополнительные численные исследования и использует весьма спорную идею разделения концентрации напряжений на «связанную с наличием сварного шва» и «связанную с сопряжением элементов различной жесткости».

*Требования к вязкости и хладостойкости материала*, наряду с общей для судостроения регламентацией работы удара образца с острым надрезом  $KCV$  в зависимости от предела текучести  $\sigma_{0,2}$ :  $KCV$  (Дж/мм<sup>2</sup>) > 0,1 $\sigma_{0,2}$  (МПа) содержат значительно более жесткие ограничения по толщине используемых материалов. В целом они сводятся к выполнению неравенства

$$T_p \geq T_n + \Delta T(S), \quad (2)$$

где  $T_p$  и  $T_n$  — соответственно расчетная температура конструкции и температура определения работы удара;  $\Delta T(S)$  — температурный запас, зависящий от толщины  $S$  и достигающий 25...35 °C при  $S < 40$  мм.

В дополнение к этому впервые в судостроении вводится как обязательный контроль параметра трещиностойкости критического раскрытия вершины трещины (СТОД): для материала сварных соединений при  $S > 40...50$  мм, а для основного металла — при  $S > 60...70$  мм. Регламентируемый уровень СТОД в различных документах варьируется от 0,1 до 0,35 мм, но часто оставляется на усмотрение заказчика техники.

Использование этих принципов для конструкций шельфа Арктики затруднено тем, что при  $T_p = -40...-50$  °C выполнение условия (2) с используемыми температурными запасами оказывается невозможным даже для сталей наиболее хладостойкой температурной категории F и соответствующих сварочных материалов уже при толщине свыше 20...30 мм. В этом случае становится особенно актуальным введение процедуры определения применимости материала по критерию предотвращения хрупких разрушений и обоснование критерия трещиностойкости с позиций механики разрушения.

Задачи разработки требований к циклической и хрупкой прочности сварных соединений МЛСП тесно связаны между собой, так как предельные размеры усталостной трещины, допускаемые в оценках циклической прочности, должны быть безопасными и по критерию предотвращения хрупких разрушений, а фактор циклической нагруженности является одним из основных при определении требований к вязкости материалов. Очевидно, что для решения этих задач необходимо обратиться к физическим методам анализа процессов разрушения. Ниже представлены основные результаты исследований, выполненных в ЦНИИ КМ «Прометей» в этих направлениях.

**Прогнозирование циклической прочности типовых сварных узлов МЛСП.** Основными направлениями исследований являлись: анализ напряженно-деформированного состояния (НДС)

наиболее вероятного возникновения усталостных трещин концентраторов формы и конструктивных дефектов шва, определение характеристик сопротивления материала усталостному разрушению, расчетные оценки на базе выбранной модели разрушения. Для прогнозирования долговечности элементов конструкций с концентраторами напряжений наиболее распространен подход, определяющий количество циклов  $N_\Sigma$  до образования трещины размером (глубиной)  $a_f$  в виде

$$N_\Sigma = N_i(e_a) + \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{V_k(\Delta K_1, K_{1max})}, \quad (3)$$

где  $N_i(e_a)$  — зависимость количества циклов до появления трещины от амплитуды деформации  $e_a$ ;  $a, a_0$  — текущий и начальный размеры (глубина) трещины;  $V_k(\Delta K_1, K_{1max})$  — зависимость скорости роста трещины от размаха коэффициента интенсивности напряжений  $\Delta K_1$  и максимального его значения в цикле  $K_{1max}$ .

Применительно к сварным соединениям такой подход требует определения параметров НДС:  $e_a$ , зависимостей  $\Delta K_1$  и  $K_{1max}$  от  $a$ , а также функций, характеризующих сопротивление материала разрушению:  $N_i(e_a)$  и  $V_k(\Delta K_1, K_{1max})$ . Однако имеется более сложная проблема, связанная с отсутствием определенности в выборе начального размера трещины  $a_0$  при представлении ресурса как суммы двух слагаемых. Она особенно актуальна именно для сварных соединений с острыми концентраторами напряжений, радиус которых  $R$  следует рассматривать как случайную величину.

Основным методом анализа НДС являлся численный метод конечного элемента (МКЭ). На базе многочисленных решений МКЭ предложено описывать распределение местных напряжений в зонах их концентрации соотношением [4–6]:

$$K_l(r) = 1 + \frac{A}{\sqrt{R + nr}}, \quad (4)$$

где  $K_l(r)$  — коэффициент концентрации напряжений на расстоянии  $r$  от точки их максимума;  $n = 4,5 + C(r/A)^2$ ;  $C = 2...6$  (в зависимости от рассматриваемого направления). «Параметр макрогеометрии»  $A$  (мм<sup>0,5</sup>) зависит от типа, размеров и условий нагружения соединения и может рассматриваться как обобщенная характеристика НДС концентратора напряжений. Это позволяет отделить технологический фактор (определяющий статистику  $\rho$ ) от конструктивного, подлежащего оценке на стадии проектирования. Предложен ряд интерполяционных формул для оценок  $A$  применительно к двухмерным соединениям (стыковым, тавровым и др.), а также для пространственных (трехмерных) узлов [6]. Наиболее общее соотношение имеет вид

$$A = f(\theta) \left( \frac{a_1}{S^*} + \frac{a_2}{t^*} + \frac{a_3}{h^*} \right)^{-0,5},$$

где  $f(\theta)$  — функция угла прилегания шва к основному металлу (может быть принята как  $\sin^{0,5}\theta$ ),



$S^*, t^*, h^*$  — размеры соединения в проекции его на плоскость, перпендикулярную оси шва;  $a_1 \dots a_3$  — коэффициенты, полученные при обработке массивов решений по методу наименьших квадратов. Переход от местных напряжений к интенсивности местных деформаций  $e_i$  осуществляется по формуле  $K_{ti}(r) = K_i(r)f_1f_2$ , где  $K_{ti}$  — отношение  $e_i E$  к перпендикулярной оси шва компоненте номинальных напряжений [7]. Поправка  $f_1$  учитывает наличие двухосного номинального напряженного состояния, поправка  $f_2$  — возможность упругопластического деформирования с учетом механической неоднородности основного металла и металла шва.

Методом регистрации изменения потенциальной энергии при моделировании МКЭ продвижения трещины получены зависимости  $\Delta K_1$  и  $K_{1max}$  от  $a$  в полях суммарных (остаточных и эксплуатационных) напряжений. Для трещин, развивающихся из концентраторов напряжения формы шва, рекомендованы следующие интерполяционные формулы:

$$\Delta K_1 = \sigma^H Y_1 Y_3 \pi a;$$

$$K_{1max} = [\sigma_{0x} Y_4 (1 - \sigma_{II} / \sigma_r) + \sigma_{II}] Y_1 Y_3 \pi a, \quad (5)$$

где  $Y_1$  — поправочная функция, учитывающая концентрацию напряжений:  $Y_1 = 1 + \frac{0,44A}{a(1+3a/A^2)} \times (\sqrt{r+4,5a} - \sqrt{r})$ ;  $Y_3$  — поправка Снеддона на форму трещины (отношение ее полуосей);  $\sigma_{0x}$  — средний уровень ОСН в концентраторе;  $Y_4$  — поправочная функция, учитывающая градиент ОСН, равная  $\exp[-0,2(a/Z)^2]$ .

Обобщение результатов решения термомеханических (сварочных) задач МКЭ позволило предложить дифференциацию сварных соединений по уровню перпендикулярной компоненты ОСН  $\sigma_{0x}$  в зависимости от количества проходов при сварке, наличия ограниченных усадочных перемещений, температур фазового  $\gamma \rightarrow \alpha$ -перехода.

Для определения зависимостей, входящих в (3), выполнен комплекс исследований сопротивления усталостному разрушению отечественных судокорпусных сталей. Получено, что зависимость  $N_i(e_a)$  при коэффициенте асимметрии цикла  $\rho = -1$  может быть задана в виде

$$e_a E = 11640 N_i^{-0,390} + 0,5 \sigma_B \text{ (МПа)}, \quad (6)$$

где  $\sigma_B$  — предел прочности.

Воздействие коррозионной среды, возрастание  $r$  до предельных высоких значений, имитирующее наличие ОСН, наличие необработанной поверхности проката в сходной степени приводят к практическому исчезновению влияния прочности материала на величину  $N_i$ .

Для всех судокорпусных материалов получены практически совпадающие зависимости  $V_k(\Delta K_1, K_{1max})$  (диаграммы циклической трещиностойкости). Данные для металла сварных соединений в состоянии после сварки характеризуются большим разбросом, но после применения обжатия образцов для снятия ОСН пластическим деформированием

(до 0,5...1,0 %) они практически совпадают с данными для основного металла. Влияние знакоположительной асимметрии цикла нагружения на кинетику трещины резко выражено лишь в припороговой области диаграмм (при  $V_k < 10^{-8}$  м/цикл) и может моделироваться изменением пороговых значений  $\Delta K_1(\Delta K_{th})$  как функции  $\rho$ . В итоге для описания кинетики трещины в металле нетермообрабатываемых сварных соединений рекомендуется соотношение

$$V_k \text{ (м/цикл)} = 8,6 \cdot 10^{-11} [\Delta K_1 \text{ (МПа}\sqrt{\text{м}}) - 7,0(1 - 0,85r)]^{2,3}. \quad (7)$$

В связи с проблемами использования формулы (3) для прогнозирования долговечности сварных соединений с «острыми» концентраторами напряжений была предложена модель развития усталостного разрушения, рассматривающая скорость его распространения как сумму двух составляющих: скорости роста макротрещины  $V_k$ , определяемой по (7), и дополнительной скорости повреждения  $V_i$ , определяемой амплитудой пластических деформаций  $e_{apl}$ , в определенной точке [7]:

$$N = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{V_i + V_k}. \quad (8)$$

Функцию  $V_i(e_{apl})$  определяли по результатам испытаний гладких образцов (6). При расчете  $e_{apl}$  учитывали снижение прочностных характеристик материала в приповерхностных слоях металла:  $e_{apl} = e_a - S_c^T [1 - \exp(-ka)] / E$ , где  $S_c^T$  — циклический предел текучести при установившемся режиме деформирования;  $k$  — характеристика материала.

Численное интегрирование (8) осуществляли с помощью специальной программы для ПЭВМ, алгоритм которой включал определенные выше функции  $e_a(a)$  и  $K_1(a)$ . Проверку достоверности модели проводили сопоставлением результатов расчета и испытаний образцов с механически инициированными концентраторами напряжения при различном соотношении параметров  $A, \rho$  и варьировании  $r$ . В отличие от известных эмпирических соотношений (Петерсона, Зибеля-Штиллера) модель позволяет достаточно точно прогнозировать совместное влияние на долговечность концентрации напряжений и знакоположительной асимметрии цикла.

Положительные результаты верификации модели позволили использовать ее как инструмент численного исследования процесса разрушения сварных соединений с геометрически неоднородными концентраторами напряжений формы шва. Характеристики распределений радиуса сопряжения шва с основным металлом ( $\rho_a$  — математическое ожидание,  $\rho_\sigma$  — стандартное отклонение) были определены методом слепков для основных технологических процессов сварки. При моделировании процесса рассматривали развитие трещины в поле местных напряжений, определяемом статистикой микрогеометрии концентратора нап-

ряжений. В результате расчетных исследований установлено, что для предельно высокого уровня ОСН и наиболее неблагоприятных параметров распределения расчетные кривые усталости хорошо совпадают с упомянутыми выше нормативными кривыми (при соответствии толщин свариваемых элементов). Это согласуется со способом получения последних как нижних огибающих большого количества экспериментальных данных.

Показана возможность приведения расчетных оценок циклической прочности сварных соединений к следующим процедурам:

определение «базовой» кривой усталости в виде аналитического выражения (1) в зависимости от ожидаемого уровня ОСН (снижение уровня ОСН приводит к увеличению параметра  $m$  в формуле);

определение эффективного коэффициента концентрации напряжений сварного соединения по отношению к этой кривой по формуле:  $K_{ef} = 1 + A/\sqrt{\rho_{ef}}$ , где  $\rho_{ef}$  — характеристика технологического процесса сварки ( $\rho_{ef} = \rho_a - \rho_\sigma$ ).

Эта методология позволяет удовлетворительно прогнозировать и эффективность дополнительных технологических обработок, приводящих к улучшению геометрии концентратора напряжения (аргонодуговое оплавление, механическая обработка) или образованию сжимающих остаточных напряжений (поверхностно-пластическое деформирование).

Необходимо подчеркнуть, что положение видимых базовых кривых усталости имеет сложную физическую природу, отражая преобладание деформационного процесса повреждения сварного соединения в малоцикловой области нагружения, и условия страгивания микротрещины в многоцикловой области.

**Оценка прочности сварных соединений МЛСП по отношению к хрупким разрушениям.** Исследования НДС в этом направлении включали прогнозирование параметров механики разрушения для трещин в поле ОСН и эксплуатационных напряжений при их произвольной ориентации, размерах и пространственном положении. Показано, что для получения предельных оценок суммирование остаточных и эксплуатационных напряжений должно проводиться по принципу суммирования  $J$ -интегралов. В этом случае перераспределение пластических деформаций при продвижении трещины приводит к тому, что с учетом ОСН вместо ее длины следует использовать размер «зоны процесса» при сварке или толщину соединения при найденных в работе численных коэффициентах. Например, предельные оценки для трещины, ориентированной поперек шва, приводят к формуле

$$J_1^\Sigma = 1,2\sigma_T^2 S/E' + (\sigma^H + \sigma_R)^2 Y_2^2 Y_3^2 \pi a, \quad (9)$$

где  $Y_2$  — поправочная функция, учитывающая влияние свободных поверхностей в пластине ограниченной толщины;  $\sigma_R$  — ожидаемый максимальный уровень реактивных напряжений.

Высокий уровень суммарных напряжений, характерный для сварных узлов МЛСП, определяет

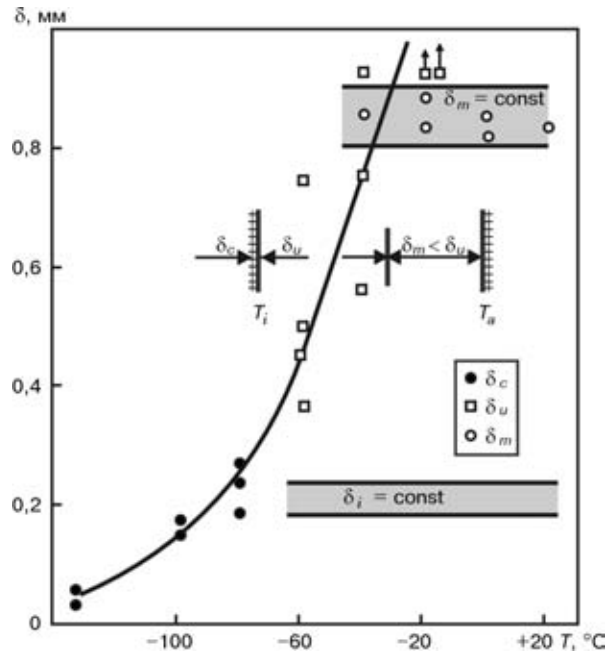


Рис. 1. Типы разрушений при испытаниях на трещиностойкость и определяемые параметры ( $\delta_m$  — СТOD при максимуме перегрузки)

необходимость использования при аттестации материалов параметров нелинейной механики разрушения: параметра СТOD, применяемого в зарубежном судостроении, или критического значения  $J$ -интеграла. В этих разделах ГОСТ 25.506–85 отличается от современных зарубежных стандартов и не распространяется на материал с наличием ОСН. Поэтому принятая методика испытаний на трещиностойкость использовала основные процедуры стандарта BS 7448, pp.1,2, включая метод бокового обжатия для снятия ОСН и процедуру металлографических исследований для определения корректности испытаний отдельных структурных составляющих металла сварных соединений.

Результаты определения температурных зависимостей трещиностойкости для всех рассмотренных судокорпусных материалов позволили выявить три области с различным типом разрушения (рис. 1): высокотемпературную (разрушение происходит полностью вследствие стабильного вязкого подраста трещины), промежуточную (стабильный рост трещины завершается нестабильным разрушением с резким переходом от волокнистого излома к кристаллическому) и низкотемпературную (стабильный рост трещины отсутствует, а излом полностью кристаллический). Лишь в последнем случае условия разрушения характеризуются единственным параметром — трещиностойкостью. В промежуточной области критические параметры при страгивании трещины и нестабильном разрушении различны, а стабильный рост трещины описывается так называемой  $R$ -кривой. Резко чувствительными к структурному состоянию материала и толщине испытуемого образца являются температурные границы различных типов разрушения, а для промежуточной области — трещиностойкость, определенная по моменту нестабильного разрушения. В отличие от этого характерис-

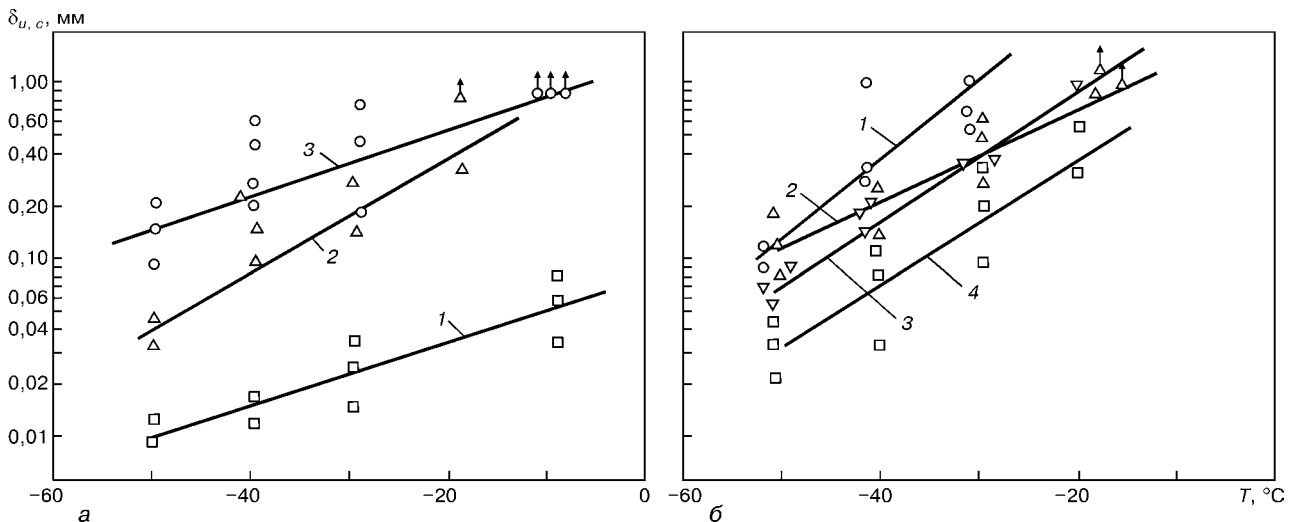


Рис. 2. Результаты испытаний на трещиностойкость металла шва: а – ручная сварка: 1 – УОНИИ-13/45Р; 2 – 48ХН2; 3 – 48ХН5; б – автоматизированная: 1 – Св-10ГНА + 48АФ51; 2 – Св-08ГН2МДТА, Аг + СО<sub>2</sub>; 3 – Св-04НЗГМТА + 48АФ50; 4 – Св-04НЗМГА + ФИМС20П

тики страгивания трещины и *R*-кривые не являются структурно-чувствительными, а *R*-кривые не зависят от температуры. Ее снижение отражается на укорочении участка вязкого подраста трещины и сближении точек неустойчивости и страгивания трещины.

Для судокорпусных сталей, соответствующих требованиям современных технических условий [8 и др.], уровень СТОН для температур до  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  отвечает самым высоким требованиям. Сложнее его достичь для металла ЗТВ и шва сварных соединений. Для металла ЗТВ наиболее критической является крупнозернистая структурная составляющая у границы сплавления, возрастание погонной энергии сварки приводит к падению ее трещиностойкости. Для металла шва наибольшую проблему представляет обеспечение высокой трещиностойкости при автоматической сварке под флюсом. При ручной сварке достижение СТОН на уровне  $0,1...0,2\text{ мм}$  при температуре ниже  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  обеспечивается применением электродов с содержанием никеля до 3 %, при сварке в защитных газах – применением смеси  $\text{Ag} + \text{CO}_2$ , при автоматической – применением агломерированных флюоритно-основных флюсов с ограничением прочности металла шва и снижением погонной энергии сварки (рис. 2).

Анализ особенностей хрупкого разрушения позволяет уточнить проблему обоснования критерия прочности. В зарубежных нормах используется метод «СТОН Design Curve» [9 и др.], где в условии прочности сопоставляются результаты определения СТОН с расчетным раскрытием трещины для выбранного «расчетного» дефекта. При использовании этой процедуры возникают следующие проблемы:

выбор размера «расчетного» дефекта для циклически нагружаемых конструкций. Если учесть возможность роста дефекта при исходных его размерах, принятых исходя из выявляющей способности неразрушающих средств контроля (как это делается в атомной энергетике), то требования по

трещиностойкости для материала сварных соединений оказываются трудновыполнимыми;

теоретическое обоснование перехода от результатов испытаний образца к прогнозированию разрушения конструкции с иной конфигурацией дефекта и отличными условиями нагружения.

Известна неинвариантность параметров трещиностойкости, определенных по моменту неустойчивого разрушения (именно такова практика определения СТОН при сертификационных испытаниях). Целесообразно проанализировать также возможность учета резерва сопротивления материала распространению разрушения за счет стабильного роста трещины.

Таким образом, для обоснования критерия прочности необходимо сопоставление условий стабильного роста трещины и неустойчивого разрушения в образце и элементе натурной конструкции. Известное условие неустойчивости ( $\partial J/\partial a > \partial J_c/\partial a$ ), [10] не описывает наблюдаемые разрушения, так как не учитывает возможности резкой смены микромеханизма разрушения, наблюдаемой экспериментально.

Для решения этих теоретических и прикладных проблем предложена физическая модель стабильного роста трещины, перехода «стабильный рост трещины/неустойчивое хрупкое разрушение» и обратного перехода – торможения трещины [11–13]. Стабильный рост трещины рассматривается как результат достижения критического НДС в ее вершине при дефиците интенсивности высвобождаемой упругой энергии. В предположении о постоянстве удельной работы пластического деформирования при росте трещины получены уравнения, описывающие наблюдаемые *R*-кривые для мало- и полномасштабной текучести, в условиях плоской деформации и при отклонении от них (режим туннелирования трещин отрыва). Предложено и экспериментально обосновано энергетическое условие неустойчивого разрушения при скачкообразном изменении его микромеханизма, подтвержденное методами электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа, испытани-

ями на трещиностойкость с варьированием податливости нагружающей системы, размеров и конфигурации образцов.

Развитые теоретические представления позволяют:

обосновать наблюдаемые корреляционные зависимости между температурой торможения хрупкой трещины и различными критическими температурами вязкохрупкого перехода;

описать влияние масштаба и конфигурации образцов на условия нестабильного разрушения. Практически важен подтверждаемый экспериментально (рис. 3) вывод о том, что испытания стандартных образцов при изгибе или внецентренном растяжении являются более жесткими по соотношению упругой составляющей  $J$ -интеграла к полной его величине по сравнению с возможными вариантами расположения трещины в натурном элементе конструкции той же толщины.

В результате обосновывается подход, рассматривающий в качестве критического события момент перехода к нестабильному разрушению (в отличие от существующих, рассматривающих момент страгивания трещины). Это позволяет формулировать условие хрупкой прочности в виде, не требующем введения конкретных размеров «расчетного дефекта» — варьирование размера и положения дефекта позволяет определить наиболее опасную ситуацию по сочетанию полной величины  $J$ -интеграла и ее упругой составляющей. Используя полученные оценки параметров нагрузки для трещин в поле суммарных напряжений обоснованы требования к уровню относительной (безразмерной) трещиностойкости  $\beta = J_{ct} E / (\sigma_{0,2} S)^2$  по «абсолютному» критерию предотвращения хрупких разрушений (циклически нагружаемые конструкции) и для трещин с размерами, ограниченной зоной высоких растягивающих ОСН (для конструкций, нагружаемых преимущественно статически). При переходе к регламентации абсолютного уровня параметра СТOD требуемая величина оказывается пропорциональной толщине и пределу текучести материала.

**Реализация выполненных исследований.** Основные исследования были завершены разработкой нормативных документов и методик Регистра РФ, осуществляющего контроль за проектированием и строительством морской техники.

Работы в области прогнозирования циклического ресурса сварных элементов обобщены в виде одобренной Регистром РФ «Методики определения кривых допускаемых циклических напряжений и выбора оптимального конструктивно-технологического оформления сварных соединений». Она позволяет осуществлять выбор толщин основных конструктивных элементов, определять объемы дополнительных технологических обработок, повышающих сопротивление усталости, возможность использования узлов с конструктивными непропарами, необходимость снижения конструктивной концентрации напряжений. Соотношения для расчета временного ресурса конструкции включают характеристики распределений Вейбулла нестационарной эксплуатационной нагрузки и параметры

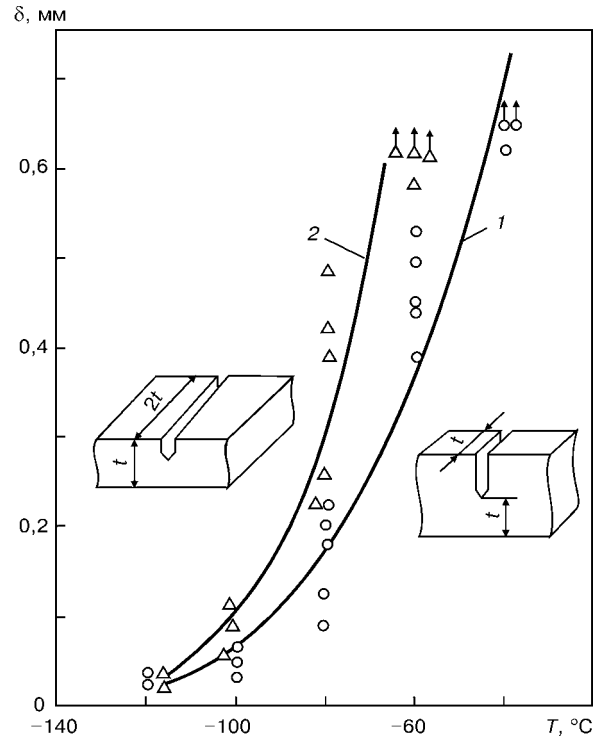


Рис. 3. Сопоставление результатов испытаний образцов стандартной (1) и нестандартной (2) геометрии

кривых усталости сварного соединения при стационарном нагружении, зависящие от комплекса конструктивных и технологических факторов. Методика содержит процедуру выбора базовой кривой усталости, исходя из ожидаемого уровня ОСН и асимметрии цикла нагружения, расчетное определение величины  $K_{ef}$  с учетом конструктивных особенностей, размеров и условий нагружения соединения (определение параметра  $A$ ) и технологии выполнения сварного шва (определение  $\rho_{ef}$ ). Кроме того, включена процедура оценки ресурса на стадии роста усталостной трещины для элементов конструкций типа «обрыва связей» и соединений с исходными конструктивными дефектами.

С использованием методики выполнены оценки циклического ресурса основания и ледового пояса проекта МЛСП «Приразломная», показавшие реальность возникновения преждевременных циклических разрушений при ледовой нагрузке элементов ледового пояса и необходимость использования при строительстве дополнительных технологических мероприятий.

Результаты обоснования критериев вязкости и хладостойкости вошли в выпущенные в 2000 г. «Правила классификации, постройки и оборудования МСП/ПБУ» Регистра, в части «Материалы», «Сварка», «Корпус». Здесь впервые в отечественном судостроении установлены объемы дополнительных испытаний материалов для обоснования области их применимости, основные положения методик испытаний, требования к параметру СТOD для основного металла и металла сварных соединений. Уровень требований зависит от категории элемента конструкции по степени их ответственности (тяжести последствий при разрушении) и условий его нагружения: циклического



или статического, а также возможности динамического характера приложения нагрузки.

Сформулированные требования использовали при разработке спецификаций на материалы и технологические процессы сварки для проектов МЛСП «Приразломная», «Малекпак», «Сахалин-2», а также для решения ряда частных вопросов (например, вопроса о допустимости отмены послесварочной термообработки соединений больших толщин).

Методические разработки в области испытаний на трещиностойкость вошли в одобренную Регистром РФ «Методику определения параметров трещиностойкости при статическом нагружении для металла сварных соединений». За последние годы она получила широкое апробирование при сертификационных испытаниях материалов и технологических процессов сварки, проведенных под надзором Регистра и зарубежных классификационных обществ (DnV, Lloyd и др.), а также при выполнении целевых программ Министерства науки РФ и договорных работ с Российским агентством по судостроению. Выполнены сертификационные испытания листового проката ряда металлургических предприятий России и разрабатываемых технологических процессов сварки для конструкций арктического базирования. В целом опыт этих работ показывает, что результаты дополнительных испытаний на трещиностойкость обычно позволяют существенно расширить область применимости сертифицируемого материала (вопреки ограничениям зарубежных нормативных документов) за счет увеличения информативности данных о материале.

Таким образом, результаты выполненных теоретических и экспериментальных исследований прочности сварных соединений позволили разработать взаимосогласованный комплекс норм и методик, обеспечивающий решение текущих задач проектирования и строительства конструкций морской техники для шельфа.

Provision of operating reliability of hull structures of off-shore platforms in the Russian shelf requires meeting a set of requirements to the quality of welded joints, guaranteeing prevention of cyclic and brittle fractures. Problems are analyzed, which arise when using the approaches, suggested by foreign experts, to substantiation of these requirements, and ways of solving them are proposed, proceeding from the methods of physical modeling methods of fracture processes. Investigation results are implemented in the codes and procedural documents of RF Register and are used in certification of materials and technological processes of welding for the shelf constructions.

1. *Fatigue Strength Analysis for Mobile Offshore Unit.* — DnV, Det Norske Veritas. Classification Notes № 30.2. — 1984. — 60 p.
2. BS 7191: 1989. British Standard Specification for Weldable Structural Steels for Fixed Offshore Structures. — BSI, 1989. — 43 p.
3. *Canadian Standard Association. Preliminary Standard S473-M1989. Steel Structures. Part III of the Code for the Design, Construction and Installation of Fixed Offshore Structures,* 1990. — 85 p.
4. Ильин А. В., Леонов В. П., Маннишев Т. П. Влияние геометрии сварных соединений на концентрацию упругих напряжений // *Вопр. судостроения. Сер. Сварка.* — 1981. — Вып. 32. — С. 16–24.
5. *Расчетное определение долговечности сварных соединений с учетом влияния технологических факторов* / И. В. Горьнин, А. В. Ильин, В. П. Леонов и др. // *Судостр. пром-сть. Сер. Материаловедение, Сварка.* — 1990. — Вып. 10. — С. 3–13.
6. Ильин А. В., Леонов В. П. Совершенствование расчетных процедур оценки долговечности сварных соединений конструкций буровых платформ на основе моделирования процессов циклического разрушения // *Сб. науч. тр. Российского Морского Регистра Судостроения.* — 2000. — № 23. — С. 138–153.
7. Ильин А. В., Леонов В. П., Мизецкий А. В. Метод численного моделирования начальной стадии циклического повреждения сварных соединений. Построение S-N-кривых // *Вопр. материаловедения.* — 1996. — Вып. 2(5). — С. 62–76.
8. *TU 5.961-11804-2002.* Прокат толстолистовой из стали повышенной прочности улучшенной свариваемости.
9. *WES 2805.* Method of assesment for defects in fusion-welded joints with respect to brittle fracture // *Jap. Weld. Eng. Soc.* — 1980.
10. *Сиратори М., Миёси Т., Мацусита Х.* Вычислительная механика разрушения: Пер. с яп. — М.: Мир, 1986. — 334 с.
11. Ильин А. В., Мизецкий А. В. Условия стабильного роста трещины и нестабильного разрушения в материалах с вязкохрупким температурным переходом // *Вопр. материаловедения.* — 2000. — № 2 (22). — С. 84–104.
12. Ильин А. В. Прогнозирование вида J-R-кривых и условий стабильного роста трещины при однородном на фронте трещины напряженном состоянии // *Зав. лаб.* — 2001. — **67**, № 9. — С. 46–53.
13. Ильин А. В., Леонов В. П. Особенности использования параметра CTOD как характеристики перехода от режима стабильного роста трещины к нестабильному разрушению в конструкционных сталях // *Там же.* — 2002. — **68**, № 2. — С. 28–36.

Поступила в редакцию 26.05.2003