

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Павлов Анатолий Владимирович — аспирант.
Научный руководитель:
Чистов Валентин Борисович.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
denver_toropec@mail.ru
Чистов Валентин Борисович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
kaf_soprpmat@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Pavlov Anatoli Vladimirovich — postgraduate.
Supervisor:
Chistov Valentin Borisovich.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
denver_toropec@mail.ru
Chistov Valentin Borisovich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
kaf_soprpmat@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 5 апреля 2016 года

УДК 629.5.015.4:539.431

**А. И. Коростылёв,
Д. Ю. Литвиненко**

АНАЛИЗ И КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ КОРПУСА СУДНА

Рассмотрены существующие методы расчета усталостной прочности конструкций корпуса судна: номинального напряжения, сравнительного анализа, экспериментально-теоретический, деформационные и энергетические, базирующиеся на использовании конструктивных напряжений, эффективных коэффициентов концентрации напряжений, понятий механики разрушения. Также рассмотрена методика, представленная в Российском морском регистре судоходства. Выполнен анализ вышеперечисленных способов расчета циклической прочности, выявлены и отмечены их достоинства и недостатки, а также проанализирована пригодность к решению практических задач усталостной прочности конструктивных узлов корпуса судна. Предложена классификация указанных способов по типу показателя интенсивности накопления усталостного повреждения. Произведено сравнение результатов расчета усталостных повреждений различных судокорпусных конструкций методами номинального напряжения, деформационным и использующим эффективный коэффициент концентрации напряжений. Определены возможные пути совершенствования экспериментально-теоретического метода расчета усталостной прочности узлов корпуса судна.

Ключевые слова: сварной узел, усталостная прочность, методы расчета, коэффициент концентрации напряжений, усталостная трещина, конструктивные напряжения, номинальные напряжения.

Введение

Корпус судна на протяжении срока эксплуатации подвергается значительному числу циклов переменного нагружения различного происхождения, которые при определенной интенсивности могут привести к появлению трещины усталости, разрушению конструктивного узла, появлению течи и даже гибели судна. Учитывая данное обстоятельство, обеспечение циклической прочности корпуса судна является одной из важнейших задач строительной механики корабля.

В современных условиях кроме классического «проектирования из условия обеспечения предельной прочности» становится особенно актуальным «проектирование из условия обеспечения усталостной прочности». Повышение важности обеспечения усталостной прочности судокорпусных конструкций в последнее время обусловлено рядом факторов. Для оценки величины

накопленного усталостного повреждения в узлах корпуса судна, решения задач их проектирования из условия обеспечения усталостной прочности или определения предельно допустимых параметров нагружения из того же условия необходимо обладать надежными расчетными методами, позволяющими решать на практике все указанные задачи.

Анализ последних исследований и публикаций

К основным обобщающим исследованиям, опубликованным на территории СНГ, где были собраны и проанализированы методы решения проблемы усталости судокорпусных конструкций, относится работа [1], в которой отражена разработанность проблемы по состоянию на 80-е гг. XX в. Серьезным шагом к решению данной проблемы явилось распространение и совершенствование программного обеспечения для расчета конструкций численными методами, которое имело место в последние два десятилетия. В работах [2] — [6] представлены анализ и сравнение основных современных методов расчета циклической прочности применительно к сварным металлоконструкциям в целом.

Краткое описание и анализ основных способов оценки усталостной прочности, применяющихся к расчету судокорпусных конструкций исходя из концепций «Эксплуатация без повреждений» («Safe-life») и «Безопасная эксплуатация» («Fail safe») представлены в работе [7]. В данном исследовании, однако, отсутствует описание и анализ деформационного метода, который также имеет широкое приложение [1], [6]. Следует отметить, что в указанных работах классификация описанных методов расчета циклической прочности не проводилась. Исключением является работа [1], однако приведенная в ней классификация отображает разработанность проблемы по состоянию на 80-е гг. XX в.

Цель работы

Цель работы — выполнить анализ и классифицировать основные методы расчета усталостной прочности сварных тонкостенных конструкций корпуса судна, оценить достоинства и недостатки, определить их пригодность для решения практических задач усталостной прочности.

Изложение основного материала

Задачи, связанные с усталостной прочностью сварных узлов судового корпуса, являются комплексными и недостаточно изученными до настоящего времени. Данное обстоятельство служит причиной приближенности большинства существующих расчетных зависимостей, которые обобщают накопленные экспериментальные данные, а также расхождений в результатах, полученных с помощью различных методов и формул. Неопределенности и стохастический характер ряда расчетных параметров при абсолютных оценках усталостной прочности судокорпусных конструкций обусловили появление сравнительных расчетных методов оценки долговечности. Сравнительный анализ усталости основан на предположении, что, согласно данным эксплуатации, выбранная в качестве базовой конструкция имеет удовлетворительную усталостную прочность. Фактический ресурс базовой конструкции при этом является неизвестным, соответственно, неизвестным является и фактический ресурс исследуемой конструкции. Долговечность исследуемой конструкции выражается относительно долговечности базовой с помощью зависимостей, представленных в работах [1], [8], и должна быть не меньше базовой.

В настоящее время в рекомендациях классификационных обществ и международных организаций по расчету усталостной прочности сварных узлов представлены методы, основанные на подходе абсолютных оценок показателей усталости конструктивных узлов. К ним можно отнести методы номинального напряжения, конструктивного напряжения, деформационный, а также способы расчета на усталость, использующие эффективный коэффициент концентрации напряжений. Первая на просторах СНГ методика абсолютных оценок усталостной прочности конструкций корпуса судна была разработана в ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова в 80-е гг. XX в. [9]. Данная мето-

дика, в которой был обобщен большой объем экспериментальных данных, явилась важным шагом на пути для решения задач циклической прочности.

Для характеристики меры усталостного повреждения конструкции при ее нерегулярном нагружении используют понятие величины усталостного повреждения D , критический уровень которой соответствует появлению усталостной трещины или полному разрушению объекта. Расчет параметра D для всех указанных в данной работе методов принято выполнять с помощью гипотезы линейного суммирования повреждений, которая может быть представлена в различных формах. Критическое значение величины D , соответствующее появлению трещины, может быть установлено, согласно [2], для судокорпусных конструкций на уровне 1. Указанная гипотеза в «классическом варианте» для случаев стохастического нагружения с дискретным и непрерывным распределением случайных амплитуд σ_a , соответственно, имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} D &= \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i}; \\ D &= N^* \int_{\sigma_{amin}}^{\sigma_{amax}} \frac{p(\sigma_a)}{N(\sigma_a)} d\sigma_a, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где n_i — количество циклов нагружения уровня σ_{ai} в блоке i ; N_i — число циклов до усталостного разрушения при действии переменного напряжения постоянной амплитуды σ_{ai} ; $p(\sigma_a)$ — плотность распределения вероятностей σ_a ; σ_{amin} , σ_{amax} — пределы интегрирования.

При этом считается, что на кратковременных режимах морского волнения амплитуды случайного нагружения σ_a распределены по закону Рэлея, тогда как долговременное распределение σ_a соответствует закону Вейбулла.

Несколько отличная от остальных по структуре методика предложена в сборнике нормативно-методических материалов Российского морского регистра судоходства [10]. Согласно данной методике условие достаточной циклической прочности конструкции корпуса судна, которая воспринимает в общем случае усилия от действующих на корпус изгибающих и местных нагрузок с учетом различных режимов эксплуатации судна, определяется зависимостью

$$\sqrt[4]{\sum_{i=1}^n \bar{t}_i \left[\left(\frac{\sigma_p^\Sigma}{\sigma_F(\sigma_c^\Sigma)} \right)_i \right]^4} \leq k_d, \quad (2)$$

где $(\sigma_p^\Sigma)_i$ — суммарная расчетная величина размахов переменных нормальных напряжений в точке рассматриваемой конструкции, в которой проверяется циклическая прочность и может возникнуть усталостное повреждение в i -м режиме эксплуатации; k_d — коэффициент допустимых напряжений, $k_d = 1,4$ и $1,5$, — соответственно для продольных и поперечных связей корпуса судна; $\sigma_F(\sigma_c^\Sigma)_i$ — предел выносливости конструктивного узла в расчетной («горячей») точке (данная величина определяется с учетом влияния суммарной величины действующих средних напряжений $(\sigma_c^\Sigma)_i$ в i -м режиме эксплуатации от общих и местных нагрузок); \bar{t}_i — относительная доля времени эксплуатации судна в i -м режиме по отношению к общему сроку эксплуатации; n — число учитываемых расчетных режимов. Зависимости, рекомендации и справочные таблицы для определения $\sigma_F(\sigma_c^\Sigma)_i$ и других величин в формуле (2) можно найти в работе [10].

Методы расчета усталостной прочности, рассматриваемые в настоящей работе, могут отличаться между собой по показателю интенсивности накопления усталостного повреждения, связанного с количеством циклов нагружения до появления трещины. Следовательно, их можно классифицировать по данному параметру. Аналогичная классификация приведена в работе [1], однако она является достаточно общей и отображает разработанность проблемы циклической прочности, как уже указывалось ранее, по состоянию на 80-е гг. XX в. По типу показателя интенсивности накопления усталостного повреждения основные методы расчета усталостной прочности можно разделить на следующие группы.

1. Силовые, к которым относятся:

1.1. методы, основанные на использовании номинальных напряжений (метод номинального напряжения и экспериментально-теоретический метод, а также способы расчета на усталость, использующие эффективный коэффициент концентрации напряжений);

1.2. методы, использующие конструктивные напряжения.

2. Деформационные.

3. Энергетические.

4. Базирующиеся на применении понятий механики разрушения (коэффициенты интенсивности напряжений в концентраторе, J -интеграл Райса).

Кроме того, все способы расчета на усталость судокорпусных конструкций, описанные в данной работе, можно разделить на такие, которые предполагают определение локальных напряжений, деформаций и т. п., и которые исключают этот локальный уровень. К последним можно отнести методы номинального и конструктивного напряжения, которые являются силовыми согласно представленной ранее классификации.

Метод номинального напряжения. Данный способ расчета циклической прочности предполагает типизацию исследуемого района корпуса судна, где возможно появление усталостного повреждения, в соответствии с классификацией, которая представлена в рекомендациях классификационных обществ или рекомендациях международных организаций по расчету усталостной прочности сварных соединений. Метод представлен, например, в рекомендациях Международного института сварки (IIW) [11], [12], Норвежского Веритаса (DNV) [13], [14], Национальной комиссии охраны здоровья и безопасности Британии (HSE) [12] и др. После типизации критических областей каждой такой области, согласно указанным выше рекомендациям, подбирается соответствующая $S-N$ кривая усталости. Данные кривые могут состоять из двух наклонных участков, одного наклонного и прямого второго или только из одного наклонного участка (в случае свободной коррозии [13]), в зависимости от ожидаемого числа циклов и характера нагружения (с постоянной или случайной амплитудой). Семейство $S-N$ кривых для расчета усталостной прочности стального объекта, который находится в воздухе и испытывает действие нагружения переменной амплитуды, представлено на рис. 1.

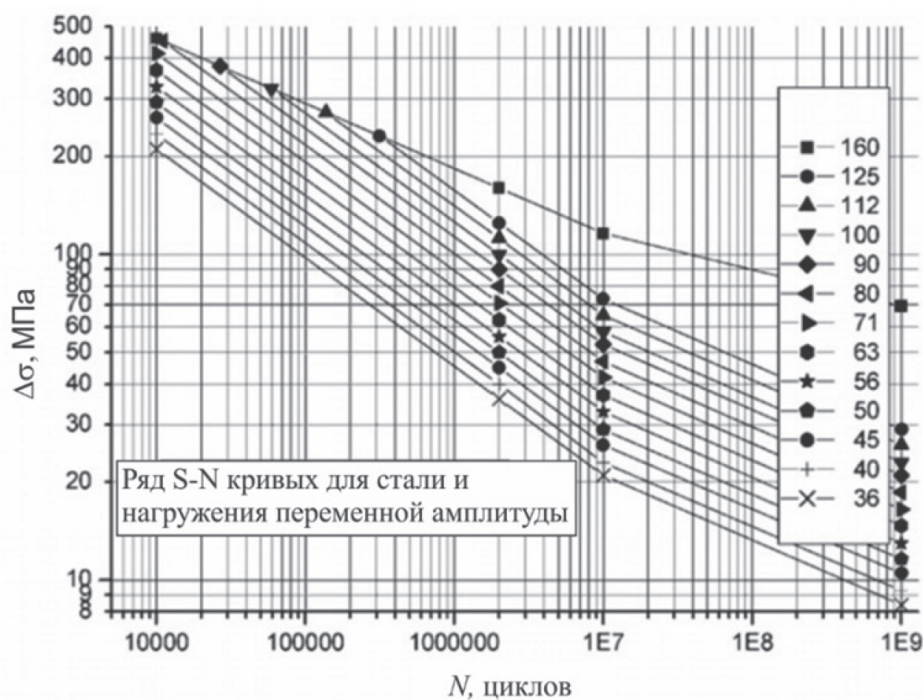


Рис. 1. Модифицированные $S-N$ кривые IIW для определения усталостного повреждения по правилу линейного суммирования повреждений (материал — сталь)

Кривые усталости для исследуемого узла подбираются независимо от механически характеристик стали, из которой он изготовлен. Такое упрощение, как отмечается в работе [5], является оправданным для острых концентраторов напряжений. $S-N$ кривые, представленные в работах [11] – [13], могут быть использованы для оценки усталостной прочности сварных конструкций из сталей с пределом текучести $\sigma_T < 960$ МПа. При этом величина размаха напряжений в цикле нагружения не должна превышать $1,5\sigma_T$, а максимальное номинальное напряжение цикла не должно быть больше σ_T , в противном случае целесообразно применять другие методы расчета.

Цифровой код FAT (fatigue class — класс усталости) присваивается сварному узлу в зависимости от его внешнего вида, способа нагружения, особенностей изготовления и др. Такой код соответствует пределу выносливости конструкции при $2 \cdot 10^6$ циклов нагружения. Кривая усталости FAT 160 на рис. 1 является $S-N$ кривой основного металла, ограничивающей другие кривые сверху. Кроме цифрового кода для кривых усталости может использоваться буквенно-цифровое обозначение, используемое в работах [12], [13].

Наклонные части $S-N$ кривых описываются уравнением

$$\lg N = \lg C - m \cdot \lg \Delta\sigma_n, \quad (3)$$

где N — число циклов до появления трещины; $\Delta\sigma_n$ — размах номинальных напряжений в цикле; $\lg C$, m — константы, которые определены для буквенно-цифрового кода в соответствующих нормативных документах [11] – [13].

Описываемые $S-N$ кривые позволяют рассчитать усталостную прочность конструкции так, что вероятность ее разрушения будет составлять $P_f = 2,4$ %. Другим средством для расчета циклической прочности методом номинального напряжения являются нормализованные кривые усталости, как указывается в работе [5]. Особенности расчета долговечности сварных узлов в случае объемного напряженного состояния можно найти в работах [5], [11].

Методы расчета усталостной прочности, которые базируются на использовании эффективных коэффициентов концентрации напряжений. Эффективный коэффициент концентрации напряжений, в соответствии с данными, приведенными в работах [1], [4], показывает влияние концентрации напряжений на усталостную прочность и представляет отношение предела выносливости гладкого образца к пределу выносливости конструкции (физический смысл эффективного коэффициента концентрации поясняется в работах [1], [2], [4]). Данный коэффициент может использоваться для определения предела выносливости сварного узла, как например, в методике ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова (см. выше). Эффективный коэффициент концентрации напряжений K_e определяется экспериментально. Его оценки, как правило, выполняются на базе известного теоретического коэффициента концентрации K_r , который на практике определяется приближенными формулами, а также с помощью метода конечных или граничных элементов.

В зарубежной практике для оценки величины K_e , в соответствии с данными, приведенными в работах [5] и [15], используются методы критического расстояния, наиболее напряженного объема и осреднения напряжений. Последний из них предложен Нейбером и широко используется в формате метода фиктивного закругления концентратора напряжений. Данный способ расчета величины K_e был предложен Д. Радаем. Если заменить действительный радиус кривизны концентратора ρ фиктивным ρ_ϕ , то, согласно данному способу, эффективный коэффициент концентрации напряжений можно определить, рассчитав величину K_t при таком ρ_ϕ . Величина ρ_ϕ рассчитывается по формуле

$$\rho_\phi = \rho + s\rho^*, \quad (4)$$

где ρ^* — радиус структурного элемента, т. е. такого минимального объема сферической формы, в котором еще может возникнуть усталостное повреждение; s — коэффициент жесткости напряженного состояния.

Здесь радиус структурного элемента $\rho^* = 0,4$ мм — для низколегированной стали, а величина $s = 2,5$ — для сварных соединений. В худшем случае радиус перехода от основного металла

к металлу сварного шва ρ в соединении стремится к нулю. Таким образом, получается, что для сварных соединений из указанных сталей в худшем случае фиктивный радиус ρ_f составляет 1 мм и, следовательно, на базе данного радиуса можно определять величину эффективного коэффициента концентрации напряжений K_e для сварных узлов с запасом в сторону завышения.

Надежность метода фиктивного закругления концентратора напряжений в описанной форме была подтверждена на примере его использования для исследования сварных узлов с T - и Y -образными сечениями, согласно работе [5]. Изначально предполагалось описанный метод использовать только для определения предела выносливости при $2 \cdot 10^6$ циклов нагружения постоянной амплитуды. Однако со временем, как указывается в работе [15], метод был расширен для расчета усталостной прочности в области до 10^4 циклов на базе единой $S-N$ кривой FAT 225 для стальных конструкций. Такая кривая позволяет выполнить расчет на усталость, пользуясь главными максимальными напряжениями в очаге концентрации. Поправки вследствие эффекта толщины в данном случае не нужны. Эффект остаточных напряжений здесь является включенным в кривую класса 225. Наклонные участки данной кривой описываются аналогичной формуле (4) зависимостью.

Обобщенная схема расчета усталостной прочности сварного узла методом фиктивного закругления очага концентрации из работы [16] приведена на рис. 2.

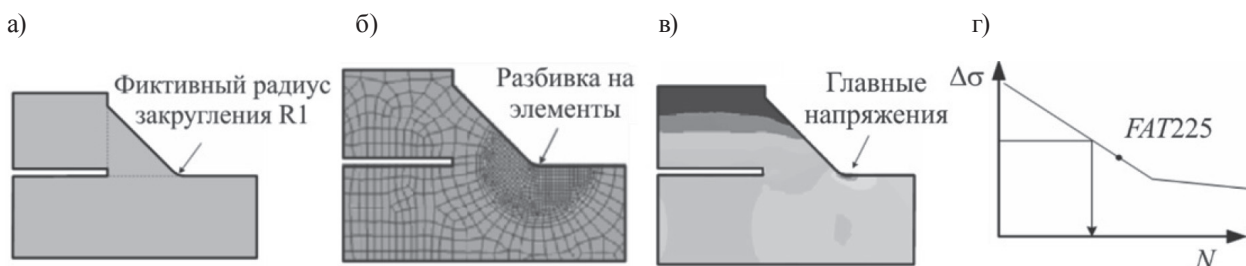


Рис. 2. Этапы расчета усталостной прочности стальной конструкции с использованием метода фиктивного закругления очага концентрации:

- а — создание геометрической модели с фиктивным закруглением очага концентрации;
- б — разбивка геометрической модели на конечные элементы;
- в — определение величины максимальных главных напряжений в концентраторе;
- г — расчет количества циклов до появления трещины усталости с помощью $S-N$ кривой FAT 225

Экспериментально-теоретический метод. Данный способ расчета усталостной прочности сварных конструктивных узлов корпуса судна, представленный в изданиях [17] – [20], был разработан в Национальном университете кораблестроения им. адм. Макарова. Исходным объектом метода является не узел в целом, а присутствующие в нем отдельные очаги концентрации напряжений, наиболее слабым из которых определяется усталостная прочность узла и, соответственно, всей конструкции. Главным элементом в такой расчетной методике оценки долговечности является кривая усталости очага концентрации.

Кривая усталости, построенная согласно данному методу, которая представлена на рис. 3, состоит из трех участков. Она строится на базе критериальных зависимостей усталости материала с использованием экспериментальных данных испытаний на усталость натуральных или полунатуральных моделей при заданном уровне номинальных напряжений. Указанная кривая усталости отображается в полулогарифмической системе координат: $n = \lg N$ и $\bar{\sigma}_n = \Delta \bar{\sigma}_n / \Delta \bar{\sigma}_{n0}$. Участок I кривой строится посредством соединения прямой линией в полулогарифмической системе координат двух точек. Первая — граничная левая точка участка II, которая характеризует циклическую прочность узла при максимальных номинальных напряжениях цикла равных пределу текучести материала σ_T . Вторая точка соответствует достижению максимальных номинальных напряжений цикла предела прочности σ_B при $n = 0$. Для построения участка II кривой используется деформационный критерий усталости материала, предложенный Ленджером, для участка III — силовой

критерий Хейвуда. При этом «привязка» к результатам циклических испытаний типового очага концентрации напряжений происходит на участке II в точке с координатой n_0 . Индекс «0» при $\Delta\sigma_{n0}$ и n_0 означает, что данные величины относятся к экспериментальным данным: $\Delta\sigma_{n0}$ — размах номинальных напряжений, которые имели место в модели, при испытании на усталость которой было установлено число циклов N_0 до появления трещины длиной 1 ... 2 мм.

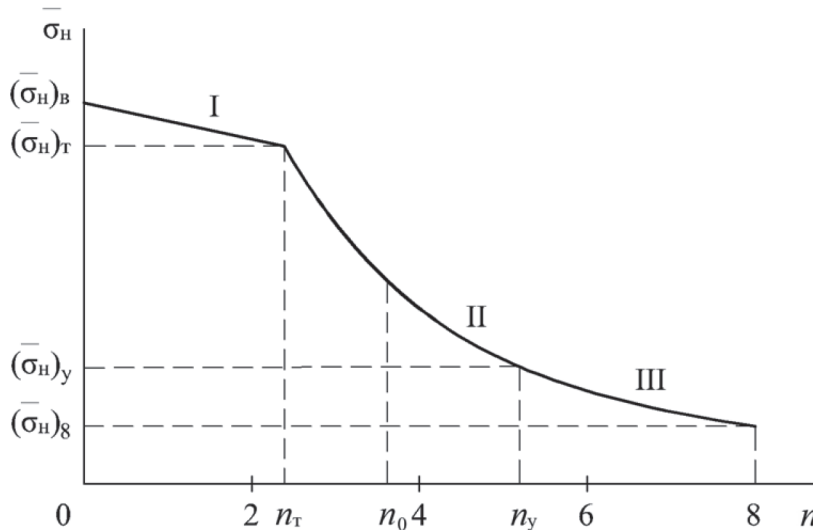


Рис. 3. Кривая усталости согласно экспериментально-теоретическому методу

Расчетные зависимости для каждого участка кривой имеют следующий вид:

– для участка I

$$\bar{\sigma}_n = \left(1 - \frac{n}{B}\right) (\bar{\sigma}_n)_B \quad (5)$$

границные точки: $((\bar{\sigma}_n)_B; 0)$ и $((\bar{\sigma}_n)_T; n_T)$;

– для участка II

$$\bar{\sigma}_n = \left\{ \frac{1 + (\bar{\psi} / N^{0.5})}{\varphi [1 + (\bar{\psi} / N_0^{0.5})]} \right\}^{1/s} \quad (6)$$

границные точки: $((\bar{\sigma}_n)_T; n_T)$ и $((\bar{\sigma}_n)_y; n_y)$;

– для участка III

$$\bar{\sigma}_n = \bar{\sigma}_B \left[\frac{2(1 + \beta n^4)}{1 + \alpha n^4} - \delta(n - n_y) \right] \quad (7)$$

границные точки: $((\bar{\sigma}_n)_y; n_y)$ и $((\bar{\sigma}_n)_8; n_8)$.

Кроме того, следует отметить, что участок II строится на основе предположения о том, что при максимальных номинальных напряжениях цикла, значения которых меньше предела текучести, размах упругопластической деформации в очаге изменяется по следующей зависимости:

$$\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon_0 \varphi \left(\frac{\Delta\sigma_n}{\Delta\sigma_{n0}} \right)^i \quad (8)$$

где φ — функция, учитывающая отличия геометрических и механических характеристик исследуемой конструкции и испытанной на усталость модели.

Данная функция определяется следующим образом:

$$\varphi = \frac{K_t^{2/(1+m)} \sigma_{T0}^{(1-m)/(1+m)}}{K_{T0}^{2/(1+m)} \sigma_T^{(1-m)/(1+m)}} \quad (9)$$

здесь K_T, K_{T0} — теоретические коэффициенты концентрации напряжений для исследуемой конструкции и испытанной модели; m, m_0 — показатели степени для степенной аппроксимации диаграммы деформирования материала конструкции и модели; σ_{T0} — предел текучести материала модели.

Зависимости для определения других переменных в выражениях (5) – (7) и остальные обозначения можно найти, например, в источнике [20].

Методы расчета усталостной прочности, которые базируются на использовании конструктивных напряжений. Конструктивными можно назвать такие напряжения, которые в случае со сварными узлами не зависят от радиуса перехода от основного металла к металлу шва, а определяются только соотношениями общих размеров конструкции.

В настоящее время наиболее распространенным на практике является метод напряжения в «горячей» точке. Данный метод предполагает определение конструктивных напряжений в сварном узле с помощью специальных приемов, основанных на использовании метода конечных элементов, или с помощью использования экспериментального способа. Данные напряжения включают эффекты макроконцентрации напряжений (общей геометрии и формы конструкции) и исключают прирост напряжений, обусловленный наличием сварного шва. Предполагается, что влияние наличия сварного шва на усталостную прочность сварного узла по данному методу уже учтено в используемых в расчете долговечности $S-N$ кривых определенного класса усталости FAT, как указывается в работах [2], [7].

Конструктивные напряжения в «горячей» точке определяют экстраполяцией напряжений из специальных точек, положение которых регламентируется соответствующими рекомендациями, приведенными в работах [11], [12], [14], [21]. Экстраполяция может быть линейной или квадратичной, по двум или трем точкам соответственно. Общая схема линейной экстраполяции представлена на рис. 4.

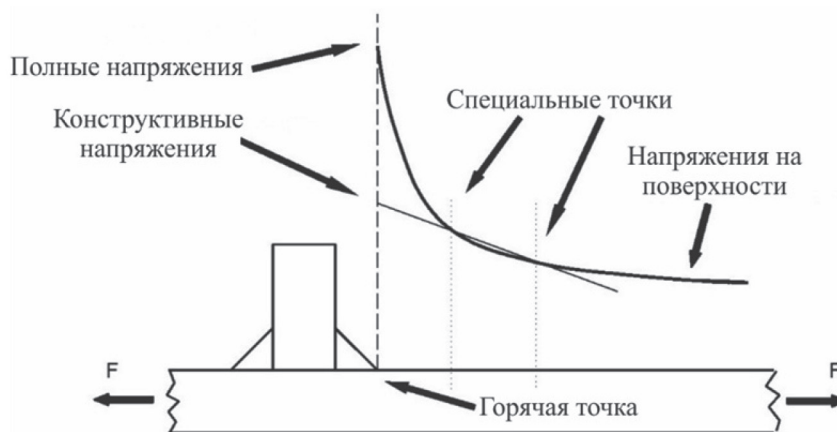


Рис. 4. Определение конструктивных напряжений в «горячей» точке посредством линейной экстраполяции

В соответствии с данными работы [11] существует два типа «горячих» точек: «горячая» точка в месте перехода от основного металла к металлу шва на поверхности пластины — точка типа «а»; «горячая» точка в таком же месте перехода на ребре пластины — точка типа «b».

При определении конструктивных напряжений в «горячей» точке типа «а» напряжения, по которым будет выполняться экстраполяция, устанавливаются экспериментально или с использованием метода конечных элементов в специальных точках на поверхности пластины (см. рис. 4).

Положение данных точек назначается в пропорциях от ее толщины согласно данным, приведенным в работах [11], [21]. В случае «горячих» точек типа «b», положение соответствующих точек экстраполяции назначается независимо от толщины пластины, на ребре которой они находятся [21]. Рекомендации по расчету конструктивных напряжений σ_{hs} методом конечных элементов с помощью программных пакетов САЕ относительно выбора типа конечных элементов, плотности их распределения, положения точек экстраполяции и формулы для расчета данных напряжений можно найти в работах [11], [14], [21]. Кроме того, в работах [11], [21], [22] можно найти подобные рекомендации для определения σ_{hs} экспериментальным путем. Расчетные значения размаха $\Delta\sigma_{hs}$, как указывается в работе [11], не должны превышать $2\sigma_T$.

Другие способы расчета конструктивных напряжений в сварных узлах рассмотрены в работе [5]. Классификация $S-N$ кривых для расчета усталостной прочности методом напряжения в «горячей» точке представлена, например, в работах [11], [21] для распространенных на практике узлов. Как указано в работе [12], для расчета по данному методу также могут быть использованы кривые усталости, используемые в методе номинального напряжения, а также кривые, полученные из других источников, где имеются данные циклической прочности эталонного узла.

Деформационный метод. Нарушение усталостной прочности при развитой макропластической деформации в циклах нагружения называют в работе [3] *малоцикловой усталостью*. Упруго-пластическое деформирование может происходить в зонах концентрации при упругом деформировании всей конструкции. Разрушение в этих случаях будет иметь место при небольших числах циклов. Для оценки усталостной прочности узла, работающего в таких условиях, и применяется, как правило, деформационный метод. Допущения, на которых он основан, предполагают, что поведение материала в очаге концентрации при циклическом нагружении конструкции сопоставляется с поведением сравнительных образцов малых размеров без концентрации напряжений или с небольшим ее уровнем, которые испытываются при одноосном переменном нагружении. Таким образом, расчет усталостной прочности с помощью данного метода заключается в определении переменных деформаций в очаге концентрации и расчете числа циклов до появления усталостной трещины с помощью $\epsilon-N$ кривой, полученной при циклических испытаниях образцов малых размеров, которая связывает размах полной деформации $\Delta\epsilon$ или пластической деформации $\Delta\epsilon_p$ с количеством циклов до появления трещины N .

В работах [1], [3] – [5], [23] представлены варианты зависимости $\Delta\epsilon(N)$ для характеристики циклического поведения материала в зоне концентрации. Один из вариантов — критерий Мэнсона, который имеет следующий вид:

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N)^b + \epsilon'_f (2N)^c, \quad (10)$$

где σ'_f , ϵ'_f , b , c — величины, определяемые с помощью испытаний на усталость указанных малых образцов или приближенными оценками [5], [22] (типовые значения этих коэффициентов для различных типов стали и других сплавов можно найти, например, в работах [1], [3], [5], [24], [25]); E — модуль упругости материала.

Зависимости и рекомендации для учета в анализе усталостной прочности сварных конструкций деформационным методом остаточных напряжений и релаксации средних напряжений можно найти в работе [5]. Для связи циклических напряжений и деформаций в зоне концентрации используется циклическая кривая материала, которая может быть аппроксимирована, например, зависимостью Рэмберга и Осгуда следующего вида:

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\Delta\sigma}{2E} + \left(\frac{\Delta\sigma}{2K'} \right)^{1/n'}, \quad (11)$$

где $\Delta\sigma$ — размах напряжений; K' — коэффициент циклического деформационного упрочнения; n' — показатель степени циклического деформационного упрочнения.

Местные напряжения и деформации предлагается определять с помощью хорошо известной приближенной формулы Нейбера. При этом в работе [5] приводятся ее варианты для случаев

острых и неострых концентраторов, а также полной пластификации сечения. Кроме того, для связи номинальных и локальных напряжений при упругопластическом поведении материала в концентраторе, как указывается в работах [5], [23], может быть использована аппроксимация Глинки. При расчете усталостной прочности в представленных выше формулах деформационного метода, согласно данным работ [5], [23], теоретический коэффициент концентрации напряжений K_t заменяется эффективным K_e .

Для учета средних напряжений цикла при расчете на усталость деформационным методом, согласно работам [5], [23], может быть применена зависимость (14) с поправкой Морроу. Другая зависимость, которая позволяет учесть влияние средних напряжений при расчете на усталость, была предложена Смитом, Уотсоном и Топпером. Она построена на предположении, что произведение максимального напряжения цикла и амплитуды деформации $\sigma_{\max} \cdot \Delta\varepsilon/2$ является постоянным для заданной долговечности и имеет следующий вид:

$$\sigma_{\max} \frac{\Delta\varepsilon}{2} E = (\sigma'_f)^2 (2N_f)^{2b} + \sigma'_f \varepsilon'_f E (2N_f)^{b+c} . \quad (12)$$

Кроме описанных ранее зависимостей деформационного метода могут использоваться их усовершенствованные варианты, которые позволяют ввести в расчет факторы масштаба пластического деформирования и вида напряженного состояния. Такие зависимости представлены, например, в работах [1], [6], однако они включают ряд эмпирических параметров, что может ограничивать их практическое использование.

Другие методы и компьютерные пакеты для решения задач усталостной прочности сварных конструктивных узлов. Для описания и оценки усталостной прочности сварных конструкций, как указывается в источнике [5], могут быть использованы коэффициенты интенсивности напряжений в концентраторе (хорошо известная концепция, которая позволяет описывать сингулярное поле напряжений в вершинах трещин), J -интеграл Райса или плотность энергии деформации. Метод интенсивности локальных напряжений в концентраторе, согласно данным работы [5], является сравнительно новым и в данное время не все его аспекты достаточно изучены.

Следует отметить, что во многих расчетных комплексах конечно-элементного анализа предусмотрены специальные инструменты и модули для решения задач усталостной прочности. Примерами таких расчетных комплексов, согласно данным источников [26] – [28], являются ANSYS, прикладной модуль Simulation системы Solidworks, а также специализированный для решения задач усталостной прочности комплекс nCode DesignLife, который является довольно мощным инструментом с широкими возможностями.

Анализ результатов расчета судокорпусных узлов, полученных различными методами. Усталостные повреждения D , определенные с помощью некоторых из рассмотренных в данной работе методов расчета усталостной прочности, сравнивались между собой в исследованиях [6] и [29]. Результаты сравнения сведены в следующую таблицу.

Результаты расчета усталостного повреждения судокорпусных узлов

Тип узла	Величина усталостного повреждения D		
	Метод напряжения в «горячей» точке	Метод эффективного коэффициента концентрации напряжений	Деформационный метод
Конструкция 1 в работе [6]	1,68	0,538	0,398
Конструкция 2 в работе [6]	–	0,746	0,024
Конструкция 3 в работе [29] (конструктивный вариант 2)	–	1,467	1,396
Конструкция 3 в работе [29] (конструктивный вариант 4)	–	0,581	0,3

Так, в исследовании [6] для соединения продольного ребра жесткости верхней палубы с поперечной переборкой, подкрепленного кницей (конструкция 1 в таблице) были рассчитаны

величины D с помощью методов напряжения в «горячей» точке, фиктивного закругления очага концентрации напряжений и деформационного. Значения D , определенные способом расчета циклической прочности, использующим эффективный коэффициент концентрации напряжений, и деформационным методом, сравнивались в работе [6] на примере углового участка выреза люка в верхней палубе судового корпуса (конструкция 2 в таблице). Аналогичное сравнение было выполнено в исследовании [29] для конструкции скользящего соединения стенок надстройки корпуса судна (конструкция 3 в таблице). В случае последних двух типов узлов наиболее напряженный участок приходился на район, не содержащий сварного шва, по этой причине концепция «горячей» точки не использовалась. В работе [29] исследовано пять конструктивных вариантов скользящего соединения стенок надстройки корпуса судна, в таблице приведены результаты для двух из них: конструктивных вариантов 2 и 4.

Обсуждение основных результатов

В работе описаны основные методы расчета усталостной прочности конструкций корпуса судна, которые используются в мировой практике, экспериментально-теоретический и некоторые новые.

Расчет циклической прочности посредством сравнительного анализа и ранние способы расчета, базирующиеся на абсолютных оценках (ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, номинального напряжения), основаны на ряде допущений и позволяют получить лишь ориентировочные оценки усталостного повреждения узла корпуса судна [2]. Так, метод номинального напряжения не позволяет принять в расчет индивидуальные свойства материала конкретной конструкции, лишь приближенно учитывает ее геометрические особенности, условия изготовления и др.

Методы напряжения в «горячей» точке и фиктивного закругления очага концентрации напряжений являются более совершенными за счет применения расчетных САЕ комплексов для моделирования геометрии узлов, хоть и имеют ряд ограничений на использование. Наибольшим недостатком схемы расчета циклической прочности с использованием напряжений в «горячей» точке является игнорирование механизмов усталостного повреждения и расчет исходя из предположения об макроскопически упругой деформации области, которая содержит место развитие повреждения. Предположение о том, что влияние сварного шва на циклическую прочность конструкции учитывается с помощью $S-N$ кривой соответствующего класса усталости, позволяет лишь приближенно учесть передачу усилий в соединении и эффекты микропластической деформации [2]. Одним из преимуществ схемы расчета на усталость, использующей фиктивное закругление концентратора напряжений, является применение в расчетах всего одной $S-N$ кривой для данного материала и условий эксплуатации (на воздухе, в морской воде, при наличии катодной защиты). Однако, естественно, что использование «универсального радиуса» перехода, равного 1 мм от основного металла к металлу шва, может привести к отличным от эксперимента результатам.

Деформационный метод расчета усталостной прочности рекомендуется для расчетов судокорпусных конструкций согласно исследованию [6], в то же время в данной работе указывается на необходимость его дальнейшего совершенствования. Очевидно, что для получения с помощью данного метода результатов, наиболее близких к экспериментальным, необходимо обладать циклическими и статическими характеристиками металла в вероятной зоне появления трещины (обычно зона сплавления основного металла и металла шва), которые получить на практике довольно сложно. Приближенным является также учет влияния на долговечность остаточных напряжений, асимметрии цикла нагружения, масштаба пластического деформирования, градиента напряжений и вида напряженного состояния. Данные факторы могут вообще не приниматься во внимание в зависимости от используемых расчетных формул и наличия информации о величинах соответствующих эмпирических параметров материала конструкции. Другой источник ошибок может быть связан с тем, что анализ усталости данным способом выполняется, как правило,

для идеализированной геометрии, а наличие дефектов может быть принято в расчет лишь с помощью приближенных зависимостей.

Расчетные комплексы решения задач усталостной прочности используют указанные ранее методы и позволяют наглядно визуализировать и частично автоматизировать результаты.

Экспериментально-теоретический метод также имеет в своей основе деформационный критерий усталости материала и формулу Нейбера, однако «привязка» к данным эксперимента корректирует соответствующую кривую усталости, косвенно принимая, таким образом, в расчет ряд указанных ранее факторов, оказывающих влияние на циклическую прочность, которые сложно или невозможно учесть аналитически в деформационном методе. Данный способ расчета позволяет получить кривую усталости сварного узла в районе $1 \dots 10^8$ циклов, используя лишь небольшое количество испытаний эталонного узла, проведенных при высоких уровнях размаха напряжений, для выполнения «привязки».

Значения теоретических коэффициентов концентрации напряжений в исследуемом узле и циклически испытанной модели при этом также, очевидно, должны определяться для идеализированной геометрии. При этом необходимо производить замеры и статистическую обработку радиусов и углов наклона профиля шва в месте перехода от основного металла к металлу шва в модели либо иметь типовые величины данных параметров при различной обеспеченности для сварных швов.

Учитывая, что экспериментально-теоретический метод использует для анализа усталости сварных узлов теоретические коэффициенты концентрации напряжений, для уменьшения трудозатрат в процессе определения данных коэффициентов, следует владеть упрощенными методиками их определения. Такие методики должны предполагать минимальное использование расчетных комплексов анализа конструкций методом конечных элементов.

Отдельное исследование следует посвятить необходимости и целесообразности учета средних напряжений при использовании экспериментально-теоретического метода для построения кривой усталости узла корпуса судна на втором (малоцикловом) ее участке, где предполагается режим «жесткого» малоциклового нагружения и влиянием среднего напряжения цикла на усталость пренебрегают.

Выводы

Одним из преимуществ экспериментально-теоретического метода расчета усталостной прочности конструкций корпуса судна по сравнению с другими является то, что он позволяет решать все типы задач расчета на усталость, которые имеют место на практике:

- задачу оценки циклической прочности при наличии данных о нагружении и всех характеристиках узла;
- проектировочную из условия обеспечения необходимой долговечности при неизвестных геометрических параметрах конструкции;
- задачу определения допустимого нагружения из условия обеспечения усталостной прочности.

В то же время не все из описанных в работе способов расчета на усталость хорошо подходят для решения всех трех указанных задач.

Другим его преимуществом является комбинированная кривая усталости, которая строится с учетом того, что для расчетов в малоцикловой области используются, как правило, деформационные методы, а для оценки циклической прочности при упругом деформировании в концентраторе — силовые. Такая кривая корректируется с помощью «привязки» к результатам циклических испытаний моделей конструктивных узлов, схожих с исследуемым. Таким образом, экспериментально-теоретический метод расчета усталостной прочности судокорпусных конструкций можно считать предпочтительным в сравнении с другими основными методами, используемыми в расчетной практике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Петин С. В.* Основы инженерных расчетов усталости судовых конструкций / С. В. Петин. — Л.: Судостроение, 1990. — 224 с.
2. *Петин С. В.* Эксплуатационная прочность и надежность конструкций: в 2 ч. / С. В. Петин. — Ч. 1. — СПб.: Политехнический университет, 2012. — 89 с.
3. *Петин С. В.* Эксплуатационная прочность и надежность конструкций / С. В. Петин. — Ч. 2. — СПб.: Политехнический университет, 2012. — 48 с.
4. *Копельман Л. А.* Основы теории прочности сварных конструкций: учеб. пособие. — 2-е изд., испр. / Л. А. Копельман — СПб.: Лань, 2010. — 464 с.
5. *Radaj D.* Fatigue assessment of welded joints by local approaches / D. Radaj, C. M. Sonsino, W. Fricke. — 2nd ed. — Cambridge: Woodhead Publishing Ltd., 2006. — 639 p.
6. *Petinov S. V.* Fatigue Assessment of Structures in High-cycle Segment: Technique and Problems / S. V. Petinov, I. M. Afanasyeva // Proc. of the International Summer School-Conference «Advanced Problems in Mechanics-2010». — SPb., 2010. — Pp. 519–525.
7. *Kozak J.* Fatigue strength determination of ship structural joints / J. Kozak, Z. Górski // Polish Maritime Research. — 2011. — Vol. 18. — Is. 2. — Pp. 28–36. DOI: 10.2478/v10012-011-0009-8.
8. *Максимаджи А. И.* Низколегированная сталь в судостроении / А. И. Максимаджи, О. А. Новиков, Л. Г. Соколов. — Л.: Судостроение, 1964. — 300 с.
9. *Бойцов Г. В.* Прочность и конструкция судов новых типов / Г. В. Бойцов, О. М. Палий. — Л.: Судостроение, 1979. — 360 с.
10. Российский морской регистр судоходства: сб. нормативно-метод. материалов. Кн. одиннадцатая. — НД No. 2-139902-016. — СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2002. — 151 с.
11. *Hobbacher A.* Recommendations for fatigue design of welded joints and components / A. Hobbacher. — Paris, France: International Institute of Welding, 2008. — 144 p.
12. Fatigue assessment of ship structures // IACS Recommendation. — No. 56. — 1999. — 27 p.
13. DNV Fatigue Design of Offshore Steel Structures // Recommended Practice (RP-C203). — Norway: Det Norske Veritas, 2006. — 126 p.
14. DNV Fatigue Assessment of Ship Structures // Recommended Practice (Classification notes No. 30.7). — Norway: Det Norske Veritas, 2010. — 108 p.
15. *Fricke W.* Guideline for the Fatigue Assessment by Notch Stress Analysis for Welded Structures / W. Fricke // International Institute of Welding. — IIW-Doc. XIII-2240r2-08/XV-1289r2-08. — Hamburg University of Technology Ship Structural Design and Analysis, July 2010. — 144 p.
16. *Pedersen M. M.* Experience with the Notch Stress Approach for Fatigue Assessment of Welded Joints / M. M. Pedersen, O. O. Mouritsen, M. R. Hansen, J. G. Andersen // Proceedings of the Swedish Conference on Lightweight Optimized Welded Structures. — Borlänge, Sweden, 2010. — Pp. 1–11.
17. *Коростылёв Л. И.* О расчетной оценке усталостной прочности конструктивных узлов судового корпуса / Л. И. Коростылев, В. П. Сулов, Н. А. Штырев // Строительная механика корабля: тр. НКИ. — Николаев, 1987. — С. 35–42.
18. *Коростылёв Л. И.* Оценка усталостной прочности судовых корпусных конструкций с концентраторами напряжений / Л. И. Коростылев // Вторая международная конференция по судостроению — ISC'98: труды, секция С. — СПб.: ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, 1998. — С. 160–167.
19. *Коростылёв Л. И.* Практическая реализация экспериментально-теоретического метода расчетной оценки усталостной долговечности судовых конструкций / Л. И. Коростылев // Зб. наук. праць УДМУ. — 1998. — № 3 (351). — С. 3–9.
20. *Коростылёв Л. И.* Оценка усталостной прочности сварных узлов тонкостенных конструкций в многоциклового области / Л. И. Коростылёв, С. Ю. Клименков // Методи розв'язування прикладних задач механіки деформівного твердого тіла: збірник наукових праць ДНУ ім. О. Гончара. — 2010. — № 11 (352). — С. 152–159.
21. *Niemi E.* Fatigue Analysis of Welded Components: Designer's Guide to the Structural Hot-spot Stress Approach (IIW-1430-00) / E. Niemi, W. Fricke, S. J. Maddox. — Cambridge, England: Woodhead Publishing Limited, 2006. — 49 p.
22. Stress Determination for Fatigue Analysis of Welded Components (IIW doc. IIS/IIW-1221-93) / Ed. E. Niemi. — Cambridge, England: Abington Publishing, 1995. — 80 p.

23. *Stephens R. I. Metal fatigue in engineering* / R. I. Stephens, A. Fatemi, R. R. Stephens, H. O. Fuchs. — 2nd ed. — Canada: John Wiley & Sons, Inc., 2001. — 473 p.
24. *Manson S. S. Fatigue and durability of structural materials* / S. S. Manson, G. R. Halford. — ASM International, 2006. — 457 p.
25. *Suresh S. Fatigue of Materials* / S. Suresh. — Second edition. — Cambridge University Press, 2006. — 679 p.
26. *Browell R. Calculation and displaying fatigue results* / R. Browell, Al. Hancq. — ANSYS, Inc., 2006. — 42 p.
27. Берендеев Н. Н. Применение системы ANSYS к оценке усталостной долговечности: учеб.-метод. материалы по программе «Информационные системы в математике и механике» / Н. Н. Берендеев. — Нижний Новгород, 2006. — 84 с.
28. Берендеев Н. Н. Методы решения задач усталости в пакете ANSYS WORKBENCH®: учеб.-метод. пособие / Н. Н. Берендеев. — Нижний Новгород: Нижегородский государственный университет, 2012. — 64 с.
29. Гучинский П. В. Разработка узла конструкции судна по условию усталостной долговечности / П. В. Гучинский, С. В. Петин // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. — 2012. — № 159. — С. 177–186.

ANALYSIS AND CLASSIFICATION OF METHODS FOR DETERMINING FATIGUE STRENGTH OF THIN-WALLED SHIP STRUCTURES

The existing methods for the determining the fatigue strength of ship structures have been reviewed and analysed. These methods include nominal stress, comparative analysis, experimental and theoretic, notch stress, notch strain, hot spot stress, strain energy density based fatigue assessment approaches and also fracture mechanics based approach. The fatigue assessment technique presented in the Russian Maritime Register of Shipping is reviewed as well. Advantages and disadvantages of these methods are revealed and pointed out. Their classification by the type of the indicator of the intensity of fatigue damage accumulation is suggested. The suitability of mentioned techniques for solving practical problems of fatigue strength of ship structures is analysed. The values of fatigue damage assessment results obtained with hot spot stress, notch stress and notch strain fatigue strength assessment approaches for different ship structures are compared. The potential ways of improving of the experimental and theoretic method for ship structures fatigue strength assessment are determined.

Keywords: welded assembly, fatigue strength, fatigue strength assessment methods, stress concentration factor, fatigue crack, structural stress, nominal stress.

REFERENCES

- Petinov, S. V. *Osnovy inzhenernykh raschetov ustalosti sudovykh konstruktsiy*. L.: Sudostroenie, 1990.
- Petinov, S. V. *Ekspluatatsionnaya prochnost i nadezhnost konstruktsiy*. Part 1. SPb.: St. Petersburg Polytechnic University, 2012.
- Petinov, S. V. *Ekspluatatsionnaya prochnost i nadezhnost konstruktsiy*. Part 2. SPb.: St. Petersburg Polytechnic University, 2012.
- Kopelman, L. A. *Osnovy teorii prochnosti svarnykh konstruktsiy*. 2nd ed. SPb.: «Lan», 2010.
- Radaj, D., C. M. Sonsino, and W. Fricke. *Fatigue assessment of welded joints by local approaches*. 2nd ed. Cambridge: Woodhead Publ. Ltd., 2006.
- Petinov, S. V., and I. M. Afanasyeva. “Fatigue Assessment of Structures in High-cycle Segment: Technique and Problems.” *Proc. of the International Summer School-Conference «Advanced Problems in Mechanics-2010»*. SPb., 2010: 519–525.
- Kozak, J., and Z. Górski. “Fatigue strength determination of ship structural joints.” *Polish Maritime Research* 18.2 (2011): 28–36. DOI: 10.2478/v10012-011-0009-8
- Maksimadzi, A. I., O. A. Novikov, and L. G. Sokolov. *Nizkolegirovannaya stal v sudostroenii*. L.: Sudostroenie, 1964.
- Boitsov, G. V., and O. M. Paliy. *Prochnost i konstruktsiya sudov novykh tipov*. L.: Sudostroenie, 1979.
- Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva. *Sbornik normativno-metodicheskikh materialov*. ND No 2-139902-016. Vol. 11. SPb.: Russian Maritime Register of Shipping Publ., 2002.

11. Hobbacher, A. *Recommendations for fatigue design of welded joints and components*. Paris, France: International Institute of Welding, 2008.
12. *Fatigue assessment of ship structures*. IACS Recommendation No. 56. July 1999.
13. *Recommended practice DNV-RP-C203. Fatigue design of offshore steel structures*. Norway: Det Norske Veritas, 2006.
14. *Recommended Practice Classification notes No. 30.7. Fatigue Assessment of Ship Structures*. Norway: Det Norske Veritas, 2010.
15. Fricke, W. *Guideline for the Fatigue Assessment by Notch Stress Analysis for Welded Structures* IIW document XIII-2240r2-08/XV-1289r2-08. Hamburg University of Technology Ship Structural Design and Analysis, July 2010.
16. Pedersen, M. M., O. O. Mouritsen, M. R. Hansen, and J. G. Andersen. "Experience with the Notch Stress Approach for Fatigue Assessment of Welded Joints." *Proc. of the Swedish Conference on Lightweight Optimized Welded Structures*. Borlänge, Sweden, 2010: 1–11.
17. Korostylev, L. I., V. P. Suslov, and N. A. Shtyrev. "O raschetnoy otsenke ustalostnoy prochnosti konstruktivnykh uzlov sudovogo korpusa." *Stroitel'naya mehanika korablja: tr. NKI. Nikolaev*, 1987: 35–42.
18. Korostylev, L. I. "Otsenka ustalostnoy prochnosti sudovykh korpusnykh konstruksiy s kontsentratorami napryazheniy." *Vtoraja mezhdunar. konf. po sudostroeniju — ISC'98: Trudy, Sekcija S*. SPb.: CNII im. akad. A. N. Krylova, 1998: 160–167.
19. Korostylev, L. I. "Prakticheskaya realizatsiya eksperimentalno-teoreticheskogo metoda raschetnoy otsenki ustalostnoy dolgovechnosti sudovykh konstruksiy." *Zb. nauk. prac' UDMTU* 3(351) (1998): 3–9.
20. Korostylev, L. I., and S. Yu. Klimenkov. "Otsenka ustalostnoy prochnosti svarynykh uzlov tonkostennykh konstruksiy v mnogotsiklovoe oblasti." *Metody` razv'yazuvannyya pry'kladny'x zadach mexaniky` deformivnogo tverdogo tilla: zbirny'k naukovy'x prac' DNU im. O. Gonchara* 11(352) (2010): 152–159.
21. Niemi, E., W. Fricke, and S. J. Maddox. *Fatigue Analysis of Welded Components: Designer's Guide to the Structural Hot-spot Stress Approach (IIW-1430-00)*. Cambridge, England: Woodhead Publishing Limited, 2006.
22. Niemi E., ed. *Stress Determination for Fatigue Analysis of Welded Components (IIW doc. IIS/IIW-1221-93)*. Cambridge, England: Abington Publishing, 1995.
23. Stephens, Ralph I., Ali Fatemi, Robert R. Stephens, and Henry O. Fuchs. *Metal fatigue in engineering*. 2nd ed. Canada: John Wiley & Sons, Inc., 2001.
24. Manson, S. S., and G. R. Halford. *Fatigue and durability of structural materials*. ASM International, 2006.
25. Suresh, S. *Fatigue of Materials*. Second edition. Cambridge University Press, 2006.
26. Browell, R., and Al Hancq. *Calculating and displaying fatigue results*. ANSYS, Inc., 2006.
27. Berendelev, N. N. *Primenenie systemi ANSYS k ocenke ustalostnoy dolgovechnosti*. Nizhny Novgorod, 2006.
28. Berendelev, N. N. *Metody resheniya zadach ustalosti v pakete ANSYS WORKBENCH ®: uchebno-metodicheskoe posobie*. Nizhny Novgorod: Nizhegorodskij gosuniversitet, 2012.
29. Guchinskij, R. V., and S. V. Petinov. "Razrabotka uzla konstrukcii sudna po usloviju ustalostnoj dolgovechnosti." *Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta* 159 (2012): 177–186.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Коростылёв Леонтий Иванович —
доктор технических наук, профессор.
Национальный университет кораблестроения
имени адмирала Макарова
leonty.korostilyov@nuos.edu.ua
Литвиненко Дмитрий Юрьевич — аспирант.
Научный руководитель:
Коростылёв Леонтий Иванович.
Национальный университет кораблестроения
имени адмирала Макарова
litvinen@inbox.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Korostylev Leonty Ivanovich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov National University of Shipbuilding
leonty.korostilyov@nuos.edu.ua
Litvinenko Dmitry Yurievich — postgraduate.
Supervisor:
Korostylev Leonty Ivanovich.
Admiral Makarov National University of Shipbuilding
litvinen@inbox.ru

Статья поступила в редакцию 25 апреля 2016 г.