

ФГБОУ ВО «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
МОРСКОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

РОССИЙСКОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО СУДОСТРОИТЕЛЕЙ
ИМЕНИ АКАДЕМИКА А.Н. КРЫЛОВА

ФГУП «КРЫЛОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР»

Всероссийская
научно-техническая

КОНФЕРЕНЦИЯ

по строительной
механике корабля,

посвященная 150-летию со дня рождения

Ивана Григорьевича БУБНОВА

Бубновские чтения – 2022

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2022

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Сопредседатели:

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой строительной механики корабля СПбГМТУ, руководитель научной школы РАН «Развитие методов вычислительной механики для решения основных задач строительной механики корабля по созданию конструкций с заданными характеристиками надежности, эффективности и технологичности» – **Родионов А.А.**

д.т.н., профессор, президент РосНТОС имени академика А.Н. Крылова – **Никитин В.С.**

к.т.н., начальник Отделения прочности и надежности конструкций ФГУП «Крыловский государственный научный центр», заведующий Базовой кафедрой «Прочности и конструкции корабля» СПбГМТУ – **Шапошников В.М.**

Члены оргкомитета:

д.т.н., профессор **Крыжевич Г.Б.**, начальник сектора ФГУП «Крыловский государственный научный центр», профессор кафедры строительной механики корабля СПбГМТУ

д.т.н., профессор **Тряскин В.Н.**, заведующий кафедрой конструкций и технической эксплуатации судов СПбГМТУ

д.т.н., профессор **Демешко Г.Ф.**, профессор кафедры проектирования судов СПбГМТУ

д.т.н. **Ярцев Б.А.**, начальник сектора ФГУП «Крыловский государственный научный центр», председатель ГАК СПбГМТУ по направлению 15.04.03 «Прикладная механика»

д.т.н. **Дульнев А.И.**, начальник лаборатории ФГУП «Крыловский государственный научный центр», председатель ГАК СПбГМТУ по направлению 15.03.03 «Прикладная механика»

к.т.н., доцент **Фрумен А.И.**, профессор кафедры строительной механики корабля СПбГМТУ, ученый секретарь УС СПбГМТУ

к.т.н. **Александров А.В.**, начальник лаборатории ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

к.т.н. **Кориунов В.А.**, доцент кафедры строительной механики корабля СПбГМТУ

к.ф.-м.н. **Платонов В.В.**, начальник лаборатории ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

к.т.н. **Тумашик Г.А.**, начальник лаборатории ФГУП «Крыловский государственный научный центр», доцент Базовой кафедры «Прочности и конструкции корабля» СПбГМТУ

Ученый секретарь: к.т.н. **Миронов М.Ю.**, доцент кафедры строительной механики корабля СПбГМТУ, начальник отдела НИРС УОНР СПбГМТУ

Секретарь: **Мудрик Р.С.**, ассистент, аспирант кафедры строительной механики корабля СПбГМТУ

Руководители секций:

Секция А к.т.н. **А.В. Александров**, д.т.н., проф. **В.Н. Тряскин**

Секция В к.т.н., проф. **А.И. Фрумен**, к.т.н., доц. **Г.А. Тумашик**

Секция С д.т.н., проф. **Г.Б. Крыжевич**, д.т.н. **А.И. Дульнев**

Секция D к.т.н., доц. **Д.А. Пономарев**, д.т.н. **Б.А. Ярцев**

Секция E д.т.н., проф. **А.И. Гайкович**, к.т.н., доц. **С.Н. Рюмин**

Секция F к.т.н., доц. **Миронов М.Ю.**, асп. **Мудрик Р.С.**

Сборник содержит тезисы докладов, поданных в 2022 г. на НТК по СМК «Бубновские чтения - 2022»

За помощь в проведении конференции Оргкомитет выражает благодарность д.т.н. **Вильниту И.В.** (АО «ЦКБ МТ «Рубин»), д.т.н., проф. **Шляхтенко А.В.** (АО «ЦМКБ «Алмаз»), **Дорофееву В.Ю.** (АО «СПМБМ «Малахит»), **Савченко О.В.** (ФГУП «Крыловский государственный научный центр»), Пальникову К.Г. (ФГУ «Российский морской Регистр судоходства»)

Материалы даны в авторской редакции

ДЕТЕРМИНИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОЙ И ПОЛНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ФЕРРИТО-ПЕРЛИТНЫХ СТАЛЕЙ СУДОВЫХ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

МОЛОКОВ К.А., НОВИКОВ В.В., АНТОНЕНКО С.В., МАМОНТОВ А.И.
Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

Усталостную долговечность судовых конструкций определяет деградация корпусной стали вследствие развития ее структурной поврежденности. Она, как показывает практика эксплуатации, в условиях малоциклового усталости приводит к образованию опасных трещин. Поэтому разработка моделей оценки прочности и прогнозирование должны осуществляться с учетом истории развития трещин. При отслеживании во времени усталостных структурных повреждений можно получить выборочную функцию этих повреждений, рассмотрение которой позволяет описать весь процесс накопления и развития структурных повреждений в корпусной стали на разных этапах эксплуатации судна. Для построения детерминистической модели оценки остаточной и полной долговечности сталей корпусных конструкций представляется необходимым выполнять сравнительную оценку кривых усталости. В предлагаемом подходе к построению кривых Веллера для стали с поврежденностью и без нее, использованы зависимости, позволяющие определить пределы выносливости исходного и поврежденного материала, основанные на рассмотрении структурно механической модели. Этот подход положительно отличается от других и дает возможность рассчитывать кривые Веллера как для конкретных судостроительных сталей, так и для каждой зоны термического влияния сварного соединения. Предлагаемые зависимости, составляющие детерминистическую модель оценки и кривые усталости, получены путем рассмотрения аналитически стадий зарождения и распространения макротрещины при совместном решении задачи. Таким образом, предложен достаточно простой инженерный подход к построению кривых Веллера, который может быть в дальнейшем развит, уточнен для практического применения и оценки полного ресурса сварных соединений и конструкций в кораблестроении и машиностроении.

The fatigue life of ship structures is determined by the degradation of hull steel due to the development of its structural damage. It, as the practice of operation shows, in conditions of low-cycle fatigue leads to the formation of dangerous cracks. Therefore, the development of strength assessment models and forecasting should be carried out taking into account the history of crack development. When tracking fatigue structural damages over time, it is possible to obtain a selective function of these damages, the consideration of which makes it possible to describe the entire process of accumulation and development of structural damages in hull steel at different stages of ship operation. In order to construct a deterministic model for estimating the residual and total durability of steel hull structures, it seems necessary to perform a comparative assessment of fatigue curves. In the proposed approach to the construction of Weller curves for steel with and without damage, dependences are used to determine the limits of endurance of the original and damaged material, based on the consideration of a structurally mechanical model. This approach differs positively from others and makes it possible to calculate Weller curves both for specific shipbuilding steels and for each zone of thermal influence of the welded joint. The proposed dependencies that make up the deterministic evaluation model and fatigue curves are obtained by analytically considering the stages of the origin and propagation of a macro crack when solving the problem together. Thus, a fairly simple engineering approach to the construction of Weller curves is proposed, which can be further developed, refined for practical application and evaluation of the full life of welded joints and structures in shipbuilding and mechanical engineering.



Рис. 1. Характерные повреждения на судах смешанного плавания [1]:

а) разрушение шпангоута в бортовом танке;

б) разрушение узлов соединения балок набора на т/х «Ладоба»

Постановка проблемы. Циклическое действие волновых нагрузок на корпус судна приводит к изменениям в структурной поврежденности стали из-за усталости материала и возникновению трещин в судовых конструкциях. Вследствие чрезмерно высоких напряжений, конструкторских недоработок характерные трещины появляются в местах окончаний прерывистых связей, в районе «жестких точек», а также в соединениях балок набора корпуса (рис. 1). Особенно много их обнаружено в палубах судов смешанного плавания [1]. Эти трещины в большинстве имеют усталостную природу. Можно сказать, что массовое появление трещин на этих судах и их последующий анализ являются своеобразным «полигоном» изучения работоспособности судовых конструкций. Обеспечение безопасной эксплуатации корпусов судов должно определяться допустимым уровнем структурной поврежденности корпусной стали. Для этого требуется обеспечить соответствующий технический контроль и диагностику. Вместе с тем, можно сказать, что в настоящее время они практически отсутствуют, а существующие далеки от совершенства. Действительно, в процессе эксплуатации судов в проблемных узлах и конструкциях образуется структурная поврежденность стали, которую трудно отслеживать и количественно оценивать, несмотря на то что в последнее время появились новые акустические, электронные методы, открывающие более широкие возможности в технической диагностике. При отслеживании во времени усталостных структурных повреждений можно получить выборочную функцию этих повреждений, рассмотрение которой позволяет описать весь процесс накопления и развития структурных повреждений в корпусной стали на разных этапах эксплуатации судна (рис. 2) [2].

Необходимо отметить, что изучение структурной поврежденности с помощью выборочных функций начинается с начального уровня повреждений. Они изменяются во времени

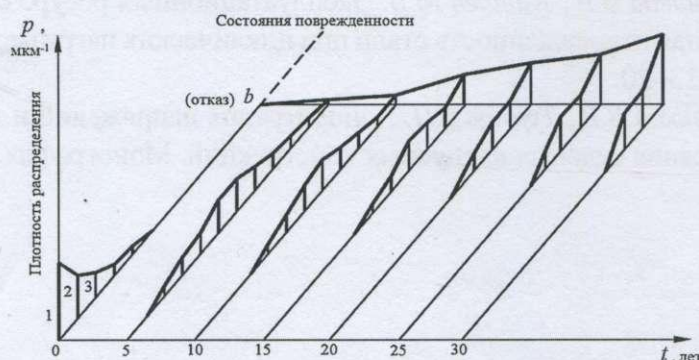


Рис. 2. Эволюция структурной поврежденности стали корпуса судна (качественная картина, построенная Г.Т. Казановым в [2])

в зависимости от проявления волновых воздействий на корпус судна. По мере эксплуатации это приводит к ухудшению (деградации) стали.

Основные результаты. Результаты анализа показывают, что предельное состояние (состояние поврежденности) наступает, когда плотность повреждений материала накоплена до такого уровня b , что даже незначительные перегрузки достаточны для объединения и ускоренного распространения минимальных макротрещин L_{min} .

Для построения детерминистической модели оценки остаточной и полной долговечности сталей корпусных конструкций представляется необходимым выполнять сравнительную оценку кривых усталости. В предлагаемом подходе к построению кривых Веллера для стали с поврежденностью и без нее, могут быть использованы зависимости, позволяющие определить пределы выносливости исходного σ_{fr}^0 и поврежденного σ_{frL} материала, основанные на рассмотрении структурно механической модели. Этот подход положительно отличается от других и дает возможность рассчитывать кривые Веллера как для конкретных судостроительных сталей, так и для каждой зоны термического влияния (ЗТВ) сварного соединения характеризующейся своей неоднородностью.

Заключение. Выводы из аналитических решений и результаты расчетов кривых усталости в первом приближении однозначно показывают уменьшение выносливости в 2,2 раза для ряда феррито-перлитных сталей при работе на симметричный цикл нагрузки, соответствующей пределу текучести. Установлено, что значительное уменьшение выносливости приводит, как правило, к возникновению трещин по корпусу за счет перераспределения нагрузок в конструкциях. Из-за остаточных сварочных напряжений в ЗТВ изменяется асимметрия цикла напряжений r , если сварное соединение подвергается действию продольной нагрузки. При появлении дефекта в виде трещины в области растягивающих напряжений в ЗТВ резко сокращается общий ресурс прочности соединения, который может быть оценен по полученным в работе кривым Веллера.

Предлагаемые зависимости, составляющие детерминистическую модель оценки и кривые усталости, получены путем рассмотрения аналитически стадий зарождения и распространения макротрещины при совместном решении задачи. Остаточный ресурс существенно зависит от характерного размера трещины в переходной зоне между первой и второй стадией ее развития. Этот размер приоритетно определяется средней величиной зерна феррито-перлитной стали, асимметрией и амплитудой внешней нагрузки. Таким образом, предложен достаточно простой инженерный подход к построению кривых Веллера, который может быть в дальнейшем развит, уточнен для практического применения и оценки полного ресурса сварных соединений и конструкций в кораблестроении и машиностроении.

Литература

1. Молоков К.А., Новиков В.В., Китаев М.В. Эксплуатационный ресурс судовых сварных соединений и структурная поврежденность стали при циклических нагрузках//Вестник ИШ ДВФУ.– 2017. № 2(31). С. 13–20.
2. Казанов Г.Т., Новиков В.В., Турмов Г.П. Концентрация напряжений и другие особенности напряженного состояния судовых корпусных конструкций. Монография. – Владивосток: ДВФУ, 2014. – 178 с.

