

УДК 539.422.24

Коваленко І. В.¹

ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СУДОВЫХ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ РАЗЛИЧНЫХ КОНЦЕНТРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ

В статье представлено описание построения и обоснования модели усталостного разрушения, объединяющей такие стадии как образование и рост трещин в элементах судовых конструкций, имеющих различные концентраторы напряжений.

Представленная для рассмотрения модель усталостного разрушения включает в себя образец для проведения исследований много и малоциклового усталости поврежденного материала, а также условие, определяющее начальный размер макротрещины и характеризующее переход от первой стадии усталостного разрушения к последующей.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, усталостное разрушение, микро- и макропластические деформации, сварной шов, дефекты, трещиностойкость.

Введение

Постоянное повышение требований к качеству изготовления узлов судовых конструкций, выполнению их ремонтов, с применением сварки биметаллов, обуславливают появление новых методов расчета и определения эксплуатационных свойств. Особую роль играет прогноз о длительности эксплуатации металлоконструкции. В связи с этим, разработки в указанном направлении являются весьма актуальными.

Анализ последних исследований и публикаций. Свойства биметаллических сталей ВСтЗсп5 + 10Х13 широко известны [1], применяются как коррозионностойкие и термостойкие материалы при изготовлении деталей работающих в воде, разбавленных растворах солей, агрессивных термических средах, в судостроительной промышленности. Имеется информация по определению свойств коррозионного износа и значением скорости общей коррозии 0.1 – 0.3 мм/год.

Постоянное повышение требований к качеству изготовления металлургических агрегатов, выполнению их ремонтов, с применением сварки биметаллов, обуславливают появление новых методов расчета и определения эксплуатационных свойств. Особую роль играет прогноз о длительности эксплуатации металлоконструкции. В связи с этим, разработки в указанном направлении являются весьма актуальными.

Свойства биметаллических сталей ВСтЗсп5 + 10Х13 широко известны [2], применяются как коррозионностойкие и термостойкие материалы при изготовлении деталей работающих в воде, разбавленных растворах солей, агрессивных термических средах, в нефтехимической промышленности. Имеется информация по определению свойств коррозионного износа и значением скорости общей коррозии 0.1 – 0.3 мм/год [2].

Необходимость в проведении исследований, направленных на определение работоспособности сварных соединений биметаллов имеет особое значение так как данные материалы применяются как при изготовлении, так и при ремонте промышленных агрегатов.

Данные [3], свидетельствуют что из-за увеличения уровня остаточных напряжений и образования неоднородностей структуры при сварке биметаллов значения ударной вязкости снижаются на 20-25 % по сравнению с исходным вариантом.

¹ канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Азовский морской институт», г. Мариуполь, ivankovalenko165@gmail.com

В работе [3], установлено что вблизи сварных соединений биметаллов могут возникать дефекты, вызванные пластической деформацией укорочения. Склонность сварных соединений к образованию таких дефектов тем больше чем меньше деформационная способность.

Приведенная информация требует дополнительного анализа и исследования.

Целью данной работы является представление и обобщение рассматриваемой модели усталостного разрушения включающей в себя проведения исследований много и малоциклового усталости поврежденного материала судовых металлоконструкций.

Изложение основного материала.

Изложенный в статье материал по описанию модели усталостного разрушения включает в себя образец для много и малоциклового усталости поврежденного материала, а также условие, определяющее начальный размер макротрещины и характеризующее переход от первой стадии усталостного разрушения ко второй [4].

Согласование составляющих объединенной модели достигается на основе использования единого подхода к описанию процесса накопления повреждений на различных стадиях усталостного разрушения, в основу которого положено представление о деформационном разрыхлении, обусловленном макро и микропластическими деформациями [5].

Для описания влияния неоднородности напряженно-деформированного состояния (НДС) на усталость в концентраторах с малым радиусом кривизны в вершине [7], к которым относятся дефекты сварных швов, используется интегральная формулировка критерия разрушения:

$$\int_{V_0} \Theta(x, N) dV = \Theta_* \tag{1}$$

где V_0 – минимальный объем материала, в котором возможно развитие процесса накопления усталостных повреждений, N – число циклов нагружения.

Протяженность вдоль оси концентратора характеризуется структурно зависимым параметром материала, значение которого находится из испытаний на циклическую трещиностойкость. Значение параметра определяется как расстояние, на котором амплитуда напряжения достигает значения предела усталости при размахе коэффициента интенсивности напряжений (КИН), равном пороговому значению ΔK_{th} . С учетом поправки Дж. Р. Ирвина на перераспределение напряжений в вершине трещины в результате пластического деформирования выражение для параметра принимает вид:

$$d = \left[\left(\Delta K_{th} / (1-r) \sigma_{0.2} \right)^2 + \left(\Delta K_{th} / 2\sigma_r \right)^2 \right] / 2\pi. \tag{2}$$

Результаты исследований развития усталостного повреждения и образования макротрещины в концентраторе, показывают, что начальный размер образующейся макротрещины согласуется со значением параметра.

Развитие процесса накопления усталостных повреждений зависит от граничных условий для локального объема и, следовательно, будет контролироваться напряжениями и деформациями на расстоянии от вершины концентратора. Это позволяет записать выражение для эффективного коэффициента концентрации напряжений в виде:

$$k_\sigma = \Delta\sigma_d / \Delta\sigma_n, \tag{3}$$

где $\Delta\sigma_n$ – размах номинальных напряжений. В таблице 1 представлено сравнение расчетных значений параметра с данными экспериментов, приведенных в литературных источниках.

Таблица 1 – Сравнение экспериментальных и расчетных значений параметра

Материал основного слоя	S, (мм)	G ₀₂ (МПа)	D, эксперимент (мм)		G _r (МПа)		ΔK _{гн} (МПа)	D, расчетн. (мм)
			N _f < 10 ⁵	N _f > 10 ⁵	r = -1	r = -1		
10X13	6	340	0,13	0,22	126	110	5	0,12
	12		0,13	0,3				
	24		0,13	0,4				
09Г2С	1,85	400	0,18	0,18	120	105	6	0,17
08КП	3	280	0,25	0,25	147	134	7,8	0,26

Повышение значения параметра с увеличением толщины образца и ростом числа циклов до разрушения объясняется переходом вида напряженно-деформированного состояния в подповерхностных слоях в вершине концентратора от плоского напряженного состояния к плоской деформации [7].

Сравнение расчетных значений эффективного коэффициента концентрации напряжений с экспериментальными данными, приведенными в литературе, показывает их достаточно хорошее согласие для сталей различных классов [8]. В качестве примера на рисунке 1 [9] представлено сравнение экспериментальных данных с расчетной кривой на пределе усталости в зависимости от радиуса кругового отверстия в плоских образцах из стали 10X13.

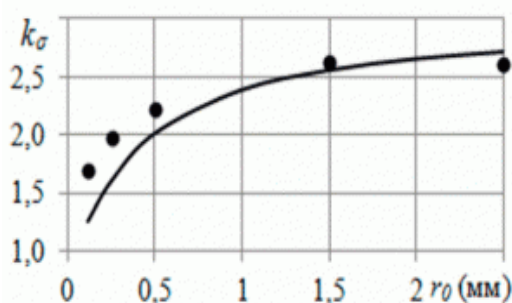


Рисунок 1 – График зависимости коэффициента концентрации напряжения от радиуса отверстия образца (k_σ – коэффициент концентрации напряжений; r_0 – начальный радиус трещины отверстия образца, мм)

Усталостное разрушение в объемах, превышающих, после образования макронесплошности сопровождается одновременно развитием двух процессов – усталость вне зоны разрушения и рост трещины в поврежденном материале [9].

Критерий разрушения локального объема металла с образованием макронесплошности на расстоянии от вершины концентратора после циклов нагружения записывается в виде: $\theta(x, N_*) = \theta_*$. Величина деформационного разрыхления связана с работой микронапряжений на пути микро- и макропластического деформирования и определяется кинетическими соотношениями, развитыми в исследованиях В. Я. Бреднева [10].

Дискретное приращение длины трещины на величину после циклов нагружения происходит при выполнении в области вершины трещины критерия локального разрушения, принимающего вид:

$$\theta(\zeta_*, n_*) = \theta_*, \quad (4)$$

где $\theta(\zeta_*, n_*) = \theta_v + \theta_0^p(\zeta_*) + \theta^p(\zeta_*, n_*)$, θ_v – разрыхление, накопленное в результате циклического деформирования в концентраторе напряжений на первой стадии усталостного разрушения, определяемое для точки с координатой $x = l + \zeta_*$, $\theta_0^p(\zeta_*)$ – разрыхление в нулевом полуцикле нагружения.

На первой стадии усталостного разрушения приращение размеров макронесплошности в вершине концентратора с увеличением числа циклов нагружения будет определяться координатами точек, в которых последовательно выполняется критерий усталостного разрушения и характеризоваться скоростью [7]. С ростом макронесплошности в ее вершине будет формироваться НДС, характерное для макротрещины и определяющее ее скорость роста. Критерием перехода от первой стадии усталостного разрушения ко второй, определяющим с расчетной точки зрения момент образования макротрещины, является равенство [10]. Решение данного уравнения относительно расстояния дает начальный размер трещины.

Экспериментальное исследование зарождения трещины в концентраторе напряжений в условиях малоциклового усталости выполнено на прямоугольных образцах из стали Ст3, имеющих в вершине краевого надреза круговое отверстие с проточкой (см. рисунок 2) [6,9]. Принятая форма образца позволяет получить протяженную зону циклических пластических деформаций, что облегчает наблюдение за процессом развития усталостного разрушения. Параметры НДС в вершине концентратора рассчитывались с использованием численной процедуры МКЭ.

На рисунке 3 [11] представлен характер изменения длины трещины, развивающейся от кромки отверстия, в зависимости от числа циклов нагружения. Из полученных данных следует, что после замедленного распространения усталостного разрушения на расстояние от вершины концентратора 1,1 мм происходит скачкообразное подрастание трещины и последующее ее ускоренное развитие.

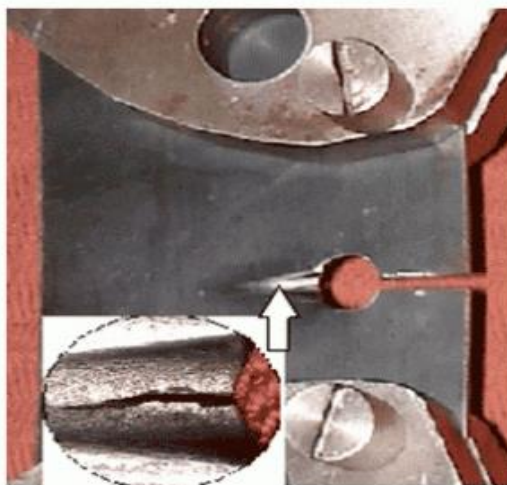


Рисунок 2 – Общий вид образца для проведения исследований

Замедление процесса приращения протяженности зоны разрушения в вершине концентратора характерно для малоциклового усталости [12]. В связи с этим за начальный размер макротрещины по данным эксперимента следует принять длину 1,1 мм. Начальный размер трещины, полученный на основе расчетной модели, составляет 1,05 мм. Значение скорости разрушения в поврежденном материале для полученной начальной длины трещины составляет 0,008 мм/цикл, что соответствует значениям, наблюдаемым на заключительной стадии усталостного разрушения образцов, и определяет возможность скачкообразного развития трещины.

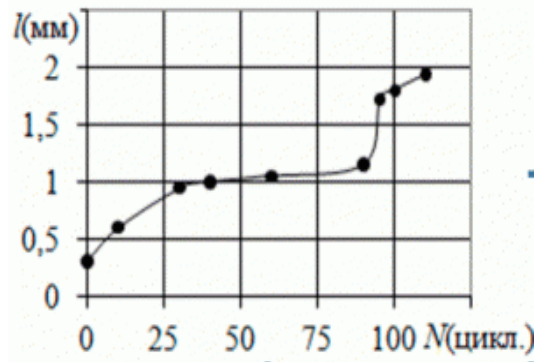


Рисунок 3 – Циклограмма процесса развития и разрушения образца
(l – длина трещины от кромки отверстия образца, мм; N – число циклов нагружения)

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что развитие деформированного состояния образца происходит вдоль оси концентратора и прямо пропорционально влияет на его циклическую трещиностойкость.
2. Определено, что модульное значение амплитуды напряжений достигает величины предела усталости при значении интенсивности напряжений 5-7,8 МПа.
3. Выявлено, что процесс объемного разрушения по линии сплавления околошовной зоны сопровождается увеличением усталости вне зоны разрушения, и ростом трещины в основном металле сварного соединения.

Список использованных источников

1. Панасюк, В. В. Застосування методів механіки руйнування матеріалів для оцінювання міцності зварних з'єднань / В. В. Панасюк // Автоматическая сварка. – 2008. – № 11. – С. 151–156.
2. Махненко, В. И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций / В. И. Махненко. – Киев: Наукова думка, 2006. – 618с.
3. Патон, Б. Е. Новые возможности автоматической сварки в машиностроении / Б. Е. Патон, Л. Б. Медовар, В. Е. Саенко // Металлургия машиностроения. – 2003. – № 1. – С. 2–5.
4. Медовар, Б. И. Сварка хромоникелевых аустенитных сталей / Б. И. Медовар. – М.: Машгиз, 1958. – 258с.
5. Мовчан, Б. А. Микроскопическая неоднородность в литых сплавах / Б. А. Мовчан. – Киев: Гостехиздат УССР, 1968. – 230 с.
6. Касаткин, Б. И. Методика исследования кинетики деформаций при замедленном разрушения / Б. И. Касаткин, В. Я. Бреднев, В. В. Волков // Автомат. сварка. – 1981. – № 11. – С. 286

С. 1–11.

7. Недосека, А. Я. Основы расчета сварных конструкций / А. Я. Недосека. – Киев : Вища школа, 1988. – 263 с.

8. Николаев, Г. А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций / Г. А. Николаев, С. А. Куркин, В. А. Винокуров. – М. : Высш. школа, 1982. – 270 с.

9. Стафаков, Ю. П. Рост трещин вблизи границы раздела разнородных материалов в условиях сжатия / Ю. П. Стафаков, И. Л. Побаль, А. Г. Князева // Физ. мезомеханика. – 2002. – № 1. – С. 81–88.

10. Земзин, В. Н. Сварные соединения разнородных сталей / В. Н. Земзин. – Л. : Машиностроение, 1966. – 190 с.

11. Мовчан, Б. А. Микроскопическая неоднородность в литых сплавах / Б. А. Мовчан. – Киев : Гостехиздат УССР, 1968. – 230 с.

12. Коваленко, И. В. Усовершенствование технологии дуговой сварки биметаллических сталей при изготовлении промышленных металлоконструкций : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.06; защищена 08.12.13 : утв. 12.12.13 / Коваленко Иван Васильевич. – Мариуполь, 2013. – 146 с.

Коваленко І. В.

СЛІДУВАННЯ ПРОЦЕСУ УСТАЛОСТНОГО РУЙНУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ТА ДЕТАЛЕЙ СУДНОВИХ ДОПОМІЖНИХ МЕХАНІЗМІВ ТА КОНСТРУКЦІЙ ПРИ ВИНИКНЕННІ РІЗНИХ КОНЦЕНТРАТОРІВ НАПРУГИ

У статті представлено опис побудови і обґрунтування моделі втомного руйнування, що об'єднує такі стадії як освіта і зростання тріщин в елементах суднових конструкцій мають різні концентратори напружень. Представлена для розгляду модель втомного руйнування включає в себе зразок для проведення досліджень багато і малоциклової втоми пошкодженого матеріалу, а також умову, що визначає початковий розмір макротріщини і характеризує перехід від першої стадії втомного руйнування до наступної. Описано процес розвитку накопичення втомних пошкоджень який залежить від граничних умов для місцевого обсягу і, отже, буде контролюватися напруг і деформацій на деякій відстані від вершини концентратора. Описано збільшення значення параметра при збільшенні товщини зразка і збільшення числа циклів до руйнування в зв'язку з переходом на вигляд напружено-деформованого стану в плакуючому шарі у верхній частині зразка від плоского напруженого стану до плоскої деформації. Порівняння розрахункових значень ефективних коефіцієнтів концентрації напружень з експериментальними даними, які приводилися в літературі, показує досить гарне значення (показання) для сталей різних класів. У дослідженнях проведених в даному напрямку важливо встановити напрямок розвитку деформованого стану зразка в якому напрямку воно відбувається уздовж осі концентратора або має назад пропорційну залежність на циклічну тріщиностійкість. Також важливо визначити модульне значення амплітуди напруг, в яких межах воно досягає величини межі втоми і при яких значеннях інтенсивності напружень.

При розгляді підвищення значення параметра зі збільшенням товщини зразка і зростанням числа циклів до руйнування, необхідно пояснити перехід виду напружено-деформованого стану в підповерхневих шарах в вершині концентратора від плоского напруженого стану до плоскої деформації. При цьому необхідно виявити послідовність процесу об'ємного руйнування по лінії сплавлення околешовної зони, а також всіх інших зон

шва і визначити чи супроводжується процес збільшенням втоми поза зоною руйнування, і зростанням тріщини в основному металі зварного з'єднання.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, втомне руйнування, мікро- і макропластичні деформації, зварний шов, дефекти, тріщиностійкість.

Kovalenko I. V.

ROUTE OF THE PROCESS OF FATIGUE FAILURE OF THE ELEMENTS AND COMPONENTS OF MARINE AUXILIARY MACHINERY AND STRUCTURES IN THE EVENT OF VARIOUS STRESS RAISERS

The article presents the description of construction and substantiation of the model of fatigue fracture, combining such stages as the formation and growth of cracks in the elements of ship structures with different stress concentrators. Submitted for consideration to model fatigue damage includes a sample for research a lot and low cycle fatigue damaged material, as well as the condition that determines the initial size of the macrocrack and characterizing the transition from the first stage of the fatigue damage to the subsequent. The results of studies of the development of fatigue damage and macrocrack formation of the hub, show that the initial size of the formed macro-consistent with the value of the parameter. The development process of fatigue damage accumulation depends on the boundary conditions for the local volume and, consequently, will be controlled by the stresses and strains at a distance from the top of the hub. The increase in parameter value with increasing thickness of the sample and the increase in the number of cycles to failure is due to the transition of the view of stress-strain state in subsurface layers in the top of the hub from the flat stress state to plane strain. Comparison of calculated values of effective coefficient of stress concentration with experimental data reported in the literature, shows a sufficiently good agreement for steels of different classes. In studies conducted in this direction, it is important to establish the direction of development of the deformed state of the sample in which direction it occurs along the axis of the concentrator or has an inversely proportional relationship to cyclic crack resistance. It is also important to determine the modular value of the stress amplitude, within which limits it reaches the fatigue limit value and at what values of the stress intensity. When considering increasing the parameter value with increasing sample thickness and increasing the number of cycles before fracture, it is necessary to explain the transition of the stress-strain state in the subsurface layers at the top of the concentrator from the flat stress state to the plane strain

It is necessary to identify the sequence of the process of volumetric destruction along the fusion line of the heat-affected zone, as well as all other weld zones, and determine whether the process is accompanied by an increase in fatigue outside the zone of fracture, and the crack growth in the base metal of the welded joint.

Keywords: computer modeling, fatigue damage, micro and microplasticity deformation, weld defects, crack resistance.

Рецензент: канд. техн. наук, доц. АМИ НУ «ОМА» Берестовой И. О.

Статья поступила 04.11.2018 р.