

- heat treatment]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 239 p. (Rus.)
8. Vasilev A.C., Tsarevskiy V.V. Vysokointensivnyiy induktsionnyiy nagrev [High-intensity induction heating]. *Elektrichestvo – Electricity*, 2001, no. 12, pp. 37-43. (Rus.)
  9. Babey Yu.I., Butakov B.I., Syisoev V.G. *Poverhnostnoye uprochnenie metallov* [Surface hardening of metals]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1995. 256 p. (Rus.)
  10. Bindin V.M., Dobrovolskaya V.I., Ratnikov D.G. *Indukcionniy nagrev pri proizvodstve osobo chistih materialov* [Induction heating for the production of extremely pure materials]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1980. 65 p. (Rus.)
  11. Kassov V.D., Zhartovskiy A.V., Belozertsev A.N. Teplotekhnicheskiiy raschet induktorov dlya nagreva peremeschayuschih tsi-lindricheskikh zagotovok [Thermotechnical calculation of inductors for heating of moving cylindrical billets]. *Vestnik Donbasskoy gosudarstvennoy mashinostroitel'noy akademii – Herald of DSEA*, 2007, no. 2E (10), pp. 99-105. (Rus.)
  12. Lyikov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of heat conduction]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1967. 599 p. (Rus.)
  13. Yanke E., Emde F., Lyosh F. *Spetsialnyie funktsii* [Special functions]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 344 p. (Rus.)

Рецензент: С.С. Самогугин  
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 18.04.2017

УДК 669.045:669.046.581.2

© Чигарев В.В.<sup>1</sup>, Коваленко И.В.<sup>2</sup>

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ И ДЕТАЛЕЙ, СУДОВЫХ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ И КОНСТРУКЦИЙ 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.

**Чигарев В.В., Коваленко И.В. Дослідження процесу втомного руйнування елементів та деталей судових допоміжних механізмів та конструкцій при виникненні різних концентраторів напружень. У статті представлено опис побудови і обґрунтування моделі втомного руйнування, що об'єднує такі стадії, як утворення й зростання тріщин в елементах судових конструкцій, що 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.**

<sup>1</sup> д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, [chigarew@pstu.edu](mailto:chigarew@pstu.edu)

<sup>2</sup> канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Азовский морской институт», г. Мариуполь, [oksykov19@gmail.com](mailto:oksykov19@gmail.com)

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

**V.V. Chigarev, I.V. Kovalenko. Research of fatigue failure of marine auxiliary machine parts and structures in case of various stresses.** The article presents the description of construction and substantiation of the fatigue failure model, combining such stages as the formation and growth of cracks in the ship structures parts with different stress concentrators. Submitted for consideration the fatigue damage model includes a sample for research of multi- and low cycle fatigue of damaged material, as well as the condition determining the initial size of the microcrack and characterizing the transition from the first stage of the fatigue damage to the subsequent one. The results of studies of the fatigue damage development and microcrack formation have been shown. The development of fatigue damage accumulation depends on the boundary conditions for the local volume and, consequently, will be controlled by the stresses and strains at some distance from the top of the concentrator. The increase in parameter value with increasing thickness of the sample and the increase in the number of cycles leading to failure is due to the transition of stress-strain state in subsurface layers of the sample from the flat stress state to plane strain state. Comparison between the calculated values of stress concentration effective coefficient and experimental data reported in the literature, shows a sufficiently good agreement for steels of different classes.

**Keywords:** computer modeling, fatigue damage, microcrack, deformation, weld defects, crack resistance.

**Постановка проблеми.** Постоянное повышение требований к качеству изготовления узлов судовых конструкций, выполнению их ремонтов с применением сварки биметаллов обуславливает 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 нефтехимической промышленности. Имеется информация по определению свойств коррозионного износа и значения 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.

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 [6], к которым относятся дефекты сварных швов, используется интегральная формулировка критерия разрушения:

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

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  $\Delta K_{th}$ . С учетом поправки Дж.Р. Ирвина на перераспределение напряжений в вершине трещины в результате пластического деформирования выражение для параметра принимает вид:

$$d = [(\Delta K_{th} / (1-r)\sigma_{0,2})^2 + (\Delta K_{th} / 2\sigma_r)^2] / 2\pi.$$

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:  $k_\sigma = \Delta\sigma_d / \Delta\sigma_n$ , где  $\Delta\sigma_n$  – размах номинальных напряжений. В таблице представлено сравнение расчетных значений параметра с данными экспериментов, приведенных в литературных источниках.

Таблица

Сравнение экспериментальных и расчетных значений параметра

Материал основного слоя	S, мм	$\sigma_{0,2}$ , МПа	D эксперим., мм		$\sigma_r$ , МПа		$\Delta K_{th}$	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

$S$  – площадь трещины после цикла нагружений;  $D$  – диаметр концентратора напряжений после цикла нагружений;  $r = -1$  и  $r = 1$  – величины асимметрии циклов нагружения.

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 представлено сравнение экспериментальных данных с расчетной кривой на пределе усталости в зависимости от радиуса кругового отверстия в плоских образцах из стали 10X13 [9].

Усталостное разрушение в объемах, превышающих критические значения, после образования макронесплошности сопровождается одновременно развитием двух процессов – усталость вне зоны разрушения и рост трещины в поврежденном материале [10].

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].

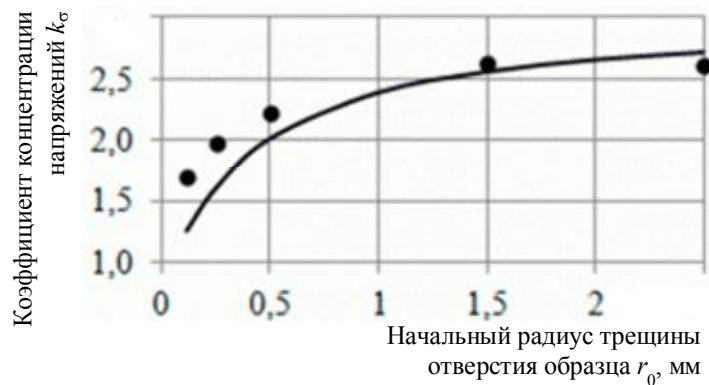


Рис. 1 – График зависимости коэффициента концентрации напряжения от радиуса отверстия образца

Дискретное приращение длины трещины на величину, влияющую на динамику ее дальнейшего развития после циклов нагружения, приводит в области вершины трещины к достижению критерия локального разрушения, принимающего вид:  $\theta(\zeta_*, n_*) = \theta_*$ , где  $\theta(\zeta_*, n_*) = \theta_V + \theta_0^p(\zeta_*) + \theta^p(\zeta_*, n_*)$ ,  $\theta_V$  – 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 развития процесса [9]. 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 по оценке прочностных характеристик сварного соединения при малоциклового усталости [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). Принятая форма образца позволяет получить протяженную зону циклических пластических деформаций, что облегчает наблюдение за процессом развития усталостного разрушения [11, 12]. Параметры НДС в вершине концентратора рассчитывались с использованием численной процедуры МКЭ.

На рисунке 3 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.

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.

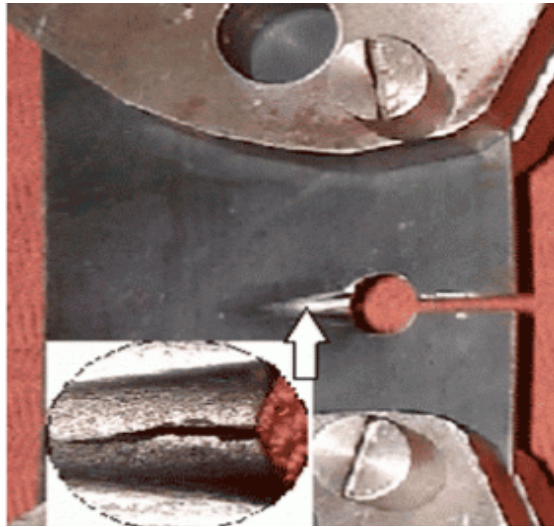


Рис. 2 – Общий вид образца для проведения исследований

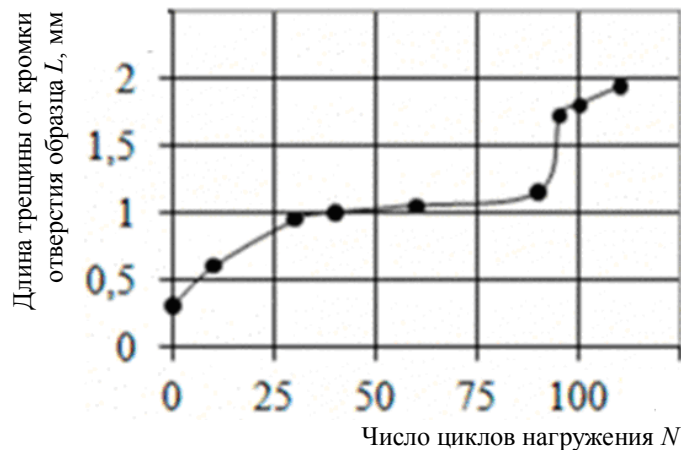


Рис. 3 – Циклограмма процесса развития и разрушения образца

### Выводы

Представлено, что описываемые авторами подходы по оценке критериев работоспособности способствуют повышению сопротивляемости распространению усталостных трещин металла околошовной зоны сварного соединения и превышают значения основного металла.

В ходе испытания образцов знакопеременным плоским изгибом установлена линейная зависимость между обратной величиной скорости роста трещины и относительной длиной трещины. В линейной зависимости от уровня продольных напряжений находится и обратная величина ускорения развития трещины.

### Список использованных источников:

1. Панасюк В.В. Застосування методів механіки руйнування матеріалів для поцінування міцності зварних з'єднань / В.В. Панасюк // Автоматическая сварка. – 2008. – № 11. – С. 151-156 с.
2. Махненко В.И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций / В.И. Махненко. – К. : Наукова думка, 2006. – 618 с.
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. – 258 с.
5. Мовчан Б.А. Микроскопическая неоднородность в литых сплавах / Б.А. Мовчан. – К. : 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 // Автоматическая сварка. – 1981. – № 11. – С. 1-11.
7. Недосека А.Я. Основы расчета сварных конструкций / А.Я. Недосека. – К. : 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. : Высшая школа, 1982. – 270 с.
9. Стефанов Ю.П. Рост трещины вблизи границы раздела разнородных материалов в условиях сжатия / Ю.П. Стефанов [и др.] // Физическая 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. – К. : Гостехиздат УССР, 1968. – 230 с.
12. Коваленко І.В. Вдосконалення технології дугового зварювання двошарових сталей при виготовленні промислових металоконструкцій : дис. ...канд. техн. наук : 05.03.06 : захищена 08.12.13; затв. 12.12.13 / Коваленко Іван Васильович. – Маріуполь, 2013. – 146 с. – № 128863.

#### References:

1. Panasyuk V.V. Zastosuvannia metodiv mehaniki ruinuvania materialiv zvarnich zednan [Application of methods of fracture mechanics of materials to assess the strength of welded joints]. *Avtomatičeskaya svarka – Automatic welding*, 2008, no. 11, pp. 151-156. (Ukr.)
2. Makhnenko V.I. *Resurs bezopasnoi ekspluatatsii svarnich soedinenii i uzlov sovremenich konstrukcii* [Resource of safe service of welded joints and units of modern structures]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 2006. 618 p. (Rus.)
3. Paton B.E., Medovar L.B., Saenko V.E. Novye vozmozhnosti avtomatičeskoi svarki v mashinostroyenii [New possibilities of automatic welding in mechanical engineering]. *Metallurgiya mashinostroyeniya – Metallurgy of Machinery Building*, 2003, no. 1, pp. 2-5. (Rus.)
4. Medovar B.I. *Svarka chromonikelevich austenitnich staley* [Welding austenitic chromium-nickel steels]. Moscow, Mashgiz Publ., 1958. 258 p. (Rus.)
5. Movchan B.A. *Mikroskopicheskay neodnorodnost v litych splavach* [Microscopic heterogeneity in cast alloys]. Kiev, Gostehizdat of the USSR Publ., 1968. 230 p. (Rus.)
6. Kasatkin B.I., Brednev V.I., Volkov V.V. Methodica isledovaniy kinetiki deformacii pri razrushenii [Methodology of the study of the kinetics of de-formations in the slow motion destruction]. *Avtomatičeskaya svarka – Automatic welding*, 1981, no. 11, pp. 1-11. (Rus.)
7. Nedoseka A.Y. *Osnovi rascheta svarnich konstrukciy* [The basis of calculation of welded structures]. Kiev, Vyscha shcola Publ., 1988. 263 p. (Rus.)
8. Nikolaev G.A., Kurkin S.A., Vinokurov V.A. *Svarnie konstrukcii. Prochnost svarnich soedineniy i deformaciy konstrukciy* [Welded construction. Strength of welded joints and deformation of structures]. Moscow, Higher school Publ., 1982. 270 p. (Rus.)
9. Stefanov Y.P., Pobol I.L., Knyazeva A.G. Rost treshin blizi granici razdela raznich materialov [The growth of cracks near the interface of heterogeneous materials under compression]. *Fizicheskaya mezomekhanika – Physical Mesomechanics*, 2002, no. 1, pp. 81-88. (Rus.)
10. Zemzin V.N. *Svarniye soedineniy raznorodnich staley* [Welded joints of dissimilar steels]. Leningrad, Engineering Publ., 1966. 190 p. (Rus.)
11. Movchan B.A. *Mikroskopicheskay neodnorodnost v litich splavach* [Microscopic heterogeneity in cast alloys]. Kiev, Gostehizdat of the USSR Publ., 1968. 230 p. (Rus.)
12. Kovalenko I.V. *Vdoskonalennia tekhnologii dugovogo zvariuvannia dvoшarovikh staley pri vigo-tovlenni promislovikh metalokonstruktсии*. Diss. cand. techn. nauk [Improvement of technology of arc welding of bimetallic steels in the manufacture of industrial steel structures. Cand. tech. sci. diss.]. Mariupol, 2013. 146 p. (Ukr.)

Рецензент: В.И. Щетинина  
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 28.04.2017