ИССЛЕДОВАНИЕ МАЛОЦИКЛОВОЙ КОРРОЗИОННОЙ УСТАЛОСТИ СТАЛИ

INVESTIGATION OF LOW-CYCLE CORROSION FATIGUE OF STEEL

К. Д. Гиндуллина
Karina D. Gindullina

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

О. А. Насибуллина
Oksana A. Nasibullina

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

В настоящее время снижение металлоемкости металлоконструкций, а также обеспечение надежности при их эксплуатации является важной задачей. Одной из причин разрушения нефтегазопроводов, аппаратов нефтепереработки, металлоконструкций и резервуаров является наличие дефектов в металле. Наиболее опасными из дефектов являются трещины, представляющие собой концентраторы напряжений. Данный дефект в процессе эксплуатации может стать основной причиной разрушения как хрупких, так и пластичных материалов при приложении циклических нагрузок. Помимо нагрузок на металл также оказывают воздействие и рабочие среды, в совокупном действии они могут изменять свойства материала: твердость, величину электродного потенциала, прочность, пластичность и поверхностную энергию. Таким образом, возникает коррозионная усталость металлоконструкции. Процесс постепенного накопления повреждений в материале под действием коррозионной среды и повторяющихся нагрузок, приводящих к разрушению, называется коррозионной усталостью.

Целью исследования является изучение малоциклового коррозионной усталости стали на примере стали марки СтЗсп.

Для реализации поставленной цели в работе решались следующие задачи:

1. проводилось исследование кинетики развития трещины в условиях малоциклового нагружения металлоконструкции, изготовленной из углеродистой конструкционной стали СтЗсп;
2. использовался регрессионный анализ для прогнозирования изменения термодинамической устойчивости металла в процессе циклического нагружения.

Был проведен анализ развития усталостной трещины при знакопеременном цикле нагружения. Результаты расчетов на основе предложенной модели упругопластического деформирования вблизи вершины трещины при знакопеременном цикле нагружения можно описать нелинейной зависимостью. При этом в результате проведенного регрессионного анализа выявлено, что коэффициент корреляции подобранной модели равен $-0,93$, что указывает на относительно сильную связь между переменными. В работе экспериментальным путем доказано, что снижение термодинамической устойчивости металла в коррозионной среде связано с повышением количества циклов нагружения, которое ведет к накоплению усталостных повреждений.

Ключевые слова

малоцикловая коррозионная усталость металла; количество циклов нагружения; концентратор напряжений; долговечность; трещина; деформация; регрессионный анализ; механохимическая коррозия

Currently, reducing the metal consumption of metal structures, as well as ensuring reliability during their operation, is an important task. One of the reasons for the destruction of oil and gas pipelines, oil refining apparatus, metal structures and tanks is the presence of defects in the metal. The most dangerous defects are cracks, which are stress concentrators. This defect during operation can be the main cause of the destruction of both brittle and plastic materials when cyclic loads are applied. In addition to metal loads, working media also affect, and in aggregate they can change the properties of the material: hardness, electrode potential value, strength, plasticity and surface energy. Thus, corrosion fatigue of the metal structure occurs. The process of the gradual accumulation of damage in a material under the influence of a corrosive medium and repeated loads leading to destruction is called corrosion fatigue.

The aim of the study is to study low-cycle corrosion fatigue of steel using the example of steel grade St3sp.

To achieve this aim, the following tasks were solved:

1. Analysis of kinetics of crack development in conditions of low-cycle loading of metal structure made of carbon structural steel St3sp was carried out;

2. Regression analysis was used to predict a change in the thermodynamic stability of the metal during cyclic loading.

Analysis of fatigue crack development at alternating loading cycle was carried out. The calculation results based on the proposed model of elastoplastic deformation near the crack tip during an alternating loading cycle can be described by a nonlinear dependence. The regression analysis revealed that the correlation coefficient of the selected model is -0.93 , which indicates a relatively strong relationship between the variables. In experimental way it has been proved that reduction of thermodynamic stability of metal in corrosive medium is connected with increase of number of loading cycles, which leads to accumulation of fatigue damages.

В работе представлены результаты усталостных испытаний на образце конструкционной углеродистой стали марки Ст3сп на воздухе, при этом на металле имелся V-образный надрез. Испытание проводится на плоском образце размером $462 \times 39 \times 10$ мм. Образец испытывался по схеме чистого изгиба, по симметричному циклу нагружения с частотой 31,5 цикла в минуту.

Деформация на образце создавалась усталостной машиной (рисунок 1) по схеме чистого изгиба при отнулевом цикле нагружения, наиболее полно отражающем условия работы металла труб вблизи концентраторов напряжений (сварные соединения [5–7]). Амплитуда деформации была задана 0,10 %. Величина деформации образцов определялась с помощью рычажного деформометра Гугенбергера. Выбор указанного уровня деформации связан с наличием концентраторов напряжений на поверхности трубопроводов [1, 8–10] (вмятины, царапины, риски и др.), в которых наблюдается высокая механохимическая активность, превышающих предел текучести.

Испытание проводились на воздухе на образце из дефектной зоны с V-образным надрезом.

Key words

low-cycle corrosion fatigue of metal;
number of loading cycles;
stress concentrator; durability;
crack; deformation;
regression analysis;
mechanochemical corrosion

Рисунок 1. Усталостная машина МЦ-19

Замер длины растущей трещины производился в момент максимального раскрытия ее кромок в верхнем положении усталостной машины. Для определения величины растущей трещины использовался микроскоп МБС-9 с двукратным увеличением.

Перед установкой образца на усталостную машину была произведена подготовка образца к испытанию: боковая сторона металла тщательно полировалась для лучшей фиксации растущей трещины. В захваты машины, находящиеся в нейтральном положении, уста-

навливался испытуемый образец стали марки Ст3сп.

Для обнаружения трещины усталостная машина останавливалась, далее устанавливался микроскоп и осматривалась боковая поверхность образца. До образования трещины машина останавливалась через каждые 315 циклов. После зарождения трещины замеры длины усталостной трещины проводились через каждые 16–30 циклов. По мере приближения трещины к критическому размеру интервалы сокращались до 16 циклов.

Число циклов до разрушения образца с V-образным надрезом составило 7674 цикла при испытании образца на воздухе. Вид зародившейся трещины представлен на рисунке 2.

В результате проведенного эксперимента на образце стали с V-образным надрезом получаем графические зависимости, представленные на рисунке 3.

Рисунок 2. Вид трещины через 7590 циклов

Рисунок 3. График зависимости длины усталостной трещины L от числа циклов нагружения N при испытании на воздухе

Для прогнозирования изменения термодинамической устойчивости металла в процессе циклического нагружения был проведен регрессионный анализ [2–4] и подобрана модель, адекватно описывающая рост трещины. Регрессионный анализ произведен в среде математической прикладной программы ЭВМ.

Для построения математической модели была проведена оценка вклада циклов нагружения N на рост трещины до разрушения образца. В качестве рабочего инструмента была выбрана процедура множественной регрессии, позволяющая получать модель в виде нелинейной комбинации воздействующих факторов. Исследования проводились с доверительной вероятностью 95 %.

В большинстве случаев в качестве критерия выбора модели используются коэффициенты корреляции, детерминации и ошибки прогнозирования. Модель, имеющая большие значения данных параметров, как правило, считается предпочтительной.

Из всех установленных моделей Reciprocal-Y squared-X дает наибольшее значение коэффициента детерминации – 88,0206 %, поэтому она и выбрана наиболее предпочтительной для данного эксперимента.

В таблице 1 приведены результаты расчета подобранной модели, а на рисунке 4 ее графическое изображение.

Таблица 1. Результаты расчета регрессионной модели вида $Y = \frac{1}{(a+b \cdot X^2)}$

Независимая переменная	Подобранные значения коэффициентов регрессии	Стандартная ошибка	t-критерий Стьюдента	Уровень значимости
a	7,6606	1,21957	6,2814	0,0015
b	-1,26883E-7	2,09336E-8	-6,06122	0,0018

Уравнение регрессии имеет следующий вид:

$$Y = \frac{1}{(7,6606 - 1,26883 \cdot 10^{-7} \cdot X^2)} \quad (1)$$

В результате проведенных исследований можно сделать вывод, что одним из наиболее

сложных и трудно прогнозируемых повреждающих механизмов, воздействию которого подвержено все оборудование, является циклическое нагружение [1, 11, 12].

Рисунок 4. Графическое изображение подобранной модели с доверительными трубками

Выводы

На основании экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния материала в зонах концентрации напряжений материалов, выполненных из стали СтЗсп, при знакопеременном цикле нагружения рост усталостной трещины можно описать функцией:

$$L = \frac{1}{(7,6606 - 1,26883 \cdot 10^{-7} \cdot N^2)}$$

Снижение термодинамической устойчивости металла в коррозионной среде связано с повышением количества циклов нагружения, которые ведут к накоплению усталостных повреждений.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Насибуллина О.А. Введение в основы коррозии. Уфа: Изд-во Нефтегазовое дело, 2019. 83 с.
2. Насибуллина О.А., Гареев А.Г. Разработка метода оценки остаточного ресурса магистральных газопроводов, имеющих дефекты коррозионного происхождения // Нефтегазовое дело. 2016. Т. 14. № 2. С. 174–178.
3. Nasibullina O.A., Gareev A.G., Rizvanov R.G. Investigation of the Hydrogen Stratification of the Metal of the Active Gas Pipeline // Solid State Phenomena. 2018. Vol. 284. P. 1302–1306. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.284.1302.
4. Гареева О.А., Худяков М.А., Климов П.В., Хажиев А.Д. Моделирование коррозионного растрескивания магистральных газопроводов // Проблемы сбора,

подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2010. Вып. 1 (79). С. 87–92.

5. Пат. 161438 РФ, МПК В 23 К 20/12. Машина для сварки трением узла труба-трубная решетка теплообменных аппаратов / Д.Ш. Муликов, Д.В. Каретников, Р.Г. Ризванов, О.В. Четверткова, М.И. Ризванов. 2015 124247/02, Заявлено 22.06.2015; Оpubл. 20.04.2016. Бюл. 11.

6. Ризванов Р.Г., Файрушин А.М., Каретников Д.В. Влияние параметров вибрационной обработки в процессе сварки на свойства сварных соединений // Литье и металлургия. 2012. № 3 (66). С. 337–342.

7. Ризванов Р.Г., Файрушин А.М., Зарипов М.З., Карпов А.Л. Повышение качества изготовления сварных нефтехимических аппаратов применением вибрацион-

ной обработки в процессе сварки // Башкирский химический журнал. 2005. Т. 12. № 1. С. 27–29.

8. Гареев А.Г., Насибуллина О.А., Ибрагимов И.Г. Оценка работоспособности труб, имеющих дефекты коррозионного происхождения // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2016. Вып. 4 (106). С. 126–136.

9. Кудакеев С.М., Аминев Ф.М., Файзуллин С.М., Аскарлов Р.М. Диагностика и ремонт магистральных газопроводов // Газовая промышленность. 2004. № 5. С. 7–9.

10. Фаритов А.Т., Рождественский Ю.Г., Ямщикова С.А., Минниханова Э.Р., Тюсенков А.С. Совершенствование метода линейного поляризационного сопротивления для испытаний ингибиторов коррозии стали // Металлы. 2016. № 6. С. 36–43.

11. Тюсенков А.С. Коррозионная стойкость стали 13ХФА // Сталь. 2016. № 2. С. 53–57.

12. Гареев А.Г. Основы коррозии металлов. Уфа: УГНТУ, 2011. 256 с.

REFERENCES

1. Nasibullina O.A. *Vvedenie v osnovy korrozii* [Introduction to Fundamentals of Corrosion]. Ufa, Neftegazovoe delo Publ., 2019. 83 p. [in Russian].
2. Nasibullina O.A., Gareev A.G. Razrabotka metoda otsenki ostatochnogo resursa magistral'nykh gazoprovodov, imeyushchikh defekty korrozionnogo proiskhozhdeniya [Development of the Method of the Gas Pipeline Residual Service Life Estimation, Having Defects of Corrosion Origin]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2016, Vol. 14, No. 2, pp. 174–178. [in Russian].
3. Nasibullina O.A., Gareev A.G., Rizvanov R.G. Investigation of the Hydrogen Stratification of the Metal of the Active Gas Pipeline. *Solid State Phenomena*, 2018, Vol. 284, pp. 1302–1306. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.284.1302.
4. Gareeva O.A., Khudyakov M.A., Klimov P.V., Khazhiev A.D. Modelirovaniye korrozionnogo rastreskivaniya magistral'nykh gazoprovodov [Modeling of Main Gas Pipeline Corrosion Cracking]. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefiti i nefteproduktov — Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*, 2010, Issue 1 (79), pp. 87–92. [in Russian].

5. Mulikov D.Sh., Karetnikov D.V., Rizvanov R.G., Chetvertkova O.V., Rizvanov M.I. *Mashina dlya svarki treniem uzla truba-trubnaya reshetka teploobmennyykh apparatov* [Friction Welding Machine for Tube-Tube Assembly of Heat Exchangers]. Patent RF, No. 161438, 2016. [in Russian].

6. Rizvanov R.G., Fairushin A.M., Karetnikov D.V. Vliyaniye parametrov vibratsionnoi obrabotki v protsesse svarki na svoystva svarnykh soedinenii [The Influence of Processing Parameters of Vibration during Welding on the Properties of Welded Joints]. *Lit'e i metallurgiya — Litiyo i Metallurgiya (Foundry Production and Metallurgy)*, 2012, No. 3 (66), pp. 337–342. [in Russian].

7. Rizvanov R.G., Fairushin A.M., Zaripov M.Z., Karpov A.L. Povysheniye kachestva izgotovleniya svarnykh neftekhimicheskikh apparatov primeneniem vibratsionnoi obrabotki v protsesse svarki [Improving the Quality of Manufacturing of Petrochemical Welding Machines During Vibration Processing in the Welding Process]. *Bashkirkii khimicheskii zhurnal — Bashkir Chemical Journal*, 2005, Vol. 12, No. 1, pp. 27–29. [in Russian].

8. Gareev A.G., Nasibullina O.A., Ibragimov I.G. Otsenka rabotosposobnosti trub, imeyushchikh defekty korrozionnogo proiskhozhdeniya [Evaluation of the Performance of Pipes with Corrosion Defects]. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefiti i nefteproduktov — Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*, 2016, Issue 4 (106), pp. 126–136. [in Russian].

9. Kudakaev S.M., Aminev F.M., Faizullin S.M., Askarov R.M. Diagnostika i remont magistral'nykh gazoprovodov [Diagnostics and Repair of Gas Mains]. *Gazovaya promyshlennost' — Gas Industry of Russia*, 2004, No. 5, pp. 7–9. [in Russian].

10. Faritov A.T., Rozhdestvenskii Yu.G., Yamshchikova S.A., Minnikhanova E.R., Tyusenkov A.S. Sovershenstvovaniye metoda lineinogo polyarizatsionnogo soprotivleniya dlya ispytaniy ingibitorov korrozii stali [Improving the Linear Polarization Resistance Method for Testing Steel Corrosion Inhibitors]. *Metally — Metally*, 2016, No. 6, pp. 36–43. [in Russian].

11. Tyusenkov A.S. Korroziionnaya stoikost' stali 13KhFA [Corrosion Resistance of Steel 13HFA]. *Stal' — Steel*, 2016, No. 2, pp. 53–57. [in Russian].

12. Gareev A.G. *Osnovy korrozii metallov* [The Basics of Metal Corrosion]. Ufa, UGNTU Publ., 2011. 256 p. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ ABOUT THE AUTHORS

Гиндуллина Карина Дамировна, магистрант кафедры «Технология нефтяного аппаратостроения», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Karina D. Gindullina, Under-graduate Student of Oil Processing Equipment Technology Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: gindullina_k@mail.ru

Насибуллина Оксана Алексеевна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Технология нефтяного аппаратостроения», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Oksana A. Nasibullina, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Assistant Professor of Oil Processing Equipment Technology Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: ksu33@bk.ru