

УДК 538.9, 620.179.1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ИНКУБАЦИОННОГО ПЕРИОДА КОРРОЗИОННОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ МАЛОУГЛЕРОДИСТЫХ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ ВИХРЕТОКОВЫМ МЕТОДОМ

© Елена Николаевна Бутусова^{1,2}, Василий Васильевич Мишакин¹

¹Институт проблем машиностроения РАН – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПМ РАН), Нижний Новгород, Россия

²ООО СК «АЭРОХОД», Нижний Новгород, Россия

anelka13@yandex.ru, imndt31@mts-nn.ru

Аннотация. В работе приведены результаты исследования процессов коррозионного растрескивания под напряжением (КРН) малоуглеродистых низколегированных сталей с помощью вихретокового метода. Приведены зависимости времени инкубационного периода КРН от величины предела макроупругости (σ_0). Отмечено, что повышение значения σ_0 приводит к увеличению времени до образования первой трещины. Это может быть объяснено с тем, что предел макроупругости определяет начало микропластического течения в материале, активно влияющего на процесс коррозионного растрескивания под напряжением. На основании экспериментальных данных получена аналитическая зависимость времени инкубационного периода КРН от величины предела макроупругости. Погрешность расчетов не превысила 10%. Предложена аналитическая зависимость оценки состояния материала, подверженного КРН. Она позволяет по данным вихретоковых измерений зафиксировать прохождение стадий накопления микроповреждений до появления трещин длиной порядка нескольких размеров зерен исследуемой стали.

Ключевые слова: малоуглеродистая сталь, КРН, вихретоковый метод, трещина, предел макроупругости, время инкубационного периода.

Работа проведена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по проекту RFMEFI58017X0012.

DETERMINATION OF INCUBATION PERIOD OF CORROSION STRESS CRACKING OF LOW-CARBON LOW-ALLOY STEEL EDDY-CURRENT METHOD

© Ye. N. Butusova^{1,2}, V. V. Mishakin¹

¹Mechanical Engineering Research Institute of RAS, Nizhny Novgorod, Russia

²Shipbuilding company AEROHOD Ltd., Nizhny Novgorod, Russia

anelka13@yandex.ru, imndt31@mts-nn.ru

Abstract. *There are the results of a study of the stress corrosion cracking (SCC) processes of low-carbon low-alloy steels using eddy current method in this paper. The dependence of the incubation time on the value of the macroelasticity limit (σ_0) has been established. It is noted that the increase in the value of σ_0 leads to an increase in the time needed to initiate the first crack. This can be explained as follows: the limit of macroelasticity determines the beginning of microplastic flow in the material, actively affecting the process of stress corrosion cracking. On the basis of experimental data, the analytical dependence of the incubation period of the SCC on the value of the macroelasticity limit is obtained. The error of calculations did not exceed 15%.*

The analytical formula allowing to determine the incubational period of the material subject to SCC by means of eddy current measurements is proposed. It allows according to eddy current measurements to record the passage of the stages of accumulation of micro-damages before the appearance of macrocracks.

Keywords: *low-carbon steel, SCC, eddy current method, crack, macroelasticity limit, incubation period.*

Acknowledgements. *This research was carried out with financial support from the Ministry of education and science of the Russian Federation under the project RFMEFI58017X0012.*

Введение. Система трубопроводов России – уникальный, постоянно увеличивающийся объект, представляющий собой сеть, состоящую из сложных технических объектов, осуществляющую транспортировку нефти и газа под высоким давлением в сложных климатических условиях.

Постоянно растущая сеть требует высоких капиталовложений, связанных как с введением новых объектов, заменой поврежденных участков, так и с устранением последствий катастроф, обусловленных внезапным выходом из строя конструкций. В связи с этим, разработка средств мониторинга и предупреждения аварий является важной научно-технической задачей.

Более половины всех аварий на магистральных трубопроводах происходит вследствие коррозии и стресс-коррозии [1-7], независимо от страны-изготовителя труб [8, 6]. При этом динамика изменения количества выявленных стресс-коррозионных дефектов указывает на непреклонный рост числа дефектов данного типа. При этом подобного типа повреждения наблюдаются также и в других областях, где конструкции подвергаются одновременному воздействию коррозионной среды и растягивающих статических напряжений, включая автомобиле-, судо-, мостостроение и т.п.

Из-за опасности дефектов типа КРН их обнаружение на ранней стадии имеет первостепенную важность для обеспечения надежной и безопасной эксплуатации металлических конструкций. Кроме того, своевременное проведение мероприятий по ремонту и/или замене участков, близких к разрушению, позволит не только снизить затраты на материалы и работы, уменьшить убытки, связанные с простоями, потерями углеводородов, но и сохранить экологическую обстановку.

В тоже время, не всегда имеется возможность останавливать работу системы. В связи с этим, разработка методов диагностики процессов коррозионного растрескивания под напряжением в процессе эксплуатации на основе методов неразрушающего контроля является важной научно-технической задачей и целью выполнения данной работы.

Одним из методов неразрушающего контроля, который может быть применен при исследовании металлических объектов, является вихретоковый метод, обладающий высокой чувствительностью к микроскопическим дефектам, глубиной нахождения до 3 мм [9].

Данный метод исследования может быть применен не только на отдельных образцах материала, но и на конструкции в целом. Важно также отметить, что электромагнитный метод исследований позволяет производить контроль изделия через немагнитные покрытия, включая окисную плёнку, что является особенно актуальным при исследовании непосредственно на объекте.

Объекты и методики исследований. В качестве объектов исследования были выбраны малоуглеродистые низколегированные стали, химический состав которых соответствует марке 10Г2ФБЮ (табл. 1).

В табл. 2 приведены основные механические характеристики исследованных материалов. Испытания были выполнены согласно [10].

Таблица 1

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ИССЛЕДОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Элемент № образца	C, вес. %	Mn, вес. %	Si, вес. %	Ti, вес. %	Nb, вес. %	V, вес. %
1	0.098	1.59	0.44	0.020	0.051	0.003
2	0.099	1.61	0.43	0.019	0.052	0.003
3	0.100	1.58	0.44	0.015	0.051	0.003
4	0.097	1.63	0.45	0.017	0.053	0.003

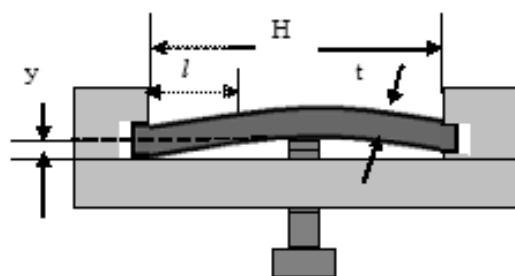
Таблица 2

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИССЛЕДОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Свойства № образца	Стандартные механические свойства			Результаты релаксационных испытаний	
	σ_B , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ , %	σ_0 , МПа	σ_T , МПа
1	640	510	22,5	310	530
2	670	590	20,5	275	600
3	680	560	22,5	245	570
4	650	560	20,0	210	570
Требования ГОСТ 20295- 85 к К60 (Х70)	≥ 588	≥ 412	≥ 16		

Из приведенных в табл. 1 и 2 данных следует, что выбранные объекты исследования имеют близкие значения предела прочности (σ_B), условного и физического пределов текучести ($\sigma_{0.2}$ и σ_T), а также относительного удлинения δ . При этом все выбранные стали соответствуют нормативно-технической документации и могут быть отнесены к классу прочности К60 (Х70) [11]. В тоже же время, исследованные образцы имели различные величины пределов макроупругости (σ_0), определенные с помощью методики испытания на релаксацию [12].

Испытания на коррозионное растрескивание под напряжением проводилось в кипящем растворе нитратов $57\%Ca(NO_3)_2+6\%NH_4NO_3+37\%H_2O$ [13]. Образец в струбцине представлен на рис. 1.



а



б

Рис. 1. Изображение образца под нагрузкой: а – схематическое; б – вид сверху. Кругом отмечено положение вихретокового датчика

В процессе испытаний нагруженные образцы вынимались из раствора, промывались, механически удалялся окисный слой, и проводились измерения с помощью вихретокового дефектоскопа ВД-70 на частоте 150 Гц в зонах соответствующих $l = 20, 25, 30, 35, 40$ и 45 мм от точки закрепления (рис. 1). Вихретоковый параметр ΔP пропорционален сдвигу фаз измеряемого и опорного напряжений накладного преобразователя $\Delta P \sim \Delta \varphi$.

Номинальное напряжение на поверхности образца при его нагружении в упругой области по схеме «трехточечный изгиб» определяется как:

$$\sigma_{ном} = \frac{6 \cdot E \cdot t \cdot y}{H^2}, \quad (1)$$

где E – модуль упругости стали (210 ГПа); y – стрела прогиба; t – толщина образца (2 мм); H – расстояние между точками закрепления (60 мм).

При переходе материала в зону появления остаточной пластической деформации, исходя из уравнения Холомона $\sigma = C\varepsilon^n$ и предполагая что $\varepsilon \sim y$, получаем напряжение σ_{eff} :

$$\sigma_{eff} = \sigma_0 \left(\frac{y}{y_0} \right)^n, \quad (2)$$

где σ_0 – предел макроупругости материала, определенный с помощью методики релаксационных испытаний; y – текущее значение стрелы прогиба (25.7 мм для всех испытанных образцов), y_0 – величина стрелы прогиба при нагружении до σ_0 ; n – показатель деформационного упрочнения. Показатель деформационного упрочнения для сталей 1, 2, 3 и 4 серий составили 0.18, 0.2, 0.22 и 0.25, соответственно.

В процессе испытаний измерялись величина ΔP , фиксировались критические времена КРН – $\tau_{инк}$ – время окончания инкубационного периода КРН (микротрещины размером 50 мкм) и время образования макротрещины размером 5 мм (τ^*).

Результаты исследований. Величина деформации, соответствующая выбранной стреле прогиба при заданном номинальном напряжении, состоит из пластической и упругой части. Соотношение между данными составляющими в большой степени определяется

релаксационной способностью материала, одной из характеристик которой является σ_0 . Влияние релаксационных характеристик материала на его разрушение при коррозионном растрескивании под напряжением было обосновано в работах [14-16].

В ходе выполнения исследования было определено $\tau_{инк}$ для выбранных сталей и построена зависимость $\tau_{инк} - \sigma_0$ (рис. 2. Кривая 1).

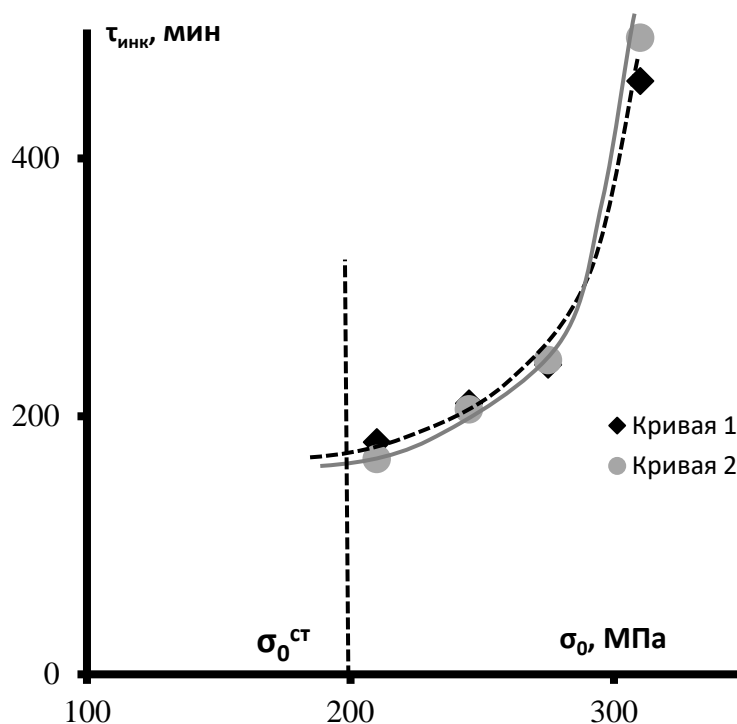


Рис. 2. Зависимость времени окончания инкубационного периода КРН от величины предела макроупругости.

Как видно из Кривой 1, представленной на рис. 2, возрастание σ_0 приводит к нелинейному увеличению $\tau_{инк}$, что также было отмечено в [17]. Это связано с тем, что предел макроупругости определяет начало микропластического течения в материале. При одинаковых номинальных напряжениях увеличение σ_0 приводит к снижению величины микропластических деформации, действующих в материале.

Полученная экспериментальная зависимость для данного вида и диапазона напряжений σ_{eff} от 410 МПа до 465 МПа хорошо аппроксимируется следующим выражением (рис.2, кривая 2):

$$\tau_{инк} = \tau_{инк}^{\min} + k_1 \cdot (\sigma_0 - \sigma_0^{cmp}) + k_2 / (\sigma_0^{nop} - \sigma_0), \quad (4)$$

где $\tau_{инк}^{\min}$ – минимальное время инкубационного периода КРН; σ_0^{cmp} – напряжение, соответствующее минимальному времени инкубационного периода КРН; σ_0^{nop} – пороговое значение предела макроупругости, $\sigma_0^{nop} = 313$ МПа; k_1, k_2 – коэффициенты ($k_1 = 1$ мин/МПа,

$k_2 = 700 \text{ мин} \cdot \text{МПа}$); $\sigma_0^{\text{экр}}$ – предел макроупругости, соответствующий определенному времени эксплуатации.

Минимальное время разрушения $\tau_{\text{инк}}^{\text{мин}}$ определялось аппроксимацией кривой $\tau_{\text{инк}}(\sigma_0)$, построенной по первой, третьей и четвертой точкам (образцы 1, 3 и 4), до пересечения вертикальной линии, соответствующей напряжению $\sigma_0^{\text{ср}} = 200 \text{ МПа}$ [9] ($\tau_{\text{инк}}^{\text{мин}} \approx 150 \text{ мин}$).

Напряжение $\sigma_0^{\text{ср}}$ рассчитывалось согласно [15, 18-20] с учетом изменения упрочнения исследуемого металла в процессе выхода углерода из твердого раствора на границы зерен. Оно соответствует максимальной микропластической деформации при данных условиях нагружения в выбранном материале. Коэффициенты k_1 , k_2 и величина $\sigma_0^{\text{нор}}$ определялись из условия минимального среднеквадратического отклонения экспериментальной кривой от расчетной. Полученные коэффициенты использовались для прогнозирования $\tau_{\text{инк}}$ второго образца по данным измерения σ_0 . Отклонение расчетного значения $\tau_{\text{инк}}$ от экспериментального для второго образца не превысило 5%. В целом, отклонение расчетных значений $\tau_{\text{инк}}$ от экспериментальных не превысило 10%.

На рис. 3 представлены зависимости вихретокового параметра, соответствующие критическим значениям времени испытаний на КРН.

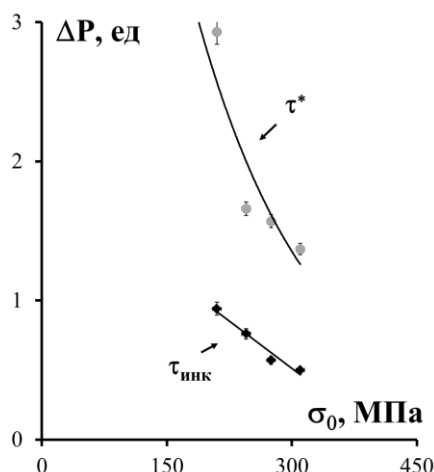


Рис. 3. Зависимость показаний вихретокового прибора от предела макроупругости

Аппроксимируя представленную на рис. 3 зависимость $\Delta P - \sigma_0$ для $\tau_{\text{инк}}$ и подставляя полученное выражение в (4), получаем возможность прогноза времени окончания инкубационного периода по показаниям ВТД:

$$\tau_{\text{инк}} = \tau_{\text{инк}}^{\text{мин}} - k_3 \cdot (\Delta P + 1) + k_4 / (\Delta P - 0.39), \quad (5)$$

где k_3 , k_4 – коэффициенты, ($k_3 = 30 \text{ мин}$, $k_4 = 40 \text{ мин}$); ΔP – вихретоковый параметр.

На рис. 4 приведены зависимости $\tau_{\text{инк}} - \Delta P$, выявленные в ходе проведения испытаний (кривая «Эксперимент») и полученные в результате вычислений согласно (5) (кривая «Расчет»).

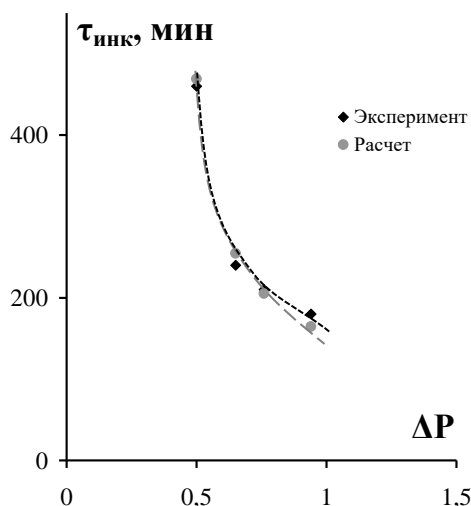


Рис. 4. Зависимость времени окончания инкубационного периода КРН от вихретокового параметра

Как видно из представленных на рис. 4 данных, расчет времени инкубационного периода КРН, выполненный через показания вихретокового датчика, с высокой точностью соответствует найденным в процессе исследований значениям. Погрешность расчетов не превысила 10%.

Заключение. В ходе выполнения работ были проведены КРН испытания на сталях, близких по химическому составу и стандартным механическим свойствам. Выбранные объекты исследования по химическому составу соответствуют отечественной марке стали 10ГФБЮ, по механическим характеристикам – классу прочности К60.

Получена аналитическая зависимость времени инкубационного периода КРН от величины предела макроупругости. Отмечено, что возрастание значения предела макроупругости приводит к увеличению длительности инкубационного периода. Это можно объяснить тем, что предел макроупругости определяет начало микропластического течения в материале активно влияющего на коррозионное растрескивание.

Предложена аналитическая зависимость для оценки состояния материала подверженного КРН, позволяющий по данным вихретоковых измерений предсказывать момент зарождения микротрещин длиной порядка размера нескольких зерен.

Список литературы

1. Альбом аварийных разрушений на объектах линейной части магистральных газопроводов ООО «Севергазпром», 1982-2002. Ухта, 2002.
2. Красных Б.А., Мартынюк В.Ф., Сергиенко Т.С., Сорокин А.А., Феоктистов А.А. Анализ аварий и несчастных случаев на объектах газового надзора. - М.: ООО «Анализ опасностей», 2003.
3. Есиев Т. С. О влиянии фактора времени в развитии повреждаемости магистральных газопроводов // Проблемы старения сталей магистральных трубопроводов: Сборник трудов научно-практического семинара. - Нижний Новгород: Университетская книга, 2006. - С. 94-109.
4. Медведев В.Н., Кузнецов В.В, Шапиро В.Д., Почечуев А.М., Кац И.Д. О причинах аварийности труб магистральных газопроводов // Проблемы старения сталей магистральных

трубопроводов: Сборник трудов научно-практического семинара. - Нижний Новгород: Университетская книга, 2006. - С. 110-121.

5. Савонин С.В., Москаленко А.В., Тюндер А.В., Князев С.Е., Арсентьева З.А. Анализ основных причин аварий, произошедших на магистральных газопроводах // Нефть и газ Сибири. - 2015. - № 4 (21). - С. 4-6.

6. Родионова И.Г., Зайцев А.И., Удод К.А., Бакланова О.Н. Роль технологического и металлургического передела в процессе образования стресс-коррозионных повреждений в трубах из сталей классов прочности X70-X80 // Вести газовой науки. - 2016. - №3 (27). - С.37-47.

7. Алимов С.В., Арабей А.Б., Ряховских И.В., Есиев Т.С., Нефедов С.В., Губанок И.И., Абросимов П.В. Концепция диагностирования и ремонта магистральных газопроводов в регионах с высокой предрасположенностью к стресс-коррозии // Газовая промышленность. - 2015. - № S2 (724). - С. 10-15.

8. Chuhareva N.V., Mironov S.A., Tikhonova T.V. Prediction of accidents and damage to gas pipelines in Far North conditions // Electronic scientific journal "Oil and Gas Business". - 2012. - Issue 3. - P. 99-107.

9. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник. / Под ред. В.В. Клюева. - М.: Машиностроение, 1995.

10. ГОСТ 10006-80. Трубы металлические. Метод испытания на растяжение / Введ. 1980-03-31. - М.: Издательство стандартов, 2010.

11. ГОСТ 20295-85. Трубы стальные сварные для магистральных газонефтепроводов / Введ. 1987-01-01. - М.: Издательство стандартов, 2003.

12. ГОСТ 28334-89. Проволока и канаты стальные для армирования предварительно напряженных железобетонных конструкций. Метод испытания на релаксацию при постоянной деформации / Введ. 1990-06-30. - М.: Издательство стандартов, 2005.

13. СТО Газпром 2-5.1-148-2007. Методы испытаний сталей и сварных соединений на коррозионное растрескивание под напряжением / Введ. 2007-12-28. - М: ИРЦ Газпром, 2011.

14. Бейгильзимер Я.И., Гетманский А.П. Анализ перехода микропластической деформации в приближении теории протекания // Проблемы прочности. - 1988. - № 10. - С. 65-68.

15. Нохрин А.В., Чувильдеев В.Н. Старение сталей труб магистральных газопроводов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2010. - №5(2). - С. 171-180.

16. Нечаев Ю. С. Физические комплексные проблемы старения, охрупчивания и разрушения металлических материалов водородной энергетики и магистральных газопроводов // Успехи физических наук. - 2008. - Т. 178, № 7. - С. 709-726.

17. Бутусов Д.С., Репин Д.Г., Перов С.Л., Чувильдеев В.Н. Мониторинг и управление напряжённо-деформированным состоянием технологических трубопроводов компрессорных станций как средства снижения уровня риска аварии от дефектов, вызванных коррозионным растрескиванием под напряжением // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. - 2013. - №3(93). - С. 88-97.

18. Гольдштейн М.И., Литвинов В.С., Бронфин Б.М. Металлофизика высокопрочных сплавов. - М.: Металлургия, 1986.

19. Пиккеринг Ф.Б. Физическое металловедение и разработка сталей. - М.: Металлургия, 1982.

20. Мирошниченко Б.И., Нохрин А.В., Лопатин Ю.Г. Металлургические и эксплуатационные аспекты образования дефектов стресс-коррозии в магистральных газопроводах // Технология металлов. - 2012. - №4. - С. 35-42.

Дата поступления: 18 июля 2019 г.