

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-3-52-58>

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ МАЛОУГЛЕРОДИСТЫХ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ ВИХРЕТОКОВЫМ МЕТОДОМ*

© Елена Николаевна Бутусова¹, Василий Васильевич Мишакин²

¹ ООО СК «АЭРОХОД», г. Нижний Новгород, Россия; e-mail: Anelka13@yandex.ru

² Институт проблем машиностроения РАН — филиал ФГБУН «Федерального исследовательского центра Института прикладной физики РАН», г. Нижний Новгород, Россия; e-mail: imndt31@mts-nn.ru

*Статья поступила 6 марта 2018 г. Поступила после доработки 17 июля 2018 г.
Принята к публикации 28 сентября 2018 г.*

Приведены результаты исследования процессов коррозионного растрескивания под напряжением (КРН) малоуглеродистых низколегированных сталей. Показано, что использование вихретокового метода (ВТМ) позволяет проводить оценку тонких изменений структуры, связанных с процессами зарождения и роста трещин КРН. Процесс коррозионного растрескивания под напряжением имеет двухстадийный характер, который устойчиво отображают электромагнитные характеристики. На первой стадии происходит накопление микроповреждений в материале с образованием одной или нескольких трещин размером порядка величины нескольких зерен, на второй стадии — формирование и развитие макротрещин, что сопровождается ускоренным изменением электромагнитных характеристик. Представлены 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 связано 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 %. Предложен параметр для оценки состояния материала, подверженного КРН. Он позволяет по данным вихретоковых измерений фиксировать прохождение стадий накопления микроповреждений и момент исчерпания значительной части ресурса материала до появления множественных поверхностных макротрещин. Установлено, что применение вихретокового метода дает возможность не только определять наличие поверхностных макротрещин, но и выявлять стадии разрушения материала при одновременном воздействии коррозионно-агрессивной среды и статических растягивающих напряжений.

Ключевые слова: малоуглеродистая сталь; КРН; вихретоковый метод; поверхностные трещины; предел макроупругости.

STUDY OF THE STRESS CORROSION CRACKING OF LOW-CARBON LOW-ALLOY STEELS USING THE EDDY CURRENT METHOD

© Elena N. Butusova¹, Vasilii V. Mishakin²

¹ Shipbuilding company AEROHOD Ltd., Nizhny Novgorod, Russia; e-mail: Anelka13@yandex.ru

² Mechanical Engineering Research Institute of RAS — branch of Federal State Budgetary Scientific Institution “Federal Research Center The Institute of Applied Physics of the RAS”, Nizhny Novgorod, Russia; e-mail: imndt31@mts-nn.ru

Received March 6, 2018. Revised July 17, 2018. Accepted September 28, 2018.

The results of studying the processes of stress corrosion cracking (SCC) of low-carbon low-alloy steels are presented. It is shown that the use of eddy current method (ECM) allows one to evaluate even small structure changes associated with the processes of the SCC crack nucleation and growth. It is noted that the process of stress corrosion cracking exhibits a two-stage character, which is distinctly displayed in the electromagnetic characteristics. The first stage of the destruction characterizes the processes of accumulation of micro-damages in the material and ends with the formation of one or more cracks having the size of several grains. At the second stage the formation and growth of the macro cracks is accompanied by a rapid change of the electromagnetic characteristics. The dependences of the SCC incubation time on the value of

* Работа проведена при финансовой поддержке правительства в лице Министерства образования Российской Федерации по проекту RFMEFI58017X0012.

the macroelasticity limit (σ_0) are given. It is noted that an increase in the σ_0 value entails an increase in the time prior to the formation of the first crack. This can be explained by the fact that the limit of the macroelasticity determines the onset of microplastic flow in the material that actively affects the stress corrosion cracking. An analytical dependence of the SCC incubation period on the value of the macroelasticity limit is obtained using experimental data. The calculation error did not exceed 10%. A parameter is proposed to assess the state of the material prone to SCC which allows detecting the stages of accumulation of micro-damages and exhaustion of a significant part of the material resource before the appearance of multiple surface macro-cracks proceeding from the data of eddy current measurements. It is shown that the eddy current method apart from determination of the macro cracks present on the surface provides identification of the stages of the material destruction under the simultaneous action of corrosive medium and static tensile stresses.

Keywords: low-carbon steel; SCC; eddy current method; surface cracks; the limit of macroelasticity.

Коррозионное растрескивание под напряжением малоуглеродистых сталей — одна из наиболее распространенных причин выхода из строя магистральных газо- и нефтепроводов [1, 2]. Своевременно проведенные ремонт и(или) замена участков трубопроводов, близких к разрушению, позволяют не только снизить затраты на материалы и работы, уменьшить убытки, связанные с потерями углеводородов, но и сохранить экологическую обстановку. Разработка рациональных методов обнаружения трещин КРН на ранних стадиях является актуальной задачей материаловедения.

Электромагнитный (вихретоковый) метод диагностики широко используют не только на отдельных образцах металла, но и на конструкциях в целом. Он позволяет обнаруживать поверхностные и подповерхностные дефекты за счет изменения взаимодействия электромагнитного поля катушки с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых этой катушкой в объекте исследования [3].

Как известно, трещины КРН зарождаются и распространяются по поверхности. В связи с

этим применение вихретокового метода (ВТМ) представляется наиболее целесообразным при выявлении динамики коррозионного растрескивания под напряжением. Важно также отметить, что электромагнитный метод исследований позволяет проводить контроль изделия через неметаллические покрытия, включая окисную плёнку, что является особенно актуальным при исследовании «на месте».

Объекты и методики исследований. В качестве объектов исследования были выбраны наиболее широко применяемые при прокладке трубопроводов стали, химический состав которых соответствует отечественной марке 10Г2ФБЮ. Образцы вырезали из фрагментов труб, изготовленных на одном заводе («Дилингер», Германия) в один период времени (1980 – 1981 гг.), эксплуатирующихся в близких условиях, но в течение разного времени. Химический состав исследуемых сталей представлен в табл. 1, а механические характеристики — в табл. 2 (испытания проводили согласно [4]). Видно, что объекты исследования имеют близкие значения предела

Таблица 1. Химический состав исследованных сталей (% масс.)

Номер образца	C	Mn	Si	Ti	Nb	V
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

Номер образца	Стандартные механические свойства			Результаты релаксационных испытаний	
	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	σ_0 , МПа	σ_r , 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 (X70)	≥ 588	≥ 412	≥ 16		

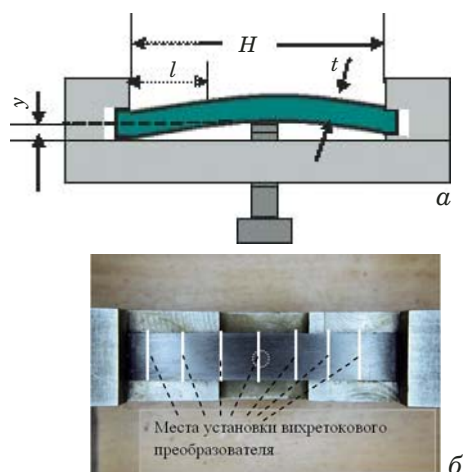


Рис. 1. Схема образца в трубине (а) и положения вихретокового датчика (вид сверху) (б)

прочности (σ_B), условного и физического пределов текучести ($\sigma_{0,2}$ и σ_T), а также относительного удлинения δ_5 . При этом все выбранные стали соответствуют нормативно-технической документации и могут быть отнесены к классу прочности К60 (Х70) [5]. В то же время у рассматриваемых образцов отличались пределы макроупругости (σ_0), определенные с помощью методики испытания на релаксацию [6].

Испытания на коррозионное растрескивание под напряжением проводили в кипящем растворе нитратов состава 57 % $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ + 6 % NH_4NO_3 + 37 % H_2O (среду выбирали согласно [7]). Схема образца в трубине показана на рис. 1, а, а места установки вихретокового преобразователя — на рис. 1, б.

В процессе испытаний нагруженные образцы вынимали из раствора, промывали, механически удаляли окисный слой и проводили измерения с помощью вихретокового дефектоскопа ВД-70 на частоте 150 Гц в зонах, соответствующих l , равной 20, 25, 30, 35, 40 и 45 мм от точки закрепления (см. рис. 1). Показание дефектоскопа (P) пропорционально сдвигу фаз ($\Delta\phi$) измеряемого и опорного напряжений накладного преобразователя: $P \sim \Delta\phi$.

При нагружении образца в упругой области по схеме «трехточечный изгиб» номинальное напряжение на его поверхности определяется как

$$\sigma_{\text{ном}} = \{6Ety\}/H^2, \quad (1)$$

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

При появлении в материале остаточных пластических деформаций находили напряжения

σ_{eff} , используя уравнение Холомона $\sigma = C\varepsilon^n$ и предполагая, что $\varepsilon \sim y$:

$$\sigma_{\text{eff}} = \sigma_0(y/y_0)^n, \quad (2)$$

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. Значения n для образцов сталей № 1–4 составили 0,18, 0,2, 0,22 и 0,25 соответственно.

В процессе испытаний измеряли величину $P(\tau)$ (τ — время выдержки образца в среде), фиксировали время образования поверхностных микротрещин размером 50 мкм (время окончания инкубационного периода КРН — $\tau_{\text{инк}}$) и время образования макротрещины размером 5 мм (τ^*).

Результаты исследований. Различные значения предела макроупругости σ_0 , обусловленные структурой материала, приводят к тому, что изначально одинаковые номинальные напряжения ведут к разным уровням микропластической деформации, заметно влияющим на интенсивность процессов разрушения при КРН.

На рис. 2 приведены зависимости разности показаний вихретокового дефектоскопа ΔP в начальный момент времени $\tau = 0$ и в момент времени τ от расстояния l от точки закрепления образца при различных выдержках КРН.

Представленные зависимости имеют близкий к симметричному вид относительно максимального напряжения на образце, что позволяет говорить о симметричном распределении нагрузки, а следовательно, процессе разрушения.

В процессе КРН в образце происходят тонкие изменения структуры, обусловленные накоплением дефектов (дислокаций, вакансий), что приводит к увеличению внутренней энергии материала в области их повышенной концентрации. Чем выше энергия определенных участков, тем больше разница с соседними, в результате чего образуется гальваническая пара и интенсифицируются процессы коррозии, способствующие появлению и росту трещин. При этом чем выше значение приложенного напряжения, тем быстрее идет накопление микрповреждений и, как следствие, разрушение материала.

Поскольку в процессе накопления дефектов значения ΔP увеличиваются, можно говорить о чувствительности выбранного вихретокового метода к подобного рода изменениям.

На рис. 3 представлены кривые $\Delta P(\tau)$ для эффективных напряжений на образце, опре-

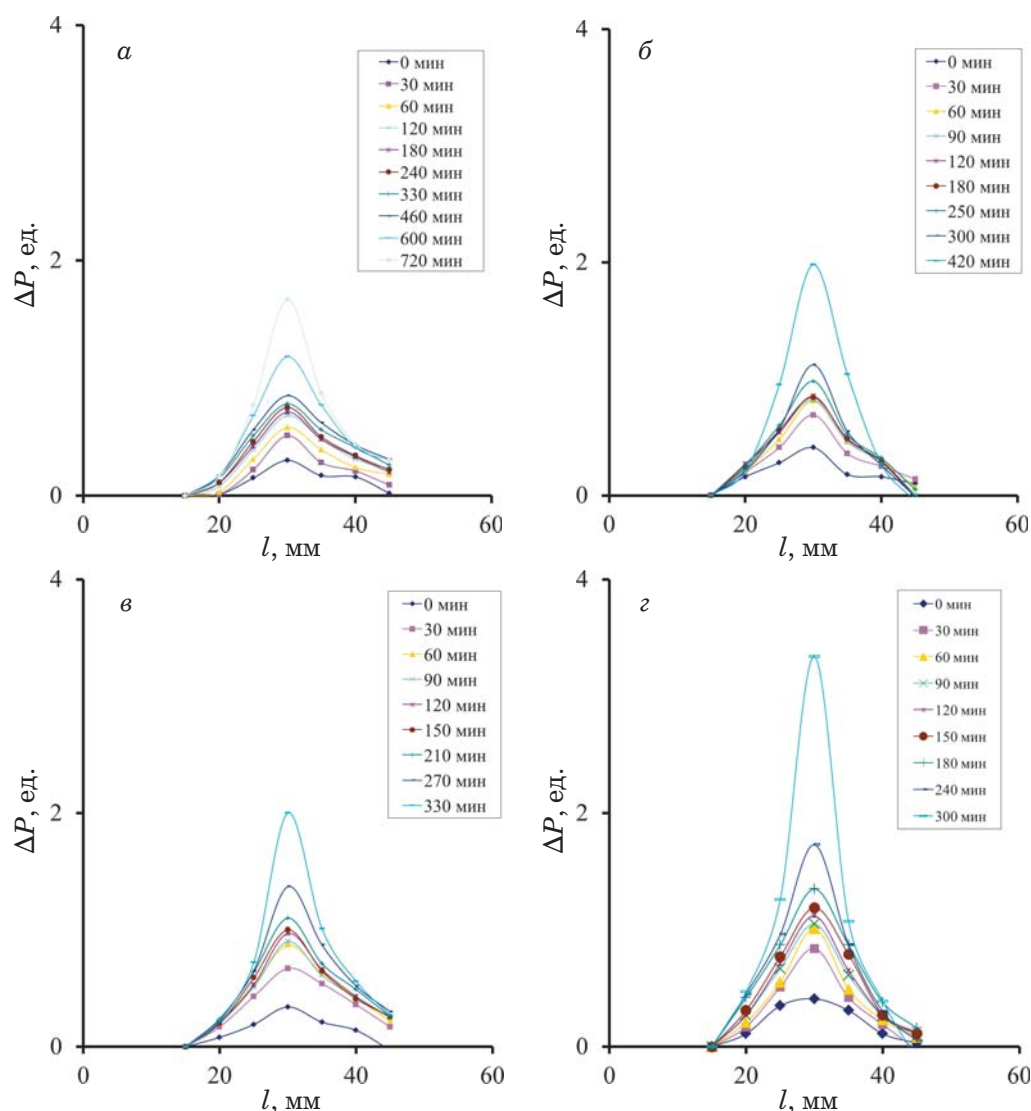


Рис. 2. Распределение ΔP в зависимости от l : а — образец № 1 ($\sigma_{\text{eff}} = 465$ МПа); б — образец № 2 ($\sigma_{\text{eff}} = 445$ МПа); в — образец № 3 ($\sigma_{\text{eff}} = 425$ МПа); г — образец № 4 ($\sigma_{\text{eff}} = 410$ МПа)

деляемых расстоянием от точки закрепления (верхние кривые соответствуют центру образца ($l = 30$ мм) и максимальному значению напряжений). На графиках четко выделяются две стадии развития повреждений. На первой стадии (выделенные области) кривая наиболее близко может быть описана полиномом второй степени по времени. Скорость разрушения в этом периоде определяется химическим составом поверхностного слоя исследованных образцов и скоростью диффузии кислорода к нему. Первый этап заканчивается образованием одной или нескольких трещин размером порядка величины нескольких зерен исследованных сталей. На второй стадии происходит формирование и рост макротрещин, которые приводят к ускоренному изменению электромагнитных характеристик.

Вихретоковые измерения в режиме мониторинга позволяют выделить стадию разрушения,

на которой находится материал, и оценить его ресурсные характеристики.

Исследования КРН вихретоковым методом, как отмечено выше, проводили при одном номинальном напряжении, задаваемом винтом. Величина деформации, соответствующая выбранной стреле прогиба, состоит из пластической и упругой частей. 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 обосновано в работах [8 – 10].

В ходе исследований определяли время окончания инкубационного периода КРН для выбранных сталей ($\tau_{\text{инк}}$). На рис. 4 приведены экспериментальная и расчетная зависимости $\tau_{\text{инк}}(\sigma_0)$. Как видно из экспериментальной зависимости

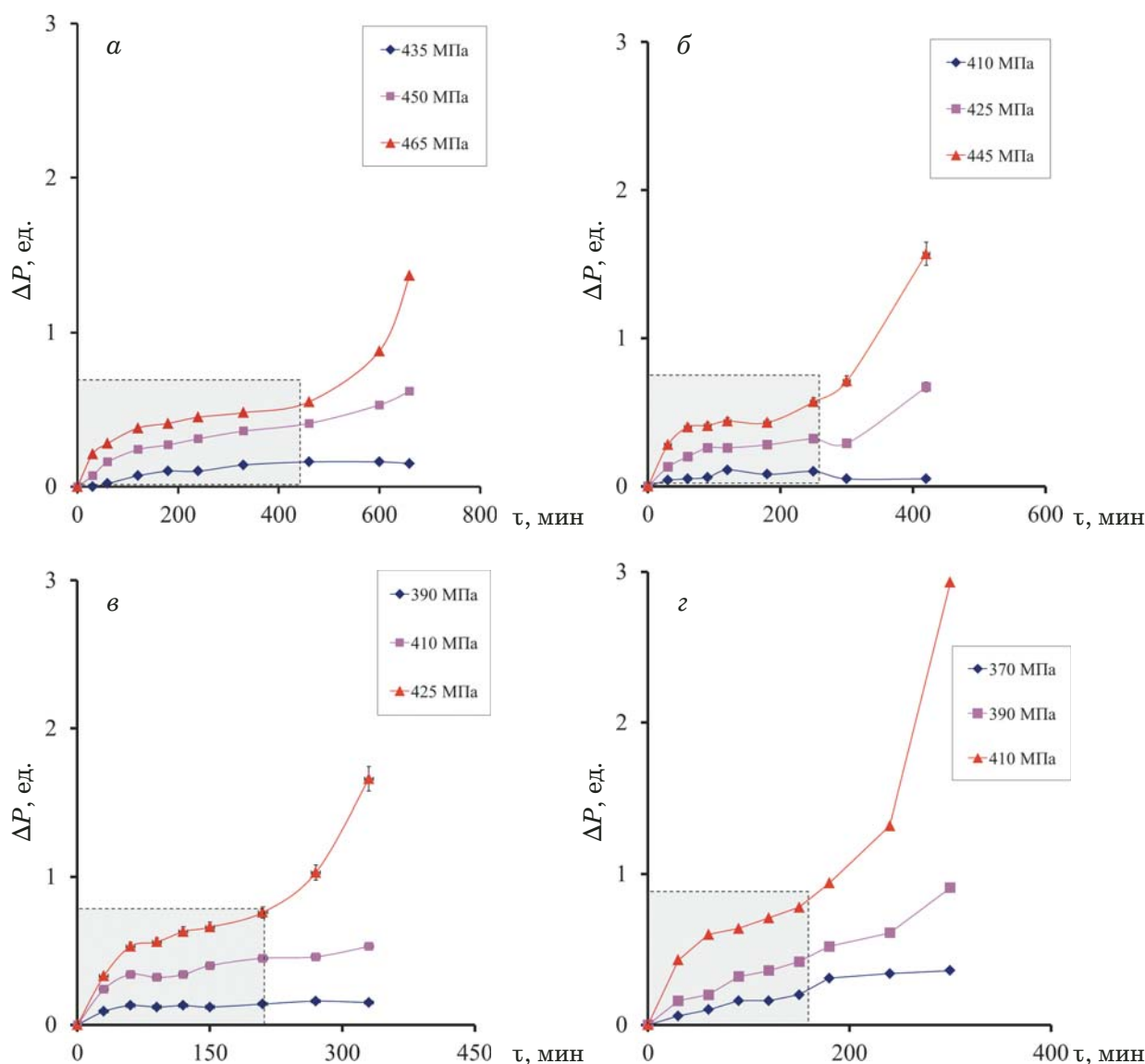


Рис. 3. Зависимости ΔP от длительности КРН испытаний: а – г — образцы № 1 – 4 соответственно

(кривая 1), увеличение σ_0 приводит к нелинейному повышению $\tau_{\text{инк}}$, что отмечено также в [9]. Это связано с тем, что предел макроупругости определяет начало микропластического течения в материале. При одинаковых номинальных напряжениях увеличение σ_0 снижает величины микропластических деформации, действующих в материале.

Полученная экспериментальная зависимость для данного вида и диапазона напряжений σ_{eff} от 410 до 465 МПа хорошо аппроксимируется следующим выражением (см. рис. 4, кривая 2):

$$\tau_{\text{инк}} = \tau_{\text{инк}}^{\min} + k_1(\sigma_0 - \sigma_0^{\text{стр}}) + \frac{k_2}{\sigma_0^{\text{пор}} - \sigma_0}, \quad (4)$$

где $\tau_{\text{инк}}^{\min}$ — минимальное время инкубационного периода КРН; $\sigma_0^{\text{стр}}$ — напряжение, соответствующее минимальному времени инкубационного

периода КРН; $\sigma_0^{\text{пор}}$ — пороговое значение предела макроупругости, $\sigma_0^{\text{пор}} = 313$ МПа; $k_1 = 1$ мин/МПа, $k_2 = 700$ мин · МПа — коэффициенты; $\sigma_0^{\text{экс}}$ — предел макроупругости, соответствующий определенному времени эксплуатации.

Минимальное время разрушения $\tau_{\text{инк}}^{\min}$ определяли 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 $\sigma_0^{\text{стр}} = 200$ МПа [9] ($\tau_{\text{инк}}^{\min} \approx 150$ мин). Напряжение $\sigma_0^{\text{стр}}$ рассчитывали согласно [9, 11 – 13] 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 величину $\sigma_0^{\text{пор}}$ определяли из условия минимального среднеквадратиче-

ского отклонения экспериментальной кривой от расчетной. Полученные коэффициенты использовали 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 $\tau_{\text{инк}}$ от экспериментальных — не выше 10 %.

На рис. 5 приведены зависимости показаний вихретокового дефектоскопа, соответствующие критическим значениям времени испытаний на КРН, от предела макроупругости σ_0 .

Видно, что кривые $\Delta P(\tau_{\text{инк}})$ и $\Delta P(\tau^*)$ хорошо разделяются. Для определения состояния металла с помощью вихретокового метода предлагаем использовать параметр

$$P_{\text{тр}} = \frac{\Delta P}{\Delta P_{\text{min}}^*}, \quad (5)$$

где ΔP_{min}^* — минимальное изменение параметра P , при котором зафиксировано образование макротрещин (см. рис. 5).

Значение $P_{\text{тр}} \approx 1$ свидетельствует о прохождении инкубационной стадии накопления микрповреждений и высокой вероятности образования множественных поверхностных макротрещин, а также выработке существенной части ресурса материала.

В интервале значения $P_{\text{тр}}$ от 0,5 до 1 разрушение достигает инкубационной стадии. При $P_{\text{тр}}$ от 0 до 0,5 (уровень ΔP_1) можно условно считать, что разрушение находится на ранних стадиях развития и сокращение ресурса вследствие коррозионного растрескивания под напряжением незначительно.

Выводы

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 предела макроупругости. Отмечено, что возрастание 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.

Исследования показали, что стадийность разрушения при КРН хорошо фиксируется вихретоковым методом. Первая стадия разрушения за-

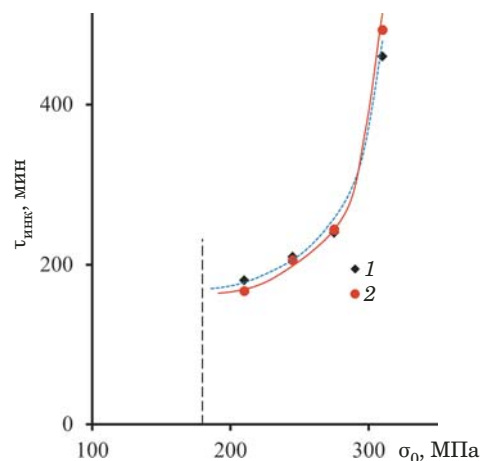


Рис. 4. Экспериментальная (1) и расчетная (2) зависимости времени окончания инкубационного периода КРН от величины предела макроупругости

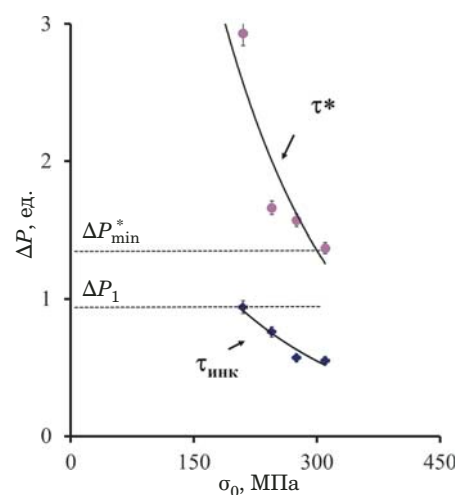


Рис. 5. Зависимость ΔP от σ_0

канчивается образованием одной или нескольких трещин размером порядка величины нескольких зерен. На второй стадии происходит формирование и рост макротрещин, что сопровождается ускоренным изменением электромагнитных характеристик.

Предложен параметр для оценки состояния материала, подверженного КРН, позволяющий по данным вихретоковых измерений фиксировать прохождение стадии накопления микрповреждений и момент истощения значительной части ресурса материала до появления множественных поверхностных макротрещин.

ЛИТЕРАТУРА

- Дзюев К. М., Залитач Н. Р. Проблемы производства работ по капитальному ремонту объектов линейной части ОАО «Газпром» / Обслуживание и ремонт газонефтепроводов 2010: Мат-лы V Междун. Конф. — М.: Газпром экспо, 2011. С. 102 – 106.

2. Радионова С. Г., Жулина С. А., Кузнецова Т. А., Печёркин А. С., Кручинина И. А., Гражданкин А. И. Показатели опасности аварий на российских магистральных трубопроводах / Безопасность труда в промышленности. 2015. № 11. С. 62 – 69.
3. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / Под ред. В. В. Клюева. — М.: Машиностроение, 1995. — 488 с.
4. ГОСТ 10006–80. Трубы металлические. Метод испытания на растяжение / Введ. 1980-03-31. — М.: Изд-во стандартов, 2010. — 12 с.
5. ГОСТ 20295–85. Трубы стальные сварные для магистральных газонефтепроводов / Введ. 1987-01-01. — М.: Изд-во стандартов, 2003. — 26 с.
6. 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.: Изд-во стандартов, 2005. — 7 с.
7. 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. — 18 с.
8. Бейгельзимер Я. И., Гетманский А. П. Анализ перехода микропластической деформации в приближении теории протекания / Проблемы прочности. 1988. № 10. С. 65 – 68.
9. Нохрин А. В., Чувиладель В. Н. Старение сталей труб магистральных газопроводов / Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. 2010. № 5(2). С. 171 – 180.
10. Нечаев Ю. С. Физические комплексные проблемы старения, охрупчивания и разрушения металлических материалов водородной энергетики и магистральных газопроводов / УФН. 2008. Т. 178. № 7. С. 709 – 726.
11. Гольдштейн М. И., Литвинов В. С., Бронфин Б. М. Металлофизика высокопрочных сплавов. — М.: Металлургия, 1986. — 312 с.
12. Пиккеринг Ф. Б. Физическое металловедение и разработка сталей. — М.: Металлургия, 1982. — 184 с.
13. 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.
- V International Conference, 2010. — Moscow: Gazprom Expo, 2011. P. 102 – 106 [in Russian].
2. Radionova S. G., Zhulina S. A., Kuznetsova T. A., Pecherkin A. S., Kruchinina I. A., Grazhdankin A. I. Indicators of danger of accidents on Russian main pipelines / Bezopasn. Truda Promyshl. 2015. N 11. P. 62 – 69 [in Russian].
3. Non-destructive testing and diagnostics: Handbook / V. V. Klyuev (ed.). — Moscow: Mashinostroenie, 1995. — 488 p. [in Russian].
4. State Standard GOST 10006–80. Metal tubes. Tensile test method / 1980-03-31. — Moscow: Izd. standartov, 2010. — 12 p. [in Russian].
5. State Standard GOST 20295–85. Steel welded pipes for main gas-and-oil pipelines. Specifications / 1987-01-01. — Moscow: Izd. standartov, 2003. — 26 p. [in Russian].
6. State Standard GOST 28334–89. Steel wire and ropes for reinforcement of prestressed concrete constructions. Method of relaxation test at constant deformation / 1990-06-30. — Moscow: Izd. standartov, 2005. — 7 p. [in Russian].
7. SOE Gazprom 2-5.1-148–2007. Methods of testing steels and welded compounds on corrosion resistance under stresses / 2007-12-28. — Moscow: IRTS Gazprom, 2011. — 18 p. [in Russian].
8. Beygel'zimer Ya. I., Getmanskiy A. P. Analysis of the transition of the microplastic deformation in the approximation of percolation theory / Probl. Prochn. 1988. N 10. P. 65 – 68 [in Russian].
9. Nokhrin A. V., Chuvildeev V. N. Aging of steel pipes of main gas pipelines / Vestn. Nizhegorod. univ. im. N. I. Lobachevskogo. 2010. N 5(2). P. 171 – 180 [in Russian].
10. Nechaev Yu. S. Physical complex problems of aging, embrittlement and destruction of metallic materials of hydrogen energy and gas mains / UFN. 2008. Vol. 178. N 7. P. 709 – 726 [in Russian].
11. Goldshtein M. I., Litvinov V. S., Bronfin B. M. Metallophysics of high-strength alloys. — Moscow: Metallurgiya, 1986. — 312 p. [in Russian].
12. Pickering F. B. Physical metallurgy and the development of steels. — Moscow: Metallurgy, 1982. — 184 p. [Russian translation].
13. Miroshnichenko B. I., Nohrin A. V., Lopatin Yu. G. Metallurgical and operational aspects of the formation of stress corrosion defects in gas mains / Tekhnol. Metall. 2012. N 4. P. 35 – 42 [in Russian].

REFERENCES