Строительство уникальных зданий и сооружений. ISSN 2304-6295. 12 (51). 2016. 33-44

Construction of Unique Buildings and Structures

journal homepage: www.unistroy.spbstu.ru

Оценка напряженно-деформированного состояния и растрескивания атмосферостойкой конструкционной стали методом акустоупругости

Е.Л. Алексеева [1], А.А. Альхименко [2], А.К. Беляев [3], А.М. Лобачев [4], В.А. Полянский [5,*], Г.Н. Ростовых [6] Д.А. Третьяков [7], Л.В. Штукин [8], Ю.А. Яковлев [9]

[1-5,7-9]*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.*

[6] *ФГУП "Научно-исследовательский институт мостов и дефектоскопии (НИИ мостов)", 196140, Россия, г. Санкт-Петербург, Пулковское ш., 29, корп. 8.*

Информация о статье	История	Ключевые слова
научная статья **doi 10.18720/CUBS.51.3**	Подана в редакцию 25.10.2016	атмосферостойкие стали; водородное растрескивание; неразрушающий контроль; акустоупругость; пластические деформации;

АННОТАЦИЯ

Атмосферостойкие стали отличаются высокой стойкостью к различным видам коррозии. Их многолетние испытания показали, что даже без защитного покрытия строительные конструкции из этих сталей могут эксплуатироваться в условиях российского климата годами, без существенных коррозионных повреждений. Из-за высокой коррозионной стойкости, прочности и относительной дешевизны эти стали считаются наиболее перспективными для строительства мостов и путепроводов. В этой связи, актуальной является проблема неразрушающего контроля элементов конструкций из этих сталей. В статье приводятся результаты исследования распределения величины акустической анизотропии в образцах стали 14ХГНДЦ после циклического механического нагружения. Описаны результаты испытаний этой стали на водородное растрескивание и результаты измерения величины акустической анизотропии, вызванной этим растрескиванием. Обнаружено большое влияние коррозионных трещин на величину акустической анизотропии. В результате исследования выявлена низкая стойкость стали 14ХГНДЦ к растрескиванию в сероводородной среде. Это вносит существенные ограничения в ее применение в строительных конструкциях, расположенных в море и в прибрежной зоне.

Содержание

1. Введение 34
2. Экспериментальные исследования 35
3. Обсуждение экспериментальных результатов 38
4. Заключение 40
5. Благодарности 40

Контактный автор

1 +7(911)2503477, e.alexeeva@onti.spbstu.ru (Алексеева Екатерина Леонидовна, инженер)

2. +7(921)9586435, 9586435@mail.ru (Альхименко Алексей Александрович, Директор Научно-исследовательского и образовательного центра "Везерфорд-Политехник")

3. +7(921)4100333, vice.ipme@gmail.com (Беляев Александр Константинович, д-р физ.-мат. наук, доц., профессор)

4. +7(921)5601239, lobachev_am@spbstu.ru (Лобачев Александр Михайлович, ассистент)

5*. *+7(921)7480637, vapol@mail.ru* (Полянский Владимир Анатольевич, д-р техн. наук, профессор)

6. +7(812)4136631, _gregg@rambler.ru (Ростовых Григорий Николаевич, старший научный сотрудник)

7. +7(962)7076338, dmitry.tretyakov93@yandex.ru (Третьяков Дмитрий Алексеевич, студент)

8. +7(965)0490578, lvtvsh4749@gmail.com (Штукин Лев Васильевич, канд. физ.-мат. наук, доцент)

9. +7(921)7480637, yura.yakovlev@gmail.com (Яковлев Юрий Алексеевич, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник)

1. Введение

Защитная окраска металлических частей мостов, путепроводов и пролетных строений по действующим нормативным документам должна проводиться по результатам обследования конструкции. Как показывает опыт (см. [1]), промежуток между окрасками составляет от 5 до 22 лет, а для большинства марок защитных покрытий - от 10 до 12 лет. За расчетный срок службы сооружения его необходимо будет окрасить около 10 раз. Стоимость одной окраски составляет примерно 20% от стоимости проката, из которого изготовлены конструкции. Следовательно, окраска за расчетный срок эксплуатации стоит значительно дороже, чем сама конструкция.

В 90-х годах прошлого века начались испытания нового класса атмосферостойких сталей в условиях климата, характерного для России. Из толстого листа (от 12 до 20 мм) стали 14ХГНДЦ были изготовлены три опытных пролетных строения, которые были смонтированы: на Юго-Восточной, на Восточно-Сибирской и на Южно-Уральской железных дорогах. Особенностью данного типа стали является высокая коррозионная стойкость, которая дает возможность использовать ее без защитного покрытия и окраски.

Обследование опытных пролетных строений после 20 лет эксплуатации без окраски показало, что на поверхности элементов конструкции образуется тонкий (0,3 мм) слой продуктов коррозии, отслаивающиеся продукты коррозии отсутствуют [2, 3]. Таким образом, испытания прошли успешно, и атмосферостойкие стали сейчас признаны перспективными для строительства практически во всех климатических зонах России.

Отсутствие многослойных покрытий и тонкий слой продуктов коррозии позволяют эффективно применять акустические ультразвуковые методы для диагностики элементов конструкций и определения их текущего напряженно-деформированного состояния. Метод акустоупругости, основанный на измерении акустической анизотропии, позволяет оценить механические напряжения в конструкциях и в этом смысле является альтернативой методам тензометрии. Он стандартизован [4] и широко применяется в современной технической диагностике [5]. В отличие от методов диагностики, использующих электромагнитные свойства металлов, метод акустоупругости стандартизован именно как метод контроля внутренних механических напряжений. С его помощью можно определить поле механических напряжений в элементах конструкции и сделать вывод об их близости к критическим. Применение метода обеспечено серийным измерительным оборудованием.

При применении метода акустоупругости не требуется полной разгрузки конструкции, достаточно иметь образец-свидетель или ненагруженный участок конструкции из того же материала. Большим преимуществом метода является возможность получить средние по толщине материала величины механических напряжений. При этом, толщина металла может составлять от 5 мм и более. Этим он также выгодно отличается от тензометрии, при проведении которой фактически измеряются деформации поверхности материала. Измерительные датчики легко устанавливаются с использованием специальной консистентной смазки. Измерения можно провести быстро, в экспресс-режиме.

Суть метода заключается в измерении относительной разности:

$$\Delta a = 2(v_1 - v_2)/(v_1 + v_2)$$

скоростей v_1 и v_2 распространения поперечной акустической ультразвуковой волны различной поляризации. Параметр Δa называется акустической анизотропией.

В основополагающей работе [6] было теоретически показано и экспериментально подтверждено, что в случае чистых упругих деформаций акустическая анизотропия Δa пропорциональна разности главных напряжений $\sigma_1 - \sigma_2$.

Вместе с тем, в конструкциях используется прокат. Следовательно, металл конструкции предварительно подвергается пластическому деформированию. Пластические деформации вносят вклад в величину акустической анизотропии. В работах [7-9] экспериментально показано, что в этом случае:

$$\Delta a = a_0 + a_1 \cdot \left(\varepsilon_1^p - \varepsilon_2^p\right) + C_A\,(\,\sigma_1 - \sigma_2), \qquad (1)$$

где $\varepsilon_1^p, .\varepsilon_2^p$ – главные пластические деформации, σ_1 и σ_2 – главные напряжения, C_A – экспериментально определяемый коэффициент, а слагаемое $a_0 + a_1 \cdot \left(\varepsilon_1^p - \varepsilon_2^p\right)$ – интерпретируется, как вклад анизотропной микроструктуры металла в величину Δa.

Влияние упругих деформаций описывается слагаемым $C_A\,(\,\sigma_1 - \sigma_2)$, которое физически связано со смещением атомов кристаллической решетки из положения равновесия под действием внутренних механических напряжений.

Влияние пластических деформаций объясняется тем, что при пластическом деформировании происходит направленное изменение микроструктуры металла. Это может быть разворот зерен в одном направлении, образование ориентированных в одну сторону микротрещин, дислокаций, неметаллических включений. Формула (1) была верифицирована путем моделирования и экспериментально в более поздних работах [10-17].

Таким образом, механическая разгрузка участка конструкции, которая обращает в ноль слагаемое $C_A\,(\,\sigma_1 - \sigma_2)$ в (1) позволяет измерить $a_0 + a_1 \cdot \left(\varepsilon_1^p - \varepsilon_2^p\right)$, а образец-свидетель позволяет измерить a_0, так как к нему вообще не прикладывалась внешняя нагрузка и, соответственно, второе и третье слагаемое формулы (1) равны нулю. Все компоненты (1) можно найти экспериментально и, зная константы a_1, C_A, можно оценить уровень пластических деформаций и напряжений в конструкции.

Данный подход используется при неразрушающем контроле. При изменениях используются ненагруженные или слабо нагруженные участки конструкции, которые играют роль образцов-свидетелей. Метод акустической анизотропии позволяет регистрировать слабые эффекты. Фактически, для измерения скоростей звуковой волны, измеряются временные задержки между излучаемыми и отраженными импульсами ультразвуковых волн различной поляризации. Даже при напряжениях близких к пределам текучести эта разница составляет доли процента от самой временной задержки. Возникает вопрос, насколько правомерно использовать формулы, полученные и проверенные на модельных образцах, при диагностике конструкций из реального проката с относительно неравномерным распределением пластической деформации, повреждений и т.д.

Данная постановка вопроса является тем более правомерной, что при технической диагностике конструкций наибольший интерес представляет именно случай, когда рабочая механическая нагрузка вызывает пластические деформации.

2. Экспериментальные исследования

Целью выполненных экспериментов было исследование полей акустической анизотропии в образцах, вырезанных из проката. Для изготовления образцов использовался лист проката из стали 14ХГНДЦ толщиной 16 мм.

Было изготовлено две группы образцов: для механических испытаний и для испытаний на водородное растрескивание.

Для механических испытаний использовались образцы стандартной формы с длиной рабочей части 550 мм и шириной рабочей части 80 мм. Эскиз образца с указанием размеров приведен на Рисунке 1.

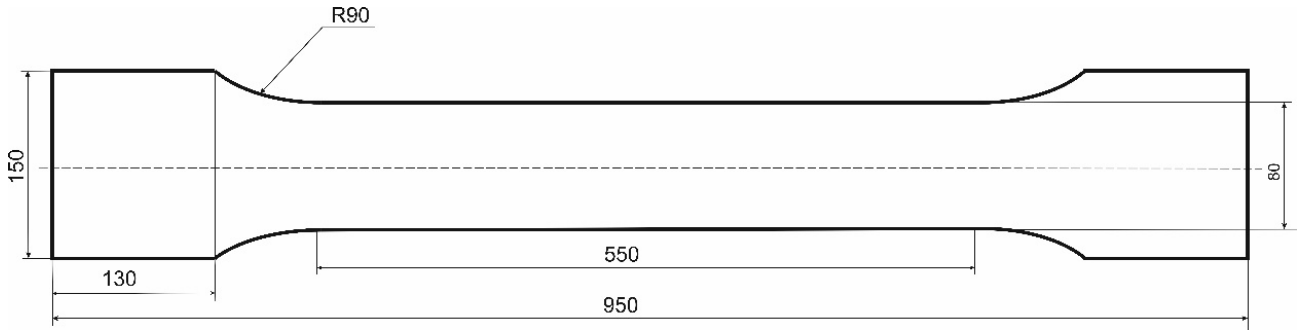

Рисунок 1. Эскиз образца для механических испытаний. Длина образца 950 мм, длина рабочей части 550 мм, ширина рабочей части – 80 мм, толщина – 16 мм.

Для моделирования условий реальной эксплуатации образцы были подвергнуты испытаниями на многоцикловую усталость с диапазоном изменения напряжений от 326 Н до 3260 Н. Поля акустической анизотропии измерялись на рабочей части разрушенных при испытаниях образцов с видимой пластической деформацией.

Для выполнения измерений акустической анизотропии использовался прибор ИН5101А. Он осуществляет ударное возбуждение ультразвуковых волн в исследуемом металле и прием отраженного сигнала с помощью пьезопреобразователей. Трехкомпонентный пьезопреобразователь служит для излучения и приема продольной волны и двух поперечных волн, поляризованных во взаимно перпендикулярных направлениях. Продольная волна используется для измерения толщины материала образца. Программное обеспечение позволяет выполнить прецизионные измерения времени прохождения ультразвуковой волны по толщине исследуемого тела. Для повышения точности проводятся измерения временного запаздывания между несколькими отраженными импульсами с последующим осреднением.

Величина акустической анизотропии вычисляется как отношение разности временных задержек отраженного импульса поляризованных поперечных волн к полу-сумме этих времен. При измерениях в нагруженных конструкциях для уменьшения погрешностей измерения выбирают направление поляризации для первой волны - вдоль линии приложения нагрузки, направление поляризации для второй волны – в перпендикулярном направлении. В нашем случае растяжение было одноосным – вдоль продольной оси образца, поэтому после разгрузки измерения проводились параллельно и перпендикулярно его продольной оси.

Для сопоставления полученных полей акустической анизотропии с полем пластических деформаций было проведено математическое моделирование испытаний на многоцикловую усталость методом конечных элементов в пакете ANSYS. На Рисунке 2 показано расчетное поле пластических деформаций.

Характерное поле распределения величины акустической анизотропии в одной из частей образца также показано на Рисунке 2.

Сравнение данных расчетов и данных измерений величины акустической анизотропии (см. Рисунок 2) показывает, что на средней линии образца и по верхнему краю получается хорошее качественное совпадение результатов расчетов и результатов измерений, причем и по величине, и по знаку деформаций. Существенная разница с полем расчетных деформаций получается только на нижнем крае образца.

Одной из вероятных причин такого несоответствия может быть образование системы микротрещин на нижней боковой поверхности образца, так как магистральная трещина, в результате роста которой он разрушился, стартовала именно с этой поверхности.

Для проверки этой гипотезы были проведены опыты с образцами, в которых искусственным путем, при водородном растрескивании в растворе электролита была создана система трещин.

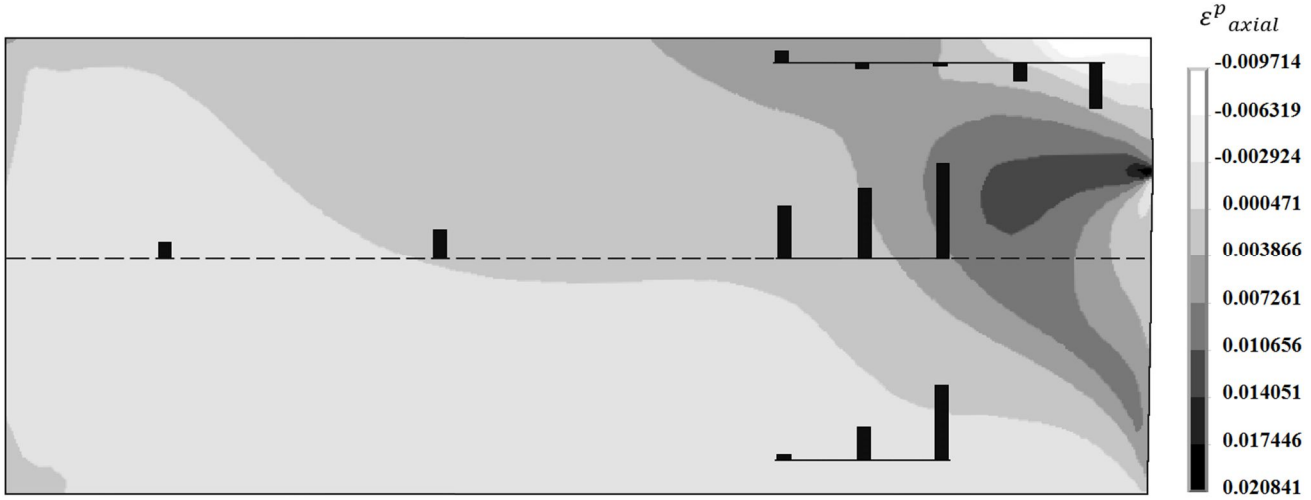

Рисунок 2. Поле деформаций и величина акустической анизотропии в разрушенном при циклическом нагружении образце. Акустическая анизотропия Δa показана в точках измерения, которые лежат на пересечении сплошной линии и столбика обозначающего величину анизотропии, сплошная линия означает ноль

Для этого был проведены стандартные испытания на водородное растрескивание (HIC), согласно стандарту [18]. Производилось выдерживание образцов в течение 96 часов в деаэрированном водном

растворе 5% по массе NaCl, 0,5% по массе CH_3COOH. В процессе проведения теста в растворе создается и поддерживается концентрация 1000 мг/л H_2S методом барботирования газообразным сероводородом.

Для эксперимента использовались два образца размерами 15x20x100 мм^3 - из стали 14ХГНДЦ и размером 17x25x100 мм^3 из стали 10ХСНД-2. Вторая марка стали была выбрана для сравнения, так как она широко применяется для строительства мостов.

Образцы не подвергались никакому механическому нагружению. Все поверхности образцов были отшлифованы на станке (шероховатость Rz20). После подготовки образцов проведено предварительное измерение акустической анизотропии. Акустическая анизотропия измерялась в пяти равноотстоящих точках на оси образцов. В среднем по пяти точкам она составила $\Delta a = 0{,}00\%$.

Анизотропия после выдержки образцов в электролите была измерена снова. Она составила по образцу из 14ХГНДЦ - $\Delta a = 0{,}8\%$, по образцу из стали 10ХСНД-2 - $\Delta a = 0{,}6\%$. Необходимо отметить, что на образце 14ХГНДЦ при измерениях появились отраженные импульсы, имеющие временную задержку в два раза меньшую, чем в исходном образце.

После повторных измерений анизотропии образцы были разрезаны на три части, для измерения показателей водородного растрескивания согласно [18]. Плоскости, образовавшиеся после разрезов, были отполированы и протравлены в спиртовом растворе азотной кислоты. Фотографии разрезанных образцов приведены на Рисунке 3. На фотографиях хорошо видна продольная водородная трещина, которая проходит ровно посередине сечения вдоль всего образца.

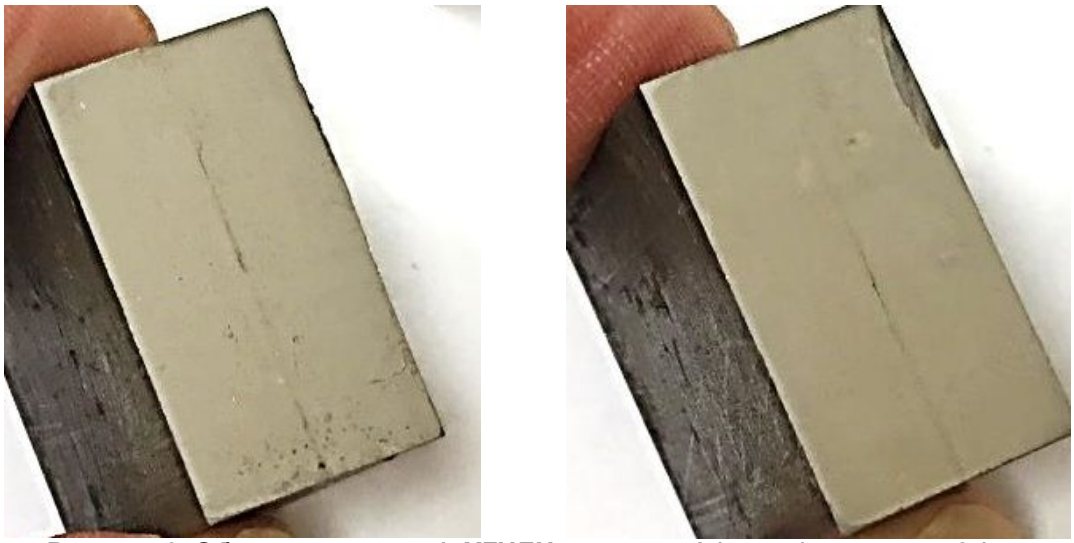

Рисунок 3. Образец из стали 14ХГНДЦ , сечение 1 (слева) и сечение 2 (справа)

Микрофотографии отдельных водородных трещин в образцах приведены на Рисунке 4 и Рисунке 5.

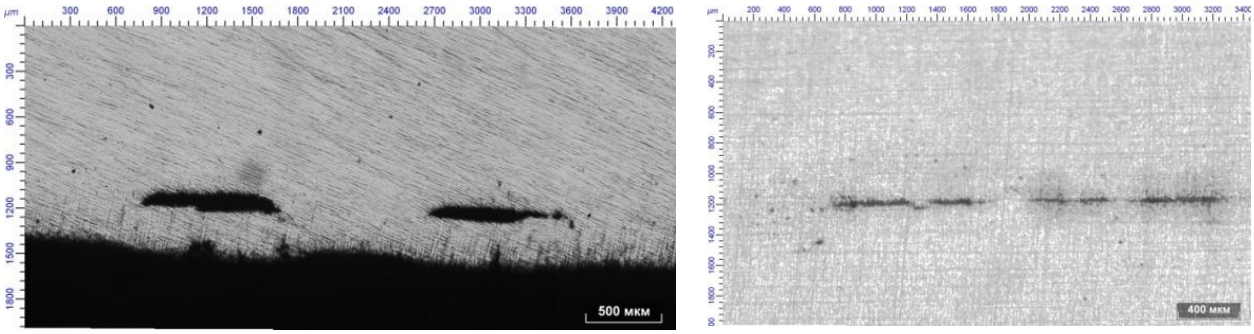

Рисунок 4. Микрофотографии трещин в образце из стали марки 10ХСНД-2 (увеличение x25)

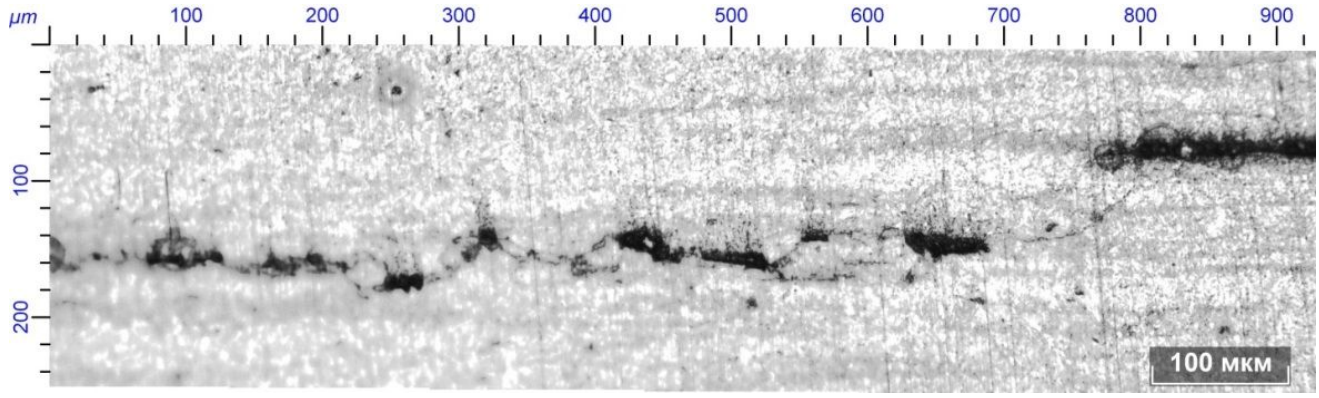

Рисунок 5. Микрофотография трещин в образце из стали марки 14ХГНДЦ (увеличение х200)

Результаты измерений стандартных показателей растрескивания в двух сечениях приведены в таблице 1. Параметр CSR – относительная площадь всех трещин по отношению к площади поперечного сечения образца. Параметр CLR – относительная длина всех трещин по отношению к ширине сечения образца. Параметр CTR – относительная толщина всех трещин по отношению к высоте сечения образца.

Таблица 1. Результаты испытаний на водородное растрескивание в двух сечениях образцов из стали марок 14ХГНДЦ и 10ХСНД-2

Образец	Параметр	Значение	Образец	Параметр	Значение
Образец из стали марки 14ХГНДЦ . Сечение 1	CSR	1,93%	Образец из стали марки 10ХСНД-2. Сечение 1	CSR	0,12%
	CLR	42,2%		CLR	16,30%
	CTR	5,78%		CTR	1,60%
Образец из стали марки 14ХГНДЦ . Сечение 2	CSR	1,73%	Образец из стали марки 10ХСНД-2. Сечение 2	CSR	0,96%
	CLR	43,79%		CLR	39,00%
	CTR	8,4%		CTR	6,47%

Измерения концентрации водорода проводились до и после насыщения образцов в растворе электролита. Использовался метод вакуум – нагрева. Для измерений концентрации водорода в исходном состояния, до насыщения водородом, использовались специальные образцы, которые в дальнейших испытаниях не участвовали. Использовался сертифицированный масс-спектрометрический анализатор водорода АВ-1. Образцы непосредственно перед измерениями разрезались на более мелкие пробы с массой около 1,5 г.

Средние концентрации водорода в пробах составили 0,3 млн$^{-1}$ - до насыщения и 0,8 млн$^{-1}$ через 96 часов выдержки на воздухе после окончания насыщения образцов водородом.

3. Обсуждение экспериментальных результатов

Полученные результаты можно разделить на три группы: результаты по измерениям акустической анизотропии, испытаний на водородное растрескивание и результаты измерения концентрации водорода.

Результаты по измерениям акустической анизотропии показали, что образование системы микротрещин может давать дополнительный вклад в выражение (2), которое приобретает вид

$$\Delta a = a_0 + a_1 \cdot \left(\varepsilon_1^p - \varepsilon_2^p\right) + C_A\,(\,\sigma_1 - \sigma_2) + a_2. \qquad (2)$$

где a_2 – слагаемое, связанное с образованием трещин. Далеко не при всякой пластической деформации происходит растрескивание металла, упругая деформация – тем более не связана с образованием трещин, поэтому слагаемое a_2 нельзя включить в другие компоненты формулы и необходимо рассматривать отдельно. В известной нам литературе связь акустической анизотропии с

растрескиванием не упоминается. Полученный нами новый результат требует дополнительного исследования, в частности необходимо связать величину слагаемого a_2 с параметрами растрескивания.

Наши исследования показали, что применение метода акустоупругости позволяет получить распределение пластических деформаций в образце.

В случае, если пластические деформации велики (возможно разрушение металла) величина акустической анизотропии, связанная с пластическими деформациями, значительно превосходит вклад внутренних напряжений. При больших Δa (порядка единиц процентов) можно приближенно считать, что измеренная величина связана только с начальной анизотропией, пластическими деформациями и трещинами.

Измерения на ненагруженной части конструкции или с использованием образцов – свидетелей позволяют определить начальную анизотропию a_0, а для того, чтобы разделить вклад пластических деформаций и растрескивания, нужны дополнительные исследования. Например, у некоторых сплавов алюминия зависимость акустической анизотропии от пластических деформаций становится нелинейной [19 - 21] в области больших пластических деформаций, близких к разрушению. При этом линейная зависимость от внутренних напряжений сохраняется.

Вместе с тем, большая величина, которая получается после вычитания из величины измеренной акустической анизотропии a_0, указывает на сильное растрескивание или на большие пластические деформации. И то и другое является диагностическими признаками близкого разрушения. Поэтому применение метода акустоупругости к диагностике конструкций из атмосферостойких сталей можно считать обоснованным. В наших опытах удалось также диагностировать наличие большой поперечной трещины, от которой происходило дополнительное отражение зондирующего ультразвукового импульса.

Атмосферостойкая сталь показала неожиданно низкую устойчивость к водородной хрупкости. Испытание на водородное растрескивание является стандартным для всех сталей, применяемых в газовой и нефтяной промышленности, в сероводородсодержащих средах, а также для конструкций, работающих в морской воде. Можно констатировать, что этот тест сталь 14ХГНДЦ не прошла, все параметры растрескивания, как минимум, на порядок ниже требований нормативных документов. Атмосферостойкая сталь оказалась даже менее стойкой к водородному растрескиванию, чем широко применяемая для строительства мостов сталь 10ХСНД-2. В отличие от 10ХСНД-2, водородное растрескивание 14ХГНДЦ происходит с образованием тонкой, но очень длинной магистральной трещины примерно посередине прокатанного листа. Фотография трещины приведена на Рисунке. 6.

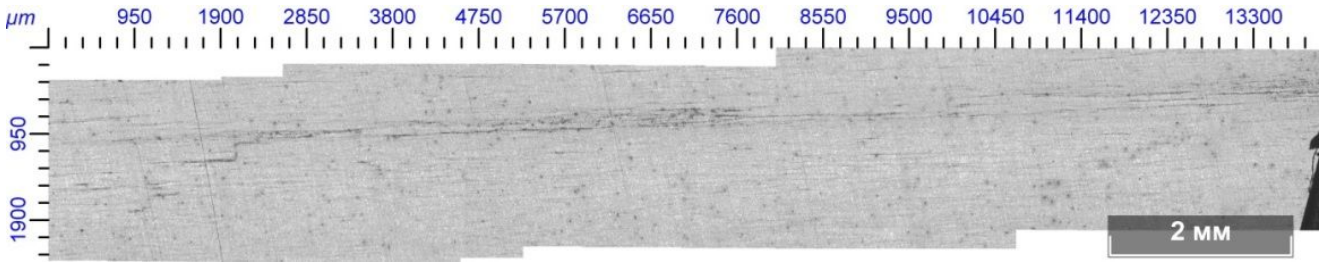

Рисунок 6. Фотография магистральной трещины посередине сечения в образце из стали марки 14ХГНДЦ (увеличение х25)

Полученный нами результат свидетельствует о большой опасности применения конструкций из стали 14ХГНДЦ в средах, содержащих H_2S, в нефтегазовой промышленности и в морской воде. Для исследования этого эффекта целесообразно провести дополнительные испытания всех типов атмосферостойких сталей, которые производятся в России до момента их широкого применения в строительстве.

Опыт производства сталей различных марок позволяет определить приблизительные границы концентраций водорода, при превышении которых со 100% вероятностью начнутся водородные проблемы. Для водородной хрупкости пороговые значения концентрации водорода составляет около 10 млн$^{-1}$, для Крупповой болезни (образование флокенов в прокате) - 4 млн$^{-1}$. В большинстве технических условий на стали различных марок указана верхняя граница допустимой концентрации водорода 2 млн$^{-1}$.

Измеренные нами концентрации – значительно ниже известных пороговых значений. Вместе с тем, разрушения структуры стали, типичные для водородной хрупкости, наблюдаются по всему сечению при

микроскопическом исследовании полированных сечений образцов. Этот парадокс сейчас интенсивно исследуется [22,23]. Установлено, что в образовании трещин и микротрещин участвует диффузно подвижный водород, влияние которого на структуру и прочность сталей фиксируется, начиная с концентраций на уровне 0,1 млн$^{-1}$. Эти исследования пока не вышли на уровень разработки стандартов и для промышленного применения полностью отсутствует метрологическая нормативная база: нет определения диффузно-подвижного водорода; отсутствуют стандартизованные методы его измерения; стандартные образцы и т.д.. Некоторые фирмы (Leco, США, например) уже предлагают «анализаторы диффузно подвижного водорода», но для их применения в промышленности нет никаких оснований.

Необходимо отметить, что конкретные значения допустимых концентраций критически важны для промышленности, так как водородное растрескивание является чрезвычайно опасным внутренним дефектом конструкции, который приводит к ее непредсказуемому хрупкому разрушению и в современных высокопрочных сталях она не диагностируется путем обычного ультразвукового сканирования дефектов. Требуется разработка соответствующих стандартов и метрологической базы. Причем наши опыты показывают, что это необходимо делать в срочном порядке.

Важно отметить, что метод акустоупругости позволяет оценить степень водородного растрескивания. Этот важный результат также может быть непосредственно использован при технической диагностике трубопроводов, мостов и других конструкций.

4. Заключение

Были проведены исследования разрушенных в результате испытаний на многоцикловую усталость образцов из атмосферостойкой стали методом акустоупругости. В области упругих деформаций этот метод стандартизован как способ измерения внутренних напряжений в металлах. Сравнение с результатами численного моделирования показало, что метод дает адекватные результаты в области пластических деформаций.

После определения эмпирических коэффициентов влияния пластические деформации можно измерять методом акустоупругости, используя известную формулу (1) за исключением участков, на которых образовалась система трещин. Для этих участков предложена новая формула (2) зависимости акустической анизотропии от начального текстурирования, напряжений, деформаций и интенсивности растрескивания, которую в дальнейшем необходимо уточнять в части слагаемого, связанного с растрескиванием.

В процессе исследований были проведены тесты атмосферостойкой стали на водородное растрескивание, с измерением концентраций водорода и акустической анизотропии до и после образования системы трещин. Результаты этих исследований позволяют сделать следующие выводы:

- Метод акустоупругости позволяет оценить степень водородного растрескивания.
- Диффузно подвижный водород играет основную роль в образовании трещин как в стали марки 14ХГНДЦ, так и в стали марки 10ХСНД-2. Его критические концентрации на порядок ниже, чем указанные в ТУ предельно допустимые концентрации растворенного водорода (частью которого является диффузно-подвижный). Необходима срочная разработка метрологической базы для его измерения и нормативов на величину предельно допустимой концентрации для различных марок сталей.
- Сталь марки 14ХГНДЦ показала неудовлетворительный результат при стандартном испытании на водородное растрескивание, что не позволяет применять ее в конструкциях, находящихся в контакте с морской водой, сероводородом, водородом и другими водородосодержащими средами.

5. Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (грант № 15 -19 - 00091).

Литература

[1]. СТО 001-2009. Стандарт организации. Защита металлических конструкций мостов от коррозии методом окрашивания. Разработан ОАО ЦНИИС (Глазман Ф.Б., Рояк Г.С., Грановская И.В., Ройтман В.И., Добкин В.С.) Москва: ООО «Группа компаний «Трансстрой». 2009.

[2]. Конюхов А. Д. ., Шуртаков А.К., Харчевников В.П., Шелест А.И., Воробьева Т.Н. Мосты из атмосферостойкой стали // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2011. №. 4. С. 16-20.

[3]. Конюхов А.Д., Шуртаков А.К., Харчевников В.П., Шелест А.И. Мостам из атмосферостойкой стали без окраски - 20 лет. Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. ISSN: 1729-9209 – Том 166, №11. 2012. С. 38-41.

[4]. ГОСТ Р 52890-2007 Контроль неразрушающий. Акустический метод контроля напряжений в материале трубопроводов. Общие требования.

[5]. Никитина Н. Е. Акустоупругость. Опыт практического применения //Н. Новгород.: Талам. 2005. 208 с.

[6]. Hughes D. S., Kelly J. L. Second-order elastic deformation of solids. Physical review. 1953. Vol 92. No 5. p.1145.

[7]. Hirao M., Pao Y. H. Dependence of acoustoelastic birefringence on plastic strains in a beam. The Journal of the Acoustical Society of America. 1985. Vol 77. No 5. Pp. 1659-1664.

[8]. Pao Y. H. Theory of acoustoelasticity and acoustoplasticity. Solid mechanics research for quantitative non-destructive evaluation. Netherlands: Springer, 1987. Pp. 257-273.

[9]. Pao Y. H., Wu T. T., Gamer U. Acoustoelastic Birefringences in Plastically Deformed Solids: Part I—Theory. Journal of Applied Mechanics. 1991. Vol 58. No 1. Pp. 11-17.

[10]. Kobayashi M. Theoretical study of acoustoelastic effects caused by plastic anisotropy growth. International journal of plasticity. 1987. Vol 3. No 1. Pp. 1-20.

[11]. Kobayashi M. Ultrasonic nondestructive evaluation of microstructural changes of solid materials under plastic deformation—Part I. Theory. International Journal of Plasticity. 1998. V 14. No 6. Pp. 511-522.

[12]. Kobayashi M. Ultrasonic nondestructive evaluation of microstructural changes of solid materials under plastic deformation—Part II. Experiment and simulation. International Journal of Plasticity. 1998. Vol 14. No. 6. Pp. 523-535.

[13]. Nikitina N. Y., Kamyshev A. V., Kazachek S. V. The application of the acoustoelasticity method for the determination of stresses in anisotropic pipe steels. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2015. T. 51. №. 3. C. 171-178.

[14]. Никитина Н.Е., Современное состояние и перспективы развития ультразвукового метода исследования напряженного состояния трубопроводов // Вестник Нижегородского университета им. НИ Лобачевского. №4-5, 2011. С. 2395-2397.

[15]. Камышев А.В., Миронов Н.А., Пасманник Л.А., Модестов В.С.. Пивков А.В. Метод расчетно-инструментальной оценки напряженно-деформированного состояния элементов трубопроводов с использованием силовых граничных условий // Контроль. Диагностика №9, 2015. С. 45-51

[16]. Муравьев В.В., Зуев Л.Б., Комаров К.Л., Скорость звука и структура сталей и сплавов. Новосибирск:Наука. Сиб. издат. фирма, 1996. 184с.

[17]. Мотова Е.А., Никитина Н.Е., Тарасенко Ю.П., О возможности диагностики компрессорных лопаток по параметрам затухания и скорости ультразвука // Проблемы машиностроения и надежности машин. №4, 2013. С. 88-95.

[18]. NACE Standard TM0284-2003 Test Method. Evaluation of Pipeline and Pressure Vessel Steels for Resistance to Hydrogen-Induced Cracking

[19]. Беляев А.К., Полянский В.А., Грищенко А.И., Лобачев А.М., Мансырев Д.И., Модестов В.С., Пивков А.В., Полянский В.А., Штукин Л.В., Третьяков Д.А., Использование акустической анизотропии для технической диагностики при больших пластических деформациях // Сборник материалов X Международной конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» Екатеринбург, 16-20 мая 2016г. ISBN 978-5-7691-2439-6, 2016. С.94

[20]. Беляев А.К., А.М. Лобачев А.М., Модестов В.С., Пивков А.В., Полянский В.А., Семенов А.С., Третьяков Д.А., Штукин Л.В., Оценка величины пластических деформаций с использованием акустической анизотропии // Механика твердого тела №. 5, 2016 С.124-131.

[21]. Belyaev A. K., Polyanskiy V. A., Lobachev A. M., Modestov V. S., Semenov A. S., Grishchenko A. I. , Yakovlev Y. A., Shtukin L. V., Tretyakov D. A., Propagation of sound waves in stressed elasto-plastic material, Proceedings of the International Conference "Days on Diffraction 2016", St. Petersburg, 2016, Pp. 56–61.

[22]. Nie Y., Kimura Y., Inoue T., Yin F., Akiyama E., Tsuzaki K. Hydrogen embrittlement of a 1500-mpa tensile strength level steel with an ultrafine elongated grain structure. Metallurgical and Materials Transactions A, Vol 43, 2012. Pp. 1670-1687.

[23]. Belyaev A.K., Polyanskiy A.M., Polyanskiy V.A., Sommitsch C., Yakovlev Y.A. Multichannel diffusion vs TDS model on example of energy spectra of bound hydrogen in 34CrNiMo6 steel after a typical heat treatment. International Journal of Hydrogen Energy, Vol 41, No 20, 2016. Pp. 8627-8634.

Evaluation of stress-strain state and cracking of weatherproof structural steel by acoustoelasticity

E.L. Alekseeva[1], A.A. Alhimenko [2], A.K. Belyaev [3], A.M. Lobachev [4], V.A. Polyanskiy [5,*], G.N. Rostovykh [6], D.A. Tretyakov [7], L.V. Shtukin [8], Y.A. Yakovlev [9]

[1-5,7-9]Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

[6] Scientific & Research Institute of Bridges and Defectoscopy (SRI of Bridges), 29, building 8, Pulkovskoye highway, St. Petersburg, 196140, Russia

ARTICLE INFO

scientific article

doi: 10.18720/CUBS.51.3

Articlehistory

Received 25.10.2016

Keywords

weatherproof steels;
hydrogen-induced cracking;
non-destructive testing;
acoustic anisotropy;
plastic deformation;

ABSTRACT

Weatherproof steels are highly resistant to various forms of corrosion. Their long-term tests have shown that constructions of these steels can be used in conditions of the Russian climate for years without significant corrosion damage even without any protection. They are considered to be the most promising for the construction of bridges and overpasses due to the high corrosion resistance, strength and relative cheapness. Therefore, the problem of non-destructive testing of structural elements of these steels is very important. The article presents the results of the study of the acoustic anisotropy distribution in samples of steel 14HGNDC after cyclic mechanical loading. The results of HIC test and measurements of the acoustic anisotropy caused by cracking are described. A significant influence of hydrogen cracks to the acoustic anisotropy was detected. An important result is the low resistance of the steel 14HGNDC to the cracking in a hydrogen sulfide environment. This introduces strong limitations in its use in constructions located in the sea and in the coastal zone.

Corresponding author:

1. +7(911)2503477, e.alexeeva@onti.spbstu.ru (Ekaterina Alekseeva, Engineer)
2. +7(921)9586435, 9586435@mail.ru (Aleksey Alhimenko, Director of Joint Institute of Science and Technology SPbSPU)
3. +7(921)4100333, vice.ipme@gmail.com (Alexander Belyaev, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor)
4. +7(921)5601239, lobachev_am@spbstu.ru (Alexandr Lobachev, Assistant)
5.* *+7(921)7480637, vapol@mail.ru* (Vladimir Polyanskiy, Dr. Sci., Professor)
6. +7(812)4136631, _gregg@rambler.ru (Gregory Rostovykh, Senior Researcher)
7. +7(962)7076338, dmitry.tretyakov93@yandex.ru (Dmitry Tretyakov, Student)
8. +7(965)0490578, lvtvsh4749@gmail.com (Lev Shtukin, Ph.D. (Phys.–Math.), Associate Professor)
9. +7(921)7480637, yura.yakovlev@gmail.com (Yuriy Yakovlev, Ph.D. (Phys.–Math.), Senior Researcher)

Алексеева Е.Л., Альхименко А.А., Беляев А.К., Лобачев А.М, Полянский В.А., Ростовых Г.Н.,Третьяков Д.А., Штукин Л.В., Яковлев Ю.А., Оценка напряженно-деформированного состояния и растрескивания атмосферостойкой конструкционной стали методом акустоупругости / Alekseeva E.L., Alhimenko A.A., Belyaev A.K., Lobachev A.M., Polyanskiy V.A., Rostovykh G.N., Tretyakov D.A., Shtukin L.V., Yakovlev Y.A. Evaluation of stress-strain state and cracking of weather-proof structural steel by acoustoelasticity ©

References

[1]. Standard of Organization STO 001-2009. Standart organizatsii. Zashchita metallicheskikh konstruktsiy mostov ot korrozii metodom okrashivaniya. [Standard of Organization. Protection of metal constructions of bridges from corrosion staining method] Razrabotan OAO TsNIIS (Glazman F.B., Royak G.S., Granovskaya I.V., Roytman V.I., Dobkin B.C.) Moskva: OOO «Gruppa kompaniy «Transstroy». 2009.

[2]. Konyukhov A. D. ., Shurtakov A.K., Kharchevnikov V.P., Shelest A.I., Vorobyeva T.N. Mosty iz atmosferostoykoy stali [Bridges of weather-proofing steel]. Vestnik nauchno-issledovatelskogo instituta zheleznodorozhnogo transporta. No 4, 2011, Pp.16-20.

[3]. Konyukhov A.D., Shurtakov A.K., Kharchevnikov V.P., Shelest A.I. Mostam iz atmosferostoykoy stali bez okraski - 20 let [Bridges of weather-proofing steel without painting - 20 years]. Stroitelnyye materialy, oborudovaniye, tekhnologii XXI veka. ISSN: 1729-9209 – Vol166, No 11. 2012. Pp. 38-41.

[4]. Russian State Standard GOST R 52890-2007 Kontrol nerazrushayushchiy. Akusticheskiy metod kontrolya napryazheniy v materiale truboprovodov. Obshchiye trebovaniya [Non-destructive testing. Acoustic voltage control method in the piping material. General requirements]

[5]. Nikitina N. Ye. Akustouprugost. Opyt prakticheskogo primeneniya [Acoustoelasticity. Practical experience]. N. Novgorod.: Talam. – 2005. 208 p.

[6]. Hughes D. S., Kelly J. L. Second-order elastic deformation of solids. Physical review. Vol 92, No 5, 1953, p.1145.

[7]. Hirao M., Pao Y. H. Dependence of acoustoelastic birefringence on plastic strains in a beam. The Journal of the Acoustical Society of America. Vol 77. No 5, 1985, Pp. 1659-1664.

[8]. Pao Y. H. Theory of acoustoelasticity and acoustoplasticity. Solid mechanics research for quantitative non-destructive evaluation. Netherlands: Springer, 1987, Pp. 257-273.

[9]. Pao Y. H., Wu T. T., Gamer U. Acoustoelastic Birefringences in Plastically Deformed Solids: Part I—Theory. Journal of Applied Mechanics. Vol 58, No 1, 1991, Pp. 11-17.

[10]. Kobayashi M. Theoretical study of acoustoelastic effects caused by plastic anisotropy growth. International journal of plasticity. Vol 3, No 1, 1987, Pp. 1-20.

[11]. Kobayashi M. Ultrasonic nondestructive evaluation of microstructural changes of solid materials under plastic deformation—Part I. Theory. International Journal of Plasticity. Vol 14. No 6, 1998, Pp. 511-522.

[12]. Kobayashi M. Ultrasonic nondestructive evaluation of microstructural changes of solid materials under plastic deformation—Part II. Experiment and simulation. International Journal of Plasticity. Vol 14. No. 6. 1998, Pp. 523-535.

[13]. Nikitina N. Y., Kamyshev A. V., Kazachek S. V. The application of the acoustoelasticity method for the determination of stresses in anisotropic pipe steels. Russian Journal of Nondestructive Testing. Vol. 51. No. 3, 2015, Pp. 171-178.

[14]. Nikitina N.Ye., Sovremennoye sostoyaniye i perspektivy razvitiya ultrazvukovogo metoda issledovaniya napryazhennogo sostoyaniya truboprovodov [Current state and prospects of development of ultrasonic method for studying the stressed state of pipelines]. Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. NI Lobachevskogo. No 4-5, 2011. Pp. 2395-2397.

[15]. Kamyshev A.V., Mironov N.A., Pasmannik L.A., Modestov V.S.. Pivkov A.V. Metod raschetno-instrumentalnoy otsenki napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya elementov truboprovodov s ispolzovaniyem silovykh granichnykh usloviy [Method of settlement and instrumental evaluation of the stress-strain state of pipelines elements using the power of boundary conditions]. Kontrol. Diagnostika No 9, 2015. Pp. 45-51

[16]. Muravyev V.V., Zuyev L.B., Komarov K.L., Skorost zvuka i struktura staley i splavov. [The speed of sound and structure of steels and alloys] Novosibirsk:Nauka. Sib. izdat. firma, 1996. 184p.

[17]. Motova Ye.A., Nikitina N.Ye., Tarasenko Yu.P., O vozmozhnosti diagnostiki kompressornykh lopatok po parametram zatukhaniya i skorosti ultrazvuka On the possibility of the diagnosis of compressor blades in the parameters of attenuation and ultrasound velocity]. Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin. No 4, 2013. Pp. 88-95.

[18]. NACE Standard TM0284-2003 Test Method. Evaluation of Pipeline and Pressure Vessel Steels for Resistance to Hydrogen-Induced Cracking

[19]. Belyayev A.K., Polyanskiy V.A., Grishchenko A.I., Lobachev A.M., Mansyrev D.I., Modestov V.S., Pivkov A.V., Polyanskiy V.A., Shtukin L.V., Tretyakov D.A., Ispolzovaniye akusticheskoy anizotropii dlya tekhnicheskoy diagnostiki pri bolshikh plasticheskikh deformatsiyakh [The use of acoustic anisotropy for technical diagnostics for large plastic deformations]. Sbornik materialov X Mezhdunarodnoy konferentsii «Mekhanika, resurs i diagnostika materialov i konstruktsiy» Yekaterinburg, 16-20 maya 2016g. ISBN 978-5-7691-2439-6, 2016. p.94

[20]. Belyayev A.K., A.M. Lobachev A.M., Modestov V.S., Pivkov A.V., Polyanskiy V.A., Semenov A.S., Tretyakov D.A., Shtukin L.V., Otsenka velichiny plasticheskikh deformatsiy s ispolzovaniyem akusticheskoy anizotropii .[Estimation of the plastic deformation using acoustic anisotropy]. Mekhanika tverdogo tela No 5, 2016 Pp.124-131.

[21]. Belyaev A. K., Polyanskiy V. A., Lobachev A. M., Modestov V. S., Semenov A. S., Grishchenko A. I. , Yakovlev Y. A., Shtukin L. V., Tretyakov D. A., Propagation of sound waves in stressed elasto-plastic material, Proceedings of the International Conference "Days on Diffraction 2016", St. Petersburg, 2016, Pp. 56–61.

[22]. Nie Y., Kimura Y., Inoue T., Yin F., Akiyama E., Tsuzaki K. Hydrogen embrittlement of a 1500-mpa tensile strength level steel with an ultrafine elongated grain structure. Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 43, 2012. Pp. 1670-1687.

[23]. Belyaev A.K., Polyanskiy A.M., Polyanskiy V.A., Sommitsch C., Yakovlev Y.A. Multichannel diffusion vs TDS model on example of energy spectra of bound hydrogen in 34CrNiMo6 steel after a typical heat treatment. International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 41, No. 20, 2016. Pp. 8627-8634.

Алексеева Е.Л., Альхименко А.А., Беляев А.К., Лобачев А.М, Полянский В.А., Ростовых Г.Н.,Третьяков Д.А., Штукин Л.В., Яковлев Ю.А. Оценка напряженно-деформированного состояния и растрескивания атмосферостойкой конструкционной стали методом акустоупругости // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. №12 (51). С. 33-44.

Alekseeva E., Alhimenko A., Belyaev A., Lobachev A., Polyanskiy V., Rostovykh G., Tretyakov D., Shtukin L., Yakovlev Y. Evaluation of stress-strain state and cracking of weather-proof structural steel by acoustoelasticity. Construction of Unique Buildings and Structures, 2016, 12 (51), Pp. 33-44. (rus)