

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621.311.25:621.039.5

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
МЕТАЛЛА ЭЛЕМЕНТОВ И ДЕТАЛЕЙ ТРУБОПРОВОДОВ АЭС

© 2020 А.К. Адаменков*, И.Н. Веселова**

*Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Ростовская атомная станция», Волгодонск, Ростовская обл., Россия

**Волгодонский инженерно-технический институт – филиал научного исследовательского ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл., Россия

В рамках проведения экспериментальной оценки напряженно-деформированного состояния элементов трубопроводов АЭС с помощью приборов на основе магнитоанизотропного метода, были получены критерии параметров разности главных механических напряжений (РГМН), характеризующие повышенную вероятность развития эрозионно-коррозионного износа (ЭКИ). Установлено, что высокий уровень значений РГМН в комплексе с результатами обработки измерений по параметрам первой производной и градиента РГМН, зависящие от шага сканирования в узлах координатной сетки, являются дополнительными критериями для обнаружения потенциально опасной области развития ЭКИ.

Ключевые слова: магнитоанизотропия, механические напряжения, градиентный подход, производная напряжений, локальные участки.

Поступила в редакцию 27.10.2020

После доработки 19.11.2020

Принята к публикации 24.11.2020

В работе «Оценка развития эрозионно-коррозионного износа с помощью метода измерения магнитной анизотропии» [1] показано, что:

1. В результате обследования участков трубопроводов турбинного отделения, методом магнитной анизотропии (МА), возможно выявление локально напряженных зон, которые образуются при утонении стенки, вызванным вероятным ЭКИ.

2. Диагностирование участков трубопроводов, подверженным ЭКИ может являться дополнительной контрольной операцией, повышающей достоверность оценки эксплуатационной надежности трубопроводов АЭС.

В настоящей работе представлены результаты дальнейших исследований в данной области, проводимые на трубопроводах энергоблоков АЭС.

Один из критериев, характеризующих отсутствие ЭКИ трубопроводов при проведении гидроиспытаний – отсутствие видимых остаточных деформаций на поверхности объекта после снятия нагрузки. Остаточные деформации являются следствием пластических, которые происходят в местах локального утонения стенки трубопровода. С одной стороны, согласно условию пластичности Треска-Сен-Венана, пластическая деформация наступит, когда максимальная разность главных нормальных напряжений достигнет величины сопротивления деформации [2, 3]. С другой – согласно энергетической теории пластичности Губера-Мизеса [4, 5], пластическая деформация начинается, когда количество удельной потенциальной энергии формоизменения, определяемой градиентом напряжений, и накопленной деформированным элементом, достигает своего предельного значения.

Действующие в настоящее время нормативно-технические документы в атомной энергетике [6, 7] устанавливают различные подходы к оценке для расчетов на

прочность трубопроводов АЭС в зависимости от величины дефектного участка. При этом оцениваются локальные дефекты, которыми характеризуется ЭКИ трубопроводов.

При оценке напряженно-деформированного состояния металлоконструкций методом МА, основным диагностическим признаком является оценка изменения разности главных механических напряжений [8, 9] в различных областях конструкций.

Для оценки прочности в локальных зонах, предлагается выполнять оценку НДС такого участка с точки зрения градиентного подхода [10], в соответствии с которым локальная прочность материала предполагается зависящей от размера зоны концентрации напряжений. Если размеры зоны концентрации сопоставимы с толщиной материала, их влияние на локальную прочность становится заметным.

Градиент, в свою очередь, определяется производной вектора РГМН по его направлению, и является вектором показывающим направление наискорейшего изменения скалярного поля напряжений в области их концентрации. Локальные напряжения, таким образом, зависят от локальной неравномерности поля напряжений в окрестности рассматриваемой области концентратора механических напряжений и представительного размера неоднородности материала.

В работах [11, 12] показаны возможности применения метода МА и использование общих критериев МА для оценки повреждаемости сварных соединений.

В данной статье для повышения достоверности оценки НДС при ЭКИ, предлагается локальную неравномерность распределения напряжений характеризовать оценкой следующих законов изменений параметров поперек образующей стенки трубопровода:

- разности главных механических напряжений;
- градиента ГРМН;
- производной РГМН по направлению образующей.

В результате обследования участков трубопроводов методом МА построены и проанализированы картограммы РГМН, градиента РГМН и производной «dY» по поперечному направлению трубопровода.

Для более детального анализа ПО «Stressvision Expert» при построении картограмм в формате 2D позволяет выполнять оценку распределения значений по выбранным линейным сечениям в виде графиков (рис. 1).

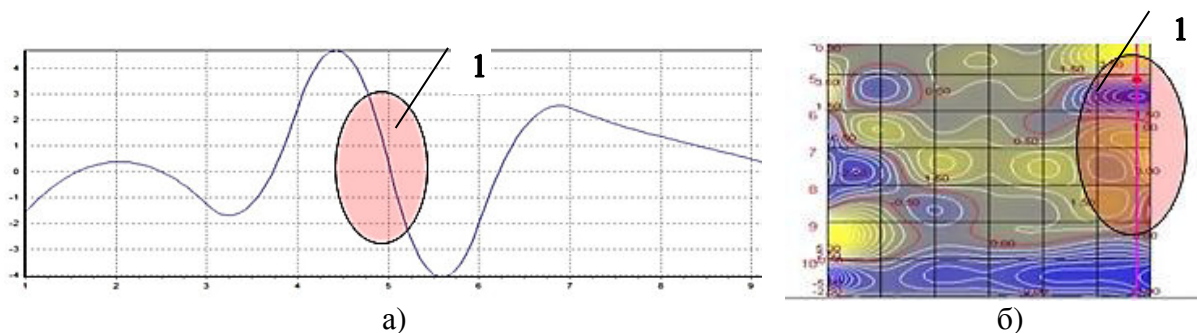


Рисунок 1 – Распределение производной по оси Y между 6-7 линиями: а) производная РГМН по оси «Y» (образующая трубопровода); б) – фрагмент карты ГРМН с зоной локальных напряжений – 1 [Distribution of the derivative along the Y-axis between 6-7 lines: a) the derivative of the difference of the main mechanical stresses along the Y-axis (the generatrix of the pipeline); b) – a fragment of the map of the difference between the main mechanical stresses with a zone of local stresses – 1]

Зафиксировано, что в зонах локального увеличения значений РГМН их производная по оси «Y» изменяется с максимальной до минимальной величины, при этом проходя через ноль.

При последующей оцифровке построенных графиков распределения они представлены в виде зависимости величины параметра от координаты зоны. Полученные данные стандартизируются, строится совместный график зависимости

стандартизированных значений РГМН, производной РГМН по оси «Y» и градиента РГМН от координат зоны (рис. 2).

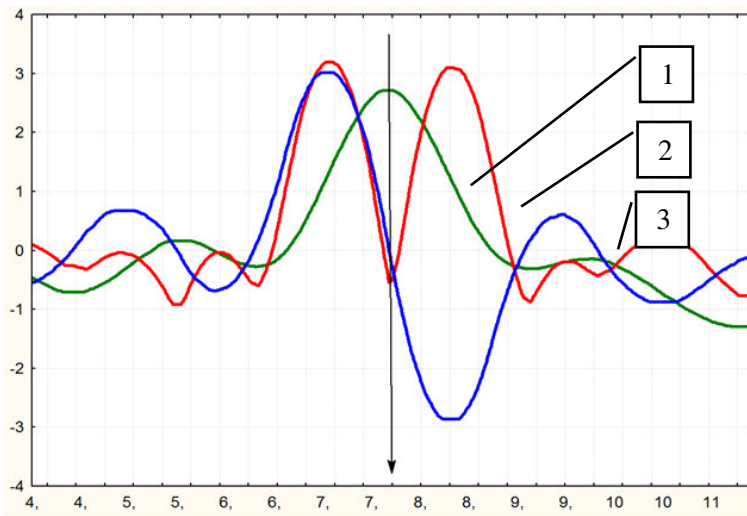


Рисунок 2 – Совместный график зависимости стандартизированных значений РГМН, производной РГМН по оси «Y» и градиента РГМН от координат зоны 6503 (1 – РГМН; 2 – градиент; 3 – D_y) [Joint graph of the dependence of the standardized values of the difference between the main mechanical stresses, the derivative of the difference between the main mechanical stresses along the "Y" axis and the gradient of the difference between the main mechanical stresses on the coordinates of the zone 6503 (1 – difference between the main mechanical stresses; 2 – gradient; 3 – D_y)]

Анализ совместного графика позволил сформировать новые критерии фиксации потенциально опасной зоны развития ЭКИ, которое заключается в следующем: значение РГМН в данном сечении принимает свое максимальное значение, в этом же сечении значение градиента РГМН – минимальное, при этом максимумы располагаются по границам локально-деформированной зоны, а производная РГМН по оси «Y» проходит через нулевое значение и достигает максимального и минимального значения на границах зоны. В выполненных ранее исследованиях [11, 12] показано, что при использовании метода МА для оценки повреждаемости сварных соединений законы изменения параметров другие.

Фиксирование потенциально опасных зон развития ЭКИ выполняется согласно установленному ранее [11, 12] критерию отношения максимального значения РГМН к минимальному значению РГМН, которое больше или равно 2. При обработке данных обследования были определены зоны соответствующие критерию. Для рассмотрения выбран глубокий слой (0-6 мм), так как он является внутренней поверхностью трубопровода, контактирующей с рабочей средой.

Указанному критерию соответствуют следующие зоны: 6506, 6503, 6502 и 6500. Построение совместных графиков значений РГМН, производной РГМН по оси «Y» и градиента РГМН от координат зоны производилось и для остальных выбранных зон.

Например, зона 6503. Координаты локально напряженной зоны – 5 линия, точка 8, со следующими максимальными значениями стандартизированных величин (табл. 1, см. рис. 2).

Таблица 1 – Максимальные значения зоны 6503 [Maximum zone values 6503]

РГМН	Градиент РГМН	Производная РГМН по оси «Y»
2,71	3,19	3,01

Аналогичные законы изменения зафиксированы и в остальных, отмеченных выше, зонах.

Графическая интерпретация полученных данных представлена на диаграмме (рис. 3). Кластерный анализ данных позволяет сделать вывод о наличии наиболее потенциально опасных зон, подверженных ЭКИ – 65503, 65518, 65533. Выполненные впоследствии измерения толщины обследованных МА участков, показали, что указанные выше зоны характеризуются меньшей толщиной, по сравнению с остальными зонами. При этом, предельный критерий уменьшений толщины не достигнут.

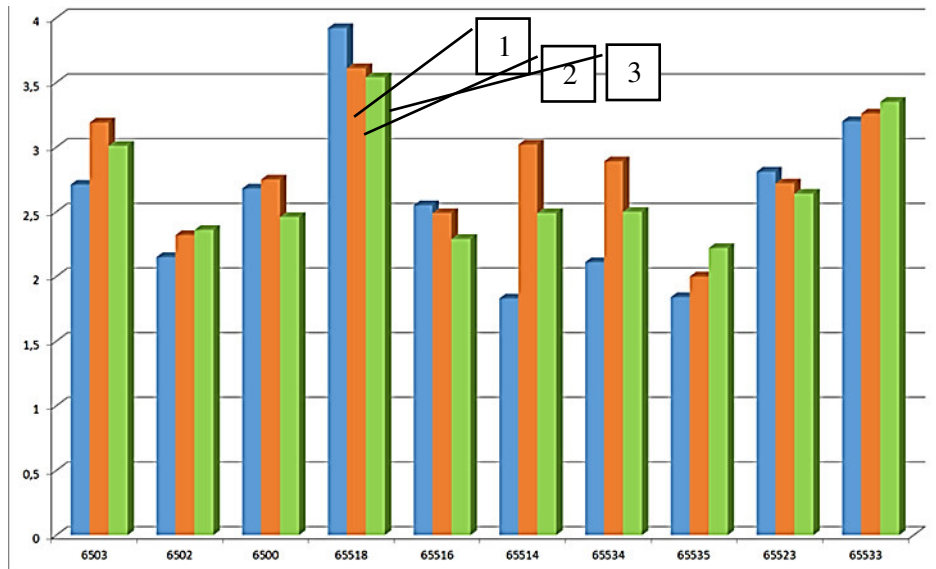


Рисунок 3 – Диаграмма характеристик критериев зон (1 – РГМН; 2 – градиент; 3 – D_y) [Diagram of zone criteria characteristics (1 – difference between the main mechanical stresses; 2 – gradient; 3 – D_y)]

Выводы:

1. Определены критерии для достоверной фиксации потенциально опасной зоны развития ЭКИ:

- значение РГМН в сечении зоны принимает свое максимальное значение;
- значение градиента РГМН – минимальное, при этом максимумы располагаются по границам зоны;
- производная РГМН по оси «Y» проходит через нулевое значение и достигает максимального и минимального значения на границах зоны.

2. Определены локальные зоны, характеризующиеся изменениями параметров МА.

3. Все остальные обследованные участки не имеют ярко выраженных концентраторов напряжений и характеризуются достаточно равномерным распределением уровней разности главных механических напряжений.

4. НДС металла всех обследованных участков трубопроводов характеризуется отсутствием критериев предельного состояния.

5. Зоны с выявленными вероятными локальными участками утонения, требуют более детального анализа при дальнейшем обследовании с использованием других методов неразрушающего контроля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адаменков, А. К. Оценка развития эрозивно-коррозионного износа с помощью метода измерения магнитной анизотропии / А. К. Адаменков, И. Н. Веселова, В. Я. Шпицер // Глобальная ядерная безопасность. – 2019. – № 1 (30). – С. 113-119.

2. Александров, А. В. Сопrotивление материалов / А. В. Александров. – Москва : Высшая школа, 2003. – С. 380-383.
3. Конакова, М. А. Анализ влияния различных факторов на аварийные разрушения МГ / М. А. Конакова, А. А. Волков, А. Я. Яковлев, С. В. Романцов // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2007. – № 6. – С. 7-12.
4. Hosford, W. F. Mechanical Behavior of Materials / W. F. Hosford. – New-York: Cambridge University Press, 2005. – 342 p.
5. Соснин, О. В. К обоснованию энергетического варианта теории ползучести и длительной прочности металлов / О. В. Соснин, А. Ф. Никитенко, Б. В. Горев // Прикладная механика и техническая физика. – 2010. – Т. 51, № 4. – С. 188-196.
6. ТПРГ 1.1.3.09.1515-2018. Контроль состояния основного металла, сварных соединений и наплавленных поверхностей оборудования, трубопроводов и других элементов атомных станций с реакторной установкой ВВЭР-1000 в проектном сроке эксплуатации : типовая программа / Введена в действие приказом АО «Концерн Росэнергоатом» от 16.01.2019 №9/44-П // Разработана АО «ВНИИАЭС». – Москва : АО «Российский концерн по производству электрической и тепловой энергии на атомных станциях», 2018.
7. РД ЭО 1.1.2.11.0571-2015 Нормы допускаемых толщин стенок элементов трубопроводов из углеродистых сталей при эрозионно-коррозионном износе : руководящий документ / Введен в действие приказом АО «Концерн Росэнергоатом» от 06.08.2015 №9/876-П // Разработан АО «ВНИИАЭС». – Москва : АО «Российский концерн по производству электрической и тепловой энергии на атомных станциях», 2015.
8. Жуков, С. В. Способ определения механических напряжений и устройство для его осуществления. № 2001106509/28 : заявл. 05.03.2001; опубл. 27.12.2002 // С. В. Жуков, В. С. Жуков, Н. Н. Копица // Патент № 2195636. РФ, МПК G01L1/12 (2006.01).
9. Матвиенко, Ю. Г. Развитие моделей и критериев разрушения в современных проблемах прочности и живучести / Ю. Г. Матвиенко // Вестник научно-технического развития. – 2014. – № 7(83). – С. 48-51.
10. Новопашин М. Д. Градиентные критерии предельного состояния / М. Д. Новопашин, С. В. Сукнев // Вестник СамГУ. Естественнонаучная серия. – 2007. – № 4(54). – С. 316-319.
11. Адаменков, А. К. Обеспечение контроля термомеханической нагруженности узла приварки коллектора теплоносителя к патрубку Ду1200 парогенераторов ПГВ-1000 / А. К. Адаменков, И. Н. Веселова, И. В. Малахов // Глобальная ядерная безопасность. – 2015. – № 4(17). – С. 84-89.
12. Адаменков, А. К. Оценка эффективности эксплуатации устройства для снятия напряжений в коллекторе парогенератора ПГВ-1000 / А. К. Адаменков, И. Н. Веселова, И. В. Малахов // Атомная энергия. – 2017. – Том 123, № 2. – С. 79-80.

REFERENCES

- [1] Adamenkov A.K., Veselova I.N., Shpicer V.Y. Ocenka razvitiya erozionno-korozionnogo iznosa s pomoshchi metoda izmereniya magnitnoy anizotropii [Assessment of the Development of Erosion and Corrosion Wear Using the Method of Measuring Magnetic Anisotropy]. Globalnaya yadernaya bezopasnost [Global Nuclear Safety]. 2019. №1(30). P. 113-119 (in Russian).
- [2] Aleksandrov A.V. Soprotivlenie materialov [Strength of Materials]. Moskva: Vysshaya shkola [Moscow: Higher School]. 2003. P. 380-383 (in Russian).
- [3] Konakova M.A., Volkov A.A., Yakovlev A.Y., Romancov C.V. Analiz vliyaniya razlichnikh faktorov na avariinие razrusheniya MG [Analysis of the Impact of Various Factors on the Emergency Destruction of MG]. Remont, vosstanovlenie, modernizaciya [Repair, Restoration, Modernization]. 2007. №6. P.7-12 (in Russian).
- [4] Hosford W.F. Mechanical Behavior of Materials. New-York: Cambridge University Press, 2005. 342 p.
- [5] Sosnin O.V., Nikitenko A.F., Gorev B.V. K обоснованию энергетического варианта теории ползучести и длительной прочности металлов [To Substantiate the Energy Version of the Theory of Creep and Long-Term Strength of Metals]. Prikladnaya mekhanika i tehniceskaya fizika [Applied Mechanics and Technical Physics]. 2010. T.51, №4. P. 188-196 (in Russian).
- [6] ТПРГ 1.1.3.09.1515-2018. Kontrol sostoyaniya osnovnogo metalla, svarnykh soedinenii i naplavlennykh poverkhnostei oborudovaniya, truboprovodov i drugikh elementov atomnykh stantsii s reaktornoй ustanovkoi VVER-1000 v proektnom sroke ekspluatatsii. Tipovaya programma / Vvedena v deistvie prikazom AO «Kontsern Rosenergoatom» ot 16.01.2019 №9/44-P // Razrabotana AO «Vserossiiskii nauchno-issledovatel'skii institut po ekspluatatsii atomnykh elektrostantsii». Moskva. AO «Rossiiskii kontsern po proizvodstvu elektricheskoi i teplovoi energii na atomnykh stantsiyakh» [Monitoring the Condition of the Base Metal, Welded Joints and Weld

- Coated Surfaces of Equipment, Pipelines and Other Elements of Nuclear Power Plants with a WWER-1000 reactor in the Design Life: Standard Program / Enacted by order of Rosenergoatom Concern JSC dated 16.01.2019 No.9/44-P // Developed by JSC VNIIAES. Moscow: JSC Russian Concern for the Production of Electric and Thermal Energy at Nuclear Power Plants]. 2018 (in Russian).
- [7] RD EO 1.1.2.11.0571-2015 Normy dopuskaemykh tolshchin stenok elementov truboprovodov iz uglerodistykh staley pri erozionno-korroziionnom iznose. Rukovodyashchii dokument / Vveden v deistvie prikazom AO «Kontsern Rosenergoatom» ot 06.08.2015 №9/876-P // Razrabotan AO «Vserossiiskii nauchno-issledovatel'skii institut po ekspluatatsii atomnykh elektrostantsii». Moskva. AO «Rossiiskii kontsern po proizvodstvu elektricheskoi i teplovoi energii na atomnykh stantsiyakh» [Standards for Permissible Wall Thicknesses of Pipeline Elements Made of Carbon Steel in Case of Erosion and Corrosion Wear: a guideline / Enacted by order of Rosenergoatom Concern JSC dated 06.08.2015 No.9/876-P // Developed by JSC VNIIAES. Moscow: JSC Russian Concern for the Production of Electric and Thermal Energy at Nuclear Power Plants]. 2015 (in Russian).
- [8] Zhukov S.V., Zhukov V.S., Kopitsa N.N. Patent RF № 2195636. Russian Federation, MPK G01L1/12 (2006.01). Sposob opredeleniia mekhanicheskikh napriazhenii i ustroistvo dlia ego osushchestvleniia [Method for Determining Mechanical Stresses and a Device for its Implementation]. № 2001106509/28 : zayav 05.03.2001: opubl. 27.12.2002/ (in Russian).
- [9] Matvienko U.G. Razvitie modelei i kriteriev razrusheniya v sovremennikh problemakh prochnosti i zhivuchesti [Development of Fracture Models and Criteria in Modern Problems of Strength and Survivability]. Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya [Bulletin of Scientific and Technical Development]. 2014. №7(83). P.48-51 (in Russian).
- [10] Novopashin M.D., Suknev S.V. Gradientnye kriterii predelnogo sostoiianiia [Gradient Limit State Criteria]. Vestnik SamGU. Estestvennonauchnaia seriia [SamSU Bulletin. Natural Science Series]. 2007. № 4(54). P. 316-319 (in Russian).
- [11] Adamenkov A.K., Veselova I.N., Malakhov I.V. Obespechenie kontrolya termomekhanicheskoy nagruzhennosti uzla privarki kollektora teplonositelya k patrubku Du1200 parogeneratorov PGV-1000 [Thermomechanical Stress Loading Monitoring of Welded Assembly of the Coolant Header of the Nozzle d1200 of Steam Generator PGV-1000]. Globalnaya yadernaya bezopasnost' [Global nuclear safety]. 2015. № 4(17). P. 84-89. (in Russian).
- [12] Adamenkov A.K., Veselova I.N., Malakhov I.V. Ocenka effektivnosti ekspluatatsii ustroistva dlya snyatiya napryazhenii v kollektore parogeneratora PGV-1000 [Evaluation of the Efficiency of Operation for Device to Relieve Stresses in the Progenerator's PGV-1000 Collector]. Atomnaya energiya [Atomic Energy]. 2017. № 2. P. 79-80 (in Russian).

Assessment of Stress-strain State of NPP Pipeline Metal Parts and Elements

A.K. Adamenkov^{*1}, I.N. Veselova^{**2}

**Rostov nuclear power plant, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360*

***Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI»
Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360*

¹ORCID iD 0000-0001-7342-0231

WoS Researcher ID: O-1921-2018

e-mail: anri_61@mail.ru

²ORCID iD 0000-0001-5867-5690

WoS Researcher ID: M-1893-2018

e-mail: INVeselova@mail.ru

Abstract – As part of the experimental assessment of the stress-strain state of pipeline elements at the NPP using devices based on the magnetoanisotropic method, the criteria for the parameters of the main mechanical stress difference characterizing the increased probability of erosion and corrosion wear were obtained. It is determined that the high level of the main mechanical stress difference values in combination with the results of processing measurements on the parameters of the first derivative and the gradient of the main mechanical stress difference, depending on the scanning step in the grid nodes, are additional criteria for detecting a potentially dangerous area of erosion and corrosion wear.

Keywords: magnetoanisotropy, mechanical stress, gradient approach, derivative of stresses, local areas.