

УДК 620.19: 621.039.5

<https://doi.org/10.26583/gns-2023-04-06>

EDN TRKSTY



**Оценка метода измерения параметров магнитной анизотропии  
для возможности контроля развития эрозионно-коррозионного  
износа оборудования**

**A.K. Адаменков<sup>1</sup> ID, И.Н. Веселова<sup>2</sup> ID**

<sup>1</sup>АО «Атомстройэкспорт», г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Волгодонский инженерно-технический институт – филиал научного исследовательского ядерного университета  
«МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Россия  
 INVeselova@mail.ru

**Аннотация.** Представлены результаты дальнейших исследований в области оценки развития эрозионно-коррозионного износа (ЭКИ) элементов трубопроводов с помощью магнитно-анизотропного метода контроля напряженно-деформированного состояния ферромагнитного материала. Проведенные исследования показали, что регистрируемые параметры магнитно-анизотропного метода, такие как разность главных механических напряжений (РГМН), позволяют однозначно установить количественное соответствие уровню действующих в контролируемой зоне напряжений. Доказана возможность определения соответствия уровня действующих напряжений величине РГМН, фиксируемой сканером StressVision при обследовании конструкции. Показано, что для организации мониторинга развития ЭКИ с использованием магнитно-анизотропного метода необходимо периодически контролировать изменения РГМН и её дисперсии и, при фиксировании точек пресечения, назначать дополнительные обследования другими, более трудоемкими, методами. Подтверждена возможность организации мониторинга развития ЭКИ оборудования на основе использования механизма прогнозирования ресурса трубопровода в соответствии с положениями нормативной документации.

**Ключевые слова:** метод магнитоанизотропии, мониторинг эрозионно-коррозионного износа (ЭКИ) металла, зона пластических деформаций, оценка напряженного состояния, цикличность нагрузки.

**Для цитирования:** Адаменков А.К., Веселова И.Н. Оценка метода измерения параметров магнитной анизотропии для возможности контроля развития эрозионно-коррозионного износа оборудования. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(4):46–50. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-04-06>

**For citation:** Adamenkov A.K., Veselova I.N. Evaluation of measuring magnetic anisotropy parameters method to monitor the development of erosion and corrosion wear of equipment. *Global nuclear safety*. 2023;13(4):46–50 (In Russ.)  
<https://doi.org/10.26583/gns-2023-04-06>

**Evaluation of measuring magnetic anisotropy parameters method to monitor the development  
of erosion and corrosion wear of equipment**

**Andrey K. Adamenkov<sup>1</sup> ID, Irina N. Veselova<sup>2</sup> ID**

<sup>1</sup> JSC Atomstroyexport, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russia  
 INVeselova@mail.ru

**Abstract.** The paper presents the results of further research in the field of assessing the development of erosion and corrosion wear (ECW) of pipeline elements using a magnetic and anisotropic method to monitor the stress-strain state of ferromagnetic material. The conducted studies show that the recorded parameters of the magnetic anisotropic method, such as the principal mechanical stress difference, make it possible to unambiguously establish a quantitative correspondence to the level of stresses operating in the controlled zone. The possibility of determining the correspondence of the level of effective stresses to the value of the principal mechanical stress difference recorded by the StressVision scanner during the inspection of the structure is proven. The paper shows that in order to organize monitoring of the development of ECW using the magnetic anisotropic method it is necessary to monitor periodically changes in the principal mechanical stress difference and its dispersion and when fixing cut-off points, prescribe additional examinations with other more labor-intensive methods. The possibility of organizing monitoring of ECW equipment development based on the use of a pipeline resource forecasting mechanism in accordance with the provisions of regulatory documentation is confirmed.

**Keywords:** magnetoanisotropy method, monitoring of erosion and corrosion wear (ECW) of metal, plastic deformation zone, stress state assessment, loading cyclicity.

В настоящее время российская атомная отрасль является одной из передовых в мире по опыту эксплуатации атомных станций, квалификации персонала АЭС. Возрастающие требования нормативных документов к безопасности АЭС и конкурентная борьба на энергетическом мировом рынке определяют требования по научно-технологическому совершенствованию отрасли<sup>1</sup>. Действующими нормами и правилами Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору<sup>2</sup> установлены требования к управлению ресурсом оборудования и трубопроводов атомных станций. В частности, определена необходимость проведения мониторинга и прогнозирования тенденций механизмов деградации оборудования и трубопроводов АЭС и их материалов. Постоянное совершенствование способов обнаружения проявлений механизмов деградации, периодичность их контроля, а также анализ результатов контроля должны обеспечивать выявление механизмов деградации на ранней стадии их проявления и принятие своевременных мер до возникновения необратимых последствий из-за их развития.

Для трубопроводов и оборудования второго контура определяющим аспектом управления ресурсом является мониторинг эрозионно-коррозионного износа (ЭКИ) металла<sup>3</sup>.

В предыдущих работах показана возможность эффективного мониторинга ЭКИ трубопроводов с помощью регулярного (периодического) обследования их потенциально опасных участков методом магнитной анизотропии [1, 2]. Показана достаточная информативность зависимости одного из критерия данного метода – разность главных механических напряжений (РГМН) от изменения толщины участка модели трубопровода.

С целью определения зависимости количественных значений РГМН от действующих напряжений в материале трубопровода проведены натурные испытания образцов, изготовленных из металла, аналогичному материалу трубопроводов. Для испытаний были

изготовлены образцы из сталей Ст3 и 10ГНМФА с размерами 200x60x8 мм (рис. 1) с нанесенной на них сеткой 15x15 мм и концентратором напряжений типа «прямоугольный паз»<sup>4</sup>.

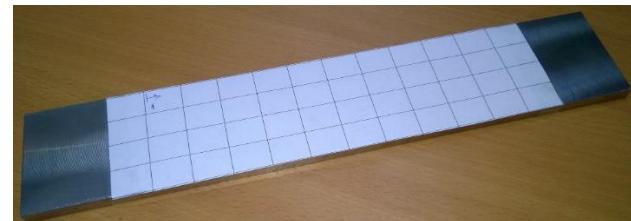


Рисунок 1. Фотография испытываемого образца  
Figure 1. A photo of the test specimen

Механические свойства сталей Ст3 и 10ГНМФА представлены в таблицах 1 и 2, где  $\sigma_b$  – предел кратковременной прочности, МПа;  $\sigma_t$  – предел пропорциональности (предел текучести для остаточной деформации), МПа;  $\delta_5$  – относительное удлинение при разрыве, (%).

Таблица 1. Механические свойства Ст3

Table 1. Mechanical properties of St3

Сортамент	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_t$ , МПа	$\delta_5$ , %
ТУ 0893-014-00212179-2004	370-490	205-255	24

Таблица 2. Механические свойства 10ГНМФА

Table 2. Mechanical properties of 10GNMVA

Сортамент	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_t$ , МПа	$\delta_5$ , %
ТУ 0893-014-00212179-2004	540-700	345-590	16

Образцы размещались в захватах машины разрывной Р-50 для последующего постепенного нагружения. Выполнялось поэтапное нагружение образца с шагом 25 кН с выдержкой времени для выполнения:

– обследования зоны предполагаемого разрушения с помощью сканера механических напряжений «StressVision»<sup>5</sup> [3];

– измерения утонения зоны пластических деформаций.

Нагружение выполнялось до момента разрушения образца (рис. 2)

<sup>4</sup> Александров А.В. Сопротивление материалов. – 3-е изд. – Москва: Высшая школа, 2003. – С. 380-383. – Режим доступа: [https://pnu.edu.ru/media/filer\\_public/2013/04/10/21\\_alexander\\_potapov\\_sopromat2003.pdf](https://pnu.edu.ru/media/filer_public/2013/04/10/21_alexander_potapov_sopromat2003.pdf) (дата обращения: 17.07.2023).

<sup>5</sup> Сканер механических напряжений «Stressvision®» Expert, версия 2.013. Паспорт ФЛ 413.175.001 ПС ТУ 4276-007-82237826-13. – Режим доступа: <https://stressvision.ru/stressvision-expert/> (дата обращения: 17.07.2023).

<sup>1</sup> Атомная энергетика в России до 2035 года. – ООО «Издательский дом Энергетика и промышленность». – Режим доступа: <https://www.eprussia.ru/market-and-analytics/4925570.htm> (дата обращения: 21.07.2023).

<sup>2</sup> Методика оценки технического состояния остаточного ресурса трубопроводов энергоблоков АЭС. – Утверждена и введена в действие приказом концерна «Росэнергоатом» от 27.06.2000 № 318. – Руководящий документ РД-ЭО-0185-00. – Режим доступа: <https://a3-eng.com/assets/files/8434/rd-eo-185-00.pdf> (дата обращения: 21.07.2023).

<sup>3</sup> Требования к управлению ресурсом оборудования и трубопроводов атомных станций. Основные положения. – Введены в действие приказом Ростехнадзора от 15.10.2015 № 410. – Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии НП-096-15. – Режим доступа: <https://docs.secirs.ru/documents/nps/NP-096-15/NP-096-15.pdf> (дата обращения: 21.07.2023).



Рисунок 2. Фотография момента разрушения  
Figure 2. A photo of destruction moment

Действующие напряжения оценивались расчетным путем как отношений действующего усилия к попечерному сечению образца. Так получены результаты испытаний, представленные в таблицах 3, 4.

Таблица 3 – Формат фиксируемых результатов испытаний образца из стали 10ГНМФА толщиной 8 мм

Table 3. Format of recorded test results of 8 mm thick 10GNMVA steel specimen

Усилия растяжения, кН	Ширина образца, мм	Действующее напряжение, МПа
25	60	52,1
50	60	104,2
...	...	...
200	57,3	436,3
225	55,8	504,0
250	Разрушение образца	

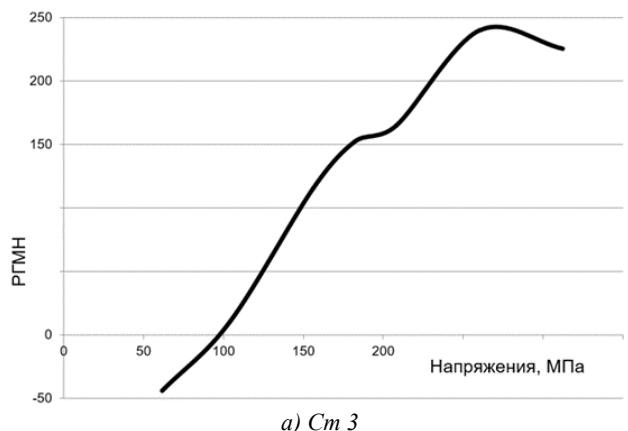
Таблица 4. Параметры безразмерной величины РГМН и

дисперсии образца из стали 10ГНМФА толщиной 8 мм  
Table 4. Parameters of dimensionless value of principal mechanical stress difference and dispersion of 8 mm thick 10GNMVA steel specimen

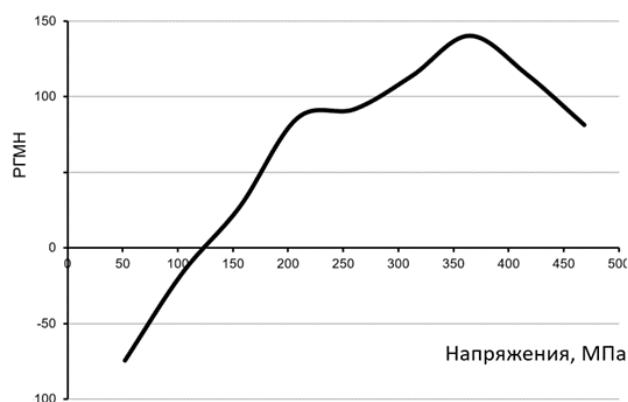
РГМН	Дисперсия
176,89	124957
233,69	119403
...	...
332,96	96517,6
361,72	96313,4

Результаты обследования образца, выполненные сканером механических напряжений «StressVision» фиксировались в памяти прибора. Алгоритм обработки данных, реализованный в программном обеспечении устройства, позволяет оценивать, кроме прочих значений<sup>6</sup>, РГМН и дисперсию как безразмерных величин (см. табл. 4).

Обработка результатов позволила построить графические зависимости величины РГМН для каждого образца от уровня действующих в сечении напряжений (рис. 3).



а) См 3



б) 10ГН2МФА

Рисунок 3. Графики зависимости величины РГМН от уровня напряжений для каждого материала

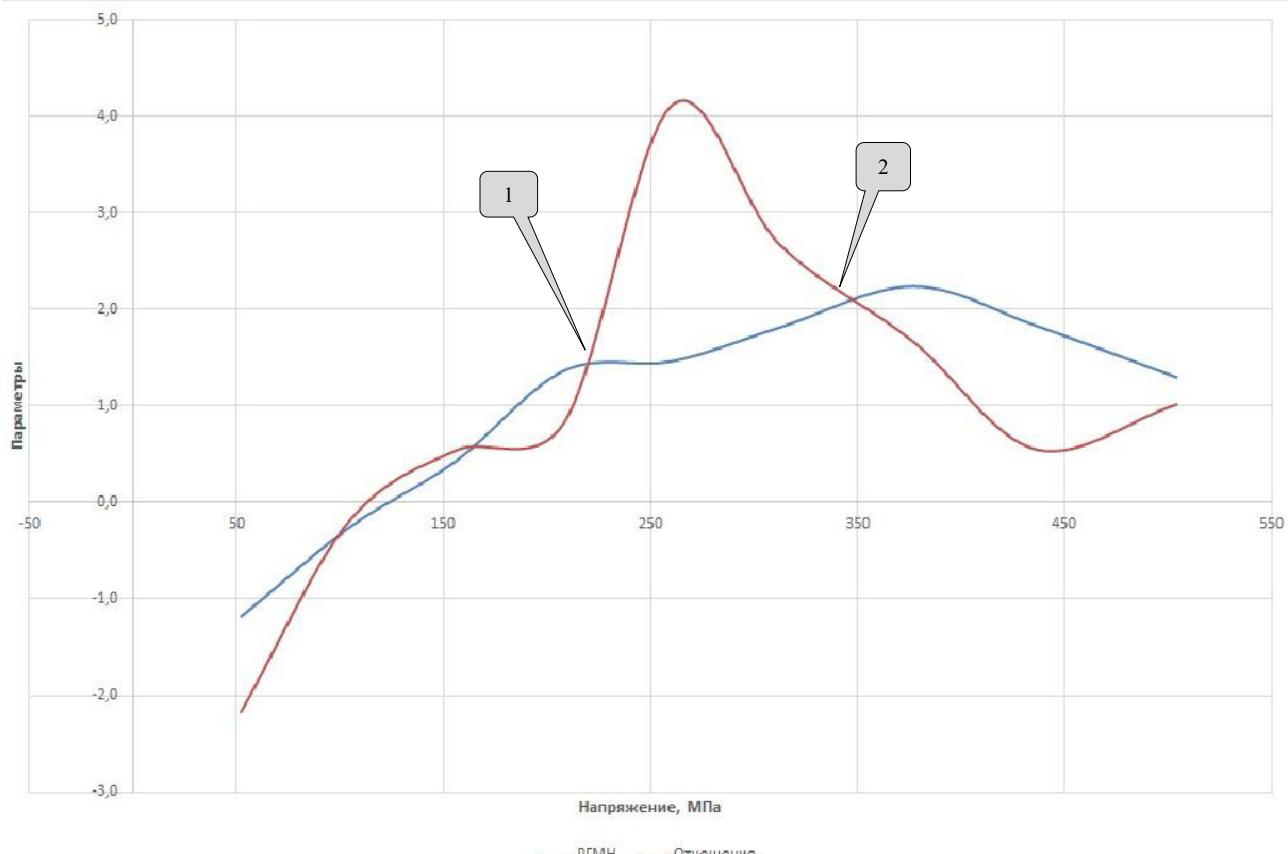
Figure 3. Diagrams of dependence of principal mechanical stress difference value on the stress level for each material

Построение графических зависимостей устанавливает однозначное соответствие величины РГМН действующему уровню напряжения при, в нашем случае, одноосном нагружении. Анализ полученных зависимостей указывает на аналогичность полученных зависимостей «РГМН – напряжение» кривым «деформация-напряжение». С другой стороны, наличие на графике экстремума не позволяет провести однозначную идентификацию контролируемой зоны в окрестностях этой точки.

Учитывая то, что физический смысл дисперсии – это площадь, на которой происходит рассеяние параметра, выполнена дальнейшая обработка зафиксированных данных (рис. 4). А именно, построены графики зависимости нормированных значений РГМН и отношения РГМН к его дисперсии в каждом опыте. Полученные графические зависимости позволяют сделать предположение о том, что точки пересечения кривых, в которых вычисляемые значения частных производных меняют знак [4, 5], характеризуют начало этапов структурных изменений материалов:

- точка 1 – завершение области упругих деформаций материала;
- точка 2 – завершение пластических деформаций.

<sup>6</sup> См. постраничную ссылку 5.



*Рисунок 4. Графики изменения нормированных значений РГМН величины отношения РГМН к его дисперсии*  
*Figure 4. Diagrams of changes in standardized principal mechanical stress difference values of the ratio to its dispersion*

Аналогичные графические зависимости характерны и для образца из стали 3.

Оценивая уровни НДС конструкции, можно утверждать, что достижение материала конструкции области начала пластической деформации является недопустимым фактором при развитии ЭКИ [6].

Полученные данные позволяют установить соответствие величины РГМН и величины напряжений, действующих в контролируемой области конструкции.

#### Выводы:

1. Доказана возможность определения соответствия уровня действующих напряжений величине РГМН, фиксируемых сканером StressVision при обследовании конструкции.

2. Показано, что для организации мониторинга развития ЭКИ [2] с использованием магнитно-анизотропного метода необходимо периодически контролировать изменения РГМН и её дисперсии и, при фиксировании точек пресечения, назначать дополнительные обследования другими, более трудоемкими, методами.

3. Учитывая монотонный характер изменения во времени величины РГМН при организации мониторинга возможно использование механизма прогнозирования ресурса трубопровода в соответствии с положениями<sup>1</sup> [7], приняв при этом в качестве предельного значения диагностического параметра значение РГМН, соответствующее пределу текучести материала.

4. При разработке технологии обследования сканером StressVision, первым этапом должно быть испытание образца, из которого изготовлены конструкции, во время его нагружения при тензометрическом сопровождении.

<sup>1</sup> Нормы допускаемых толщин стенок элементов трубопроводов из углеродистых сталей при эрозионно-коррозионном износе. – Введены в действие приказом АО «Концерн Росэнергоатом» от 06.08.2015 №9/876-П. – Руководящий документ РД ЭО 1.1.2.11.0571-2015.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Томаров Г.В., Шипков А.А., Комиссарова Т.Н. Эрозионно-коррозионный износ энергетического оборудования: исследования, прогнозирование и предупреждение. Ч. 2. Прогнозирование и предупреждение общей и локальной эрозии-коррозии. *Теплоэнергетика*. 2018;8:17–28. <https://doi.org/10.1134/S0040363618080076>
2. Адаменков А.К., Веселова И.Н. Моделирование эрозионно-коррозионного износа трубопроводов и мониторинг его развития на основе магнитоанизотропного метода. *Глобальная Ядерная Безопасность*. 2021;(3):68–74. <https://doi.org/10.26583/gns-2021-03-07>
3. Жуков С.В., Жуков В.С., Копица Н.Н. Способ определения механических напряжений и устройство для его осуществления. Патент РФ, № 2195636. 2002. 18 с. Режим доступа: [https://rusneb.ru/catalog/000224\\_000128\\_0002195636\\_20021227\\_C2\\_RU/](https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002195636_20021227_C2_RU/) (дата обращения: 17.07.2023).
4. Адаменков А.К., Веселова И.Н., Шпицер В.Я. Оценка развития эрозионно-коррозионного износа с помощью метода измерения магнитной анизотропии. *Глобальная ядерная безопасность*. 2019;9(1):113–119. Режим доступа: <http://gns.mephi.ru/sites/default/files/journal/file/ru.2019.1.3.5.pdf> (дата обращения: 17.07.2023).
5. Sakai Y., Unishi H., Yahata T. Non-destructive method of stress evaluation in linepipes using magnetic anisotropy sensor. *Jfe technical report*. 2004;3. Available at: <https://www.jfe-steel.co.jp/en/research/report/003/pdf/003-09.pdf> (accessed: 29.07.2023).
6. Ничипурук А.П., Сташков А.Н., Огнева М.С., Кулев В.Г., Царькова Т.П., Костин В.Н. О возможности использования магнитных методов для оценки уровня одноосных пластических деформаций и остаточных напряжений в низкоуглеродистых сталях. *Сварка и диагностика: сборник докладов международного форума. Екатеринбург, 25–27 ноября 2014 г.* Екатеринбург: УрФУ, 2015. С. 201–207. Режим доступа: [https://clar.urfu.ru/bitstream/10995/30919/1/sid\\_2014\\_33.pdf](https://clar.urfu.ru/bitstream/10995/30919/1/sid_2014_33.pdf) (дата обращения: 29.07.2023).
7. Бараненко В.И., Маркочев В.М., Янченко Ю.А. Эксплуатационный контроль эрозионно-коррозионного износа трубопроводов на российских АЭС с ВВЭР. *Теплоэнергетика*. 2011;5; 41–48. Режим доступа: [http://tepen.ru/uploads/archive/2011/05\\_11.pdf](http://tepen.ru/uploads/archive/2011/05_11.pdf) (дата обращения: 29.07.2023).

## ВКЛАД АВТОРОВ:

**Адаменков А.Н.** – разработка технологии проведения эксперимента, проведение эксперимента, обработка результатов эксперимента;

**Веселова И.Н.** – разработка концепции сравнительного эксперимента и оценки результатов, проведение эксперимента, оформление текста статьи.

## ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Без дополнительного финансирования.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

**Андрей Константинович Адаменков**, к.т.н., главный эксперт дирекции пуско-наладочных работ АО «Атомстройэкспорт», Москва, Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7342-0231>

WoS: O-1921-2018

e-mail: anri\_61@mail.ru

**Ирина Николаевна Веселова**, к.т.н., доцент кафедры атомной энергетики Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5867-5690>

WoS: M-1893-2018

e-mail: INVeselova@mail.ru

Поступила в редакцию 06.10.2023

После доработки 27.11.2023

Принята к публикации 30.11.2023

## AUTHORS' CONTRIBUTION:

**Адаменков А.К.** – development of the experiment technology, conducting the experiment, processing the results of the experiment;

**Веселова И.Н.** – development of the concept of a comparative experiment and evaluation of the results, conducting the experiment, design of the text of the article.

## FUNDING:

No additional funding.

## CONFLICT OF INTEREST:

The authors declare no conflict of interest.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

**Andrey K. Adamenkov**, Cand. Sci. (Eng.), Chief Expert of the Commissioning and Start-up Directorate of JSC Atomstroyexport, Moscow, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7342-0231>

WoS: O-1921-2018

e-mail: anri\_61@mail.ru

**Irina N. Veselova**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Nuclear Engineering Department, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI»; Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5867-5690>

WoS: M-1893-2018

e-mail: INVeselova@mail.ru

Received 06.10.2023

Revision 27.11.2023

Accepted 30.11.2023