К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КОЭРЦИТИМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

TO THE QUESTION OF STRESSED STATE ASSESSMENT BASED ON COERCIMETRIC MEASUREMENTS RESULTS

Н.Л. Зайцев
Nikolay L. Zaitsev

С.А. Сильвестров
Stepan A. Silvestrov

Южно-Уральский государственный
университет (национальный
исследовательский университет),
г. Челябинск,
Российская Федерация

South Ural State University
(National Research University),
Chelyabinsk, Russian Federation

ООО «Астрапроект»,
г. Казань,
Российская Федерация

Astraproekt LLC,
Kazan, Russian Federation

В настоящее время для оценки напряжённо-деформированного состояния стальных конструкций используют результаты коэрцитивметрических измерений. Однако способы и методики, представленные в различных работах, противоречивы и не лишены ошибок методологического характера, что в ряде случаев приводит к ошибочным выводам. В статье выполнен анализ особенностей известных методик, изучены принятые допущения и на их основе предложены возможные способы устранения недостатков.

Установлено, что одним из источников погрешности известных методов, основанных на измерении коэрцитивной силы металла, является допущение, что в металле обследуемой конструкции в процессе её эксплуатации накапливаются такие же деформации, как и в тарировочном плоском образце в состоянии одноосного растяжения. Фактически данные такой тарировки не могут быть безоговорочно распространены на обследуемую конструкцию.

Разработан метод тарировки коэрцитивметрического прибора с использованием полого крестообразного образца. Нагружение изгибающими моментами в двух взаимно перпендикулярных направлениях позволяет создавать напряжённо-деформированное состояние (НДС) с любым соотношением компонент напряжённого состояния. Это, в свою очередь, позволяет точнее выполнять тарировку с учётом сложного напряжённого состояния конструкции, отделить влияние отдельных компонент НДС на коэрцитивную силу.

Также предложен метод восстановления исходных свойств металла до начала эксплуатации конструкции, что позволяет исключить накопленные изменения коэрцитивной силы вследствие деформаций и микрповреждений.

Все эти предложения позволяют существенно повысить точность измерения напряжённого состояния трубопроводов и других конструкций в состоянии эксплуатации на основе коэрцитивной силы.

At present, the results of coercimetric measurements are used to evaluate the stress-strain state of steel structures. However, the technique and methods presented in various works are contradicting each other and have methodological errors, which in some cases leads to false conclusions. In the article the features of known methods are analyzed, accepted assumptions are studied and on their basis possible ways of eliminating shortcomings are suggested.

It is established that one of the sources of error in known methods based on the measurement of the coercive force of a metal is the assumption that in the metal of the structure under investigation, the same deformations accumulate in the process of its operation as in the calibration flat

Ключевые слова

коэрцитивная сила,
напряжённо-деформированное
состояние,
тарировочный образец,
упругопластическое нагружение

Key words

coercive force, stress-strain state,
calibration sample,
elastoplastic loading

sample in the uniaxial tension state. In fact, the data of such calibration can not be unconditionally extended to the surveyed design.

A method for calibrating a coercimetric instrument using a hollow cruciform sample was developed. Loading bending moments in two mutually perpendicular directions allows to create a stress-strain state (SSS) with any ratio of the components of the stressed state. This, in turn, allows to perform the calibration more accurately taking into account the complex stress state of the structure, separate the effect of individual components of the SSS on coercive force.

Also, a method for restoring the initial properties of the metal prior to the operation of the structure is proposed. It allows to eliminate the accumulated changes in the coercive force due to deformations and microdamages. All these proposals make it possible to improve significantly the accuracy of measuring the stressed state of pipelines and other structures in a state of operation based on coercive force.

Коэрцитивная сила (H_c) реагирует на всякое изменение тонкой (на субмикроразмерном уровне) структуры, в т. ч. на изменение напряжённо-деформированного состояния (НДС) конструкции. Поэтому для оценки НДС стальных конструкций довольно успешно используют результаты коэрцитиметрических измерений [1–6]. Использование коэрцитивных измерений для оценки НДС имеет ряд достоинств, одним из которых является простота и наглядность. Однако применяемые на практике способы имеют недостатки, обусловленные принимаемыми в них допущениями.

Рассмотрим некоторые из этих недостатков на примере наиболее часто цитируемых работ [1–3]. В этих и других, подобных им, работах

методика строится на результатах одноосного растяжения плоских образцов. Плоский образец подвергают одноосному растяжению с одновременным измерением коэрцитивной силы в направлении вдоль приложенной растягивающей нагрузки. Получают тарировочную кривую изменения коэрцитивной силы H_c в зависимости от величины растягивающих напряжений. Нагружение и измерение значений H_c производят вплоть до разрушения образца. На рисунке 1 представлены тарировочные кривые изменения коэрцитивной силы в зависимости от величины растягивающих напряжений для трёх марок стали, приведенные авторами в работе [1].

Рисунок 1. Изменение коэрцитивной силы в зависимости от напряжения в образцах из сталей Ст3 (1), 20 (2), 09Г2С (3) при их испытании на растяжение (данные [1])

На основании полученных тарифовочных кривых принимается допущение, согласно которому текущее значение H_c на тарифовочной кривой однозначно определяет, какой области диаграммы растяжения (упругой, упруго-пластической, зоне разрушения) соответствует структура металла в данный момент. Соответственно, для определения НДС реальной конструкции нужно только измерить на этой конструкции значение H_c и по диаграмме одноосного растяжения плоского образца, изготовленного из той же марки стали, что и обследуемая конструкция, оценить величину напряжения, соответствующую измеренной H_c на конструкции. То есть, принимается допущение, согласно которому в металле обследуемой конструкции в процессе её эксплуатации были накоплены такие же повреждения структуры металла (накоплена такая же пластическая деформация), как в растягиваемом плоском образце. Такое утверждение ошибочно. Оно имеет непосредственное отношение только к испытываемому плоскому образцу и не может быть распространено на обследуемую конструкцию, поскольку значения коэрцитивной силы в ней для одного и того же металла изначально могут иметь разброс, обусловленный различными причинами, связанными не только с условиями эксплуатации, но и с технологическим переделом при изготовлении конструкций.

В подтверждение к сказанному, мы провели на Челябинском трубопрокатном заводе (ОАО «ЧТПЗ») измерения значений H_c в различных местах листов стали 17ГС до изготовления из них труб и в тех же местах на готовых трубах после их экспандирования.

Как показали измерения на готовых трубах после их экспандирования, разница значений коэрцитивной силы на листе и в готовой трубе составляла величину $\sim 0,8\text{--}1,0$ А/см, что соответствует приросту значений коэрцитивной силы у образцов, подвергнутых деформации растяжением на величину $\sim 1,2\%$ (величине деформации при экспандировании трубы). Очевидно, что этот фактор необходимо учитывать при обследовании трубопроводов из электросварных труб.

Ещё раз вернёмся к рисунку 1. Представленные на нём результаты не всегда соответствуют действительности. Для сравнения на рисунке 2 представлены аналогичные кривые, полученные нами при растяжении плоских образцов из сталей 20 и 09Г2С. Как видим,

результаты существенно отличаются. Так, в упругой области нагружения коэрцитивная сила H_c , измеренная в направлении растягивающей нагрузки, с увеличением напряжения не увеличивается монотонно, как это представлено на рисунке 1, а вначале H_c плавно убывает до достижения растягивающими напряжениями уровня $\sigma = P/F \approx \sigma_t/2$. При последующем увеличении растягивающих напряжений H_c начинает монотонно возрастать. При $\sigma = P/F \approx \sigma_t$ величина H_c принимает исходное (до начала нагружения) значение. Такой характер изменения кривых $H_c = f(\sigma)$ наблюдается и для других марок стали, с той лишь разницей, что максимальное снижение H_c при нагружении в упругой области может быть больше или меньше.

Из рисунка 2 следует, что при упругом нагружении оценка НДС по коэрцитивной силе, измеренной в направлении вдоль приложенной растягивающей силы, приводит к неопределённости, так как одному значению H_c соответствуют два значения напряжения.

В работе [1] значение H_c измеряют в нагруженном состоянии конструкции, как в примере с воздухоборниками. При этом непонятно, о каком НДС воздухоборника может говорить измеренная величина H_c , если при её измерении внутреннее давление отсутствует. Если бы авторы [1] измерили значение H_c в нагруженном (рабочем) и разгруженном состояниях воздухоборников, то они получили бы напряжения на уровне $(0,5\text{--}0,8) \sigma_t$ металла, из которого изготовлен воздухоборник, так как по правилам эксплуатации напряжения в воздухоборниках не могли превышать этот уровень. Если же измеренная на ненагруженной конструкции величина H_c будет равна некоторому значению H_c , измеренному на растягиваемом образце при его нагружении за пределами упругости, то это никак не говорит о её фактическом НДС или о каком-то накоплении пластических деформаций в ней, связанных с условиями эксплуатации. Такой подход был бы оправдан при условии, что известны значения H_c на момент начала эксплуатации конструкции, а такие сведения отсутствуют. При этом тарифовочный образец должен быть вырезан непосредственно из конструкции или из металла, в точности совпадающего по химсоставу и условиям технологического передела, что, вообще говоря, сложно осуществить.

Рисунок 2. Изменения H_c в зависимости от напряжения, полученные при растяжении плоских образцов из сталей 20 (1) и 09Г2С (2)

Для оценки величины накопленной металлом конструкции в процессе её длительной эксплуатации пластической деформации нужна методика, позволяющая достоверно определять исходные механические свойства и значения H_c металла обследуемых конструкций. Такая методика изложена в патенте [4]. Для восстановления исходных свойств металла конструкции в ней предложен дорекристаллизационный отжиг, так называемый термический возврат, по режиму: нагрев до 500 °С в течение 1 ч, выдержка при этой температуре в течение 1,5 ч и охлаждение вместе с печью. Такой режим термообработки:

- не оказывает влияния на значение H_c металла недеформированных образцов из горячекатаной стали и стали контролируемой прокатки;

- приводит к восстановлению исходных (для труб в состоянии листа) значений H_c после неоднократного нагружения образца при различных величинах предварительной пластической деформации.

Термообработка по указанному режиму образцов размером 200 × 200 мм, вырезанных из демонтированных электросварных и горячекатаных труб после их эксплуатации в течение 2–40 лет, показала следующее:

- в образцах из электросварных труб наблюдалось снижение значения H_c на величину 0,8–1,0 А/см, обусловленную деформацией трубы при её экспандировании;

- в образцах из горячекатаных труб изменения значений H_c не наблюдалось.

Из сказанного следует вывод: длительная эксплуатация стальных конструкций при уровне действующих в них напряжений ниже предела упругости не приводит к появлению (накоплению) в них пластических деформаций выше обусловленных технологическим переделом.

Попытка определения НДС сложно нагруженных конструкций по результатам измерения H_c при одноосном растяжении также необоснованна и может привести к погрешностям. Значения H_c , измеренные в различных направлениях на конструкции, зависят от соотношения компонент напряжённого состояния и слабо коррелируют с результатами измерения H_c при одноосном напряжённом состоянии. Оценка НДС сложно нагруженных конструкций по результатам коэрцитиметрических измерений затруднена в первую очередь отсутствием тарировочных образцов и соответствующего оборудования, позволяю-

щих получать в них различные соотношения компонент напряжённого состояния.

Предложенный в работах [5, 6] тарифовочный образец в виде полого цилиндра, нагружаемый избыточным внутренним давлением или изгибом, имеет тот недостаток, что на нём невозможно воспроизвести НДС, соответствующее реальным конструкциям, например трубопроводам. Здесь при всех уровнях внутреннего давления соотношение кольцевого напряжения к продольному остаётся неизменным, равным 2, а изгиб не учитывает влияния внутреннего давления.

Полый крестообразный образец (рисунок 3) с тонкими стенками лишён этих недостатков [7]. Крестообразный образец состоит из четырёх нагрузочных плечей 1 и двух рабочих пластин 2 той же марки стали, что и обследуемая труба. Нагрузочные плечи и пластины соединены сварными швами 3. В качестве нагрузочных плечей применяют отрезки стальных профильных труб прямоугольного сечения (ГОСТ 13663-86). В центре рабочей пластины в двух взаимно перпендикулярных направлениях монтируют датчики перемещений. Место установки датчиков обозначено цифрой 4.

При приложении к нагрузочным плечам крестообразного образца изгибающих моментов в двух взаимно перпендикулярных направлениях в рабочей пластине можно воспроизвести НДС практически с любым

соотношением компонент напряжённого состояния, имеющим место быть в стальной конструкции.

С учётом сказанного предлагается следующая методика определения НДС в реальных конструкциях, например в трубопроводе. На опасном участке обследуемого трубопровода фиксируют рабочее давление транспортируемого продукта, диаметр, толщину стенки и марку стали трубы. В двух взаимно перпендикулярных направлениях (по оси трубы и в кольцевом направлении) измеряют значения коэрцитивной силы $H_{\text{соч}}$ и $H_{\text{ск}}$.

Изготавливают крестообразный образец с рабочими пластинами из металла, подобного металлу обследуемой трубы. В центре пластины (пластин) в двух взаимно перпендикулярных направлениях монтируют тензодатчики перемещений, в тех же направлениях измеряют значения коэрцитивной силы при нулевых напряжениях. Ступенчато нагружают крестообразный образец. На каждой ступени нагружения измеряют деформации ϵ_k и $\epsilon_{\text{оч}}$ и соответствующие им значения коэрцитивной силы $H_{\text{ск}}$ и $H_{\text{соч}}$. Варьируя изгибающими моментами, подбирают такие деформации ϵ_k и $\epsilon_{\text{оч}}$, при которых значения коэрцитивной силы, измеренные на образце, совпадут по величине с измеренными $H_{\text{ск}}$ и $H_{\text{соч}}$ на трубе. По полученным при этом значениям деформаций ϵ_k и $\epsilon_{\text{оч}}$ находят напряжения, действующие в стенке трубы по формулам:

Рисунок 3. Полый крестообразный тарифовочный образец

$$\sigma_k = \frac{(\varepsilon_k + \mu \varepsilon_{oc})}{1 - \mu^2}; \quad \sigma_{oc} = \frac{(\varepsilon_{oc} + \mu \varepsilon_k)}{1 - \mu^2}; \quad (1)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_k^2 - \sigma_k \cdot \sigma_{oc} + \sigma_{oc}^2}, \quad (2)$$

где σ_k — кольцевое напряжение, действующее в трубе; σ_{oc} — осевое напряжение, действующее в трубе; μ — коэффициент Пуассона металла трубы.

Пример. Требуется определить напряжённое состояние открытого участка газопровода, проложенного над оврагом шириной 30 м. Газопровод смонтирован из труб марки стали 17ГС диаметром 1020 мм, толщиной стенки 10 мм. Механические характеристики металла трубы: предел текучести $\sigma_t = 370$ МПа, временное сопротивление $\sigma_b = 550$ МПа. Рабочее давление газа на момент обследования 4,5 МПа. Значение коэрцитивной силы, измеренное во время обследования на верхней образующей трубы: $H_{ск} = 4,6$ А/см — в кольцевом направлении и $H_{сос} = 6,2$ А/см — в направлении по оси трубы. Рабочие пластины тарировочного образца вырезали из участка демонтированной трубы, подобной обследуемой. Для измерения деформаций в направлениях вдоль и поперёк оси трубы в центре тарировочного образца наклеили тензодатчики.

В результате нагружения образца получили, что значения $H_{ск} = 4,6$ А/см и $H_{сос} = 6,3$ А/см были достигнуты при значениях $\varepsilon_k = 0,0013$ и $\varepsilon_{oc} = 0,0011$. Принимая значение модуля упругости $E = 200$ ГПа и коэффициента Пуассона $\mu = 0,3$, по формулам (1), (2) получили: $\sigma_k = 213$ МПа, $\sigma_{oc} = 156$ МПа, $\sigma_i = 321$ МПа.

Из полученных результатов следует, что уровень осевых напряжений по верхней образующей трубы, казалось бы, не опасен для

эксплуатации трубопровода. Однако интенсивность напряжений выходит за пределы нормативных требований. Поэтому для дальнейшей эксплуатации следует предусмотреть ремонт с целью приведения напряженного состояния участка перехода через овраг в нормативное состояние.

Выводы

1. Допущение, согласно которому в металле обследуемой конструкции в процессе её эксплуатации накапливаются такие же деформации (повреждения структуры металла), как в растягиваемом плоском образце, ошибочно. Это допущение имеет непосредственное отношение только к испытанному образцу и не может быть безоговорочно распространено на обследуемую конструкцию.

2. Большинство реальных конструкций в процессе эксплуатации испытывает сложное напряжённое состояние. В этом случае значение коэрцитивной силы H_c , измеренное на конструкции, слабо коррелирует с результатами измерения H_c при одноосном растяжении плоского образца. Поэтому переносить результаты измерения H_c , полученные при испытании образцов на одноосное растяжение, на реальные конструкции некорректно.

3. Для повышения точности тарировки коэрцитиметрического прибора разработан полый крестообразный образец, нагружаемый изгибающими моментами в двух взаимно перпендикулярных направлениях, позволяющий создавать НДС с любым соотношением компонент напряжённого состояния.

4. Предложена уточнённая методика оценки НДС сложно нагруженных конструкций по результатам коэрцитиметрических измерений.

СПИСОК ИСПОЛЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Безлюдько Г.Я. Мужичкий В.Ф., Попов Б.Е. Магнитный контроль (по коэрцитивной силе) напряжённо-деформированного состояния и остаточного ресурса стальных металлоконструкций // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 1999. Т. 65. № 9. С. 53–57.

2. Мужичкий В.Ф., Попов Б.Е., Безлюдько Г.Я. Магнитный контроль напряжённо-деформированного состояния и остаточного ресурса стальных металлоконструкций подъёмных сооружений и сосудов, работающих под давлением // Дефектоскопия. 2001. № 1. С. 38–46.

3. РД ИКЦ «КРАН»-007-97. Магнитный контроль напряжённо-деформированного состояния и остаточного ресурса подъёмных сооружений при проведении

их обследования и техническом диагностировании. М., 2002. 55 с.

4. Пат. 2290620 РФ, МПК G01N 1/28, G21D 8/00 № 2290620. Способ восстановления исходных механических свойств металла длительно эксплуатируемых электросварных труб / В.А. Шементов, Н.Л. Зайцев, Д.Д. Гайдт, А.М. Демаков. Заявл. 12.07.2005; опубл. 27.12.2006. Бюл. № 36.

5. Бердник М.М., Александров Ю.В., Агиней Р.В. Исследование влияния плоского напряжённого состояния на изменение магнитных характеристик трубных сталей // Наука в нефтяной и газовой промышленности. 2010. №3. С. 2–6.

6. Пат. № 2439530 РФ. Способ определения механических напряжений в стальных конструкциях / Ю.В. Александров, Р.В. Агиней, А.С. Кузьбожев, М.М. Бердник. Опубл. 10.01.2012. Бюл. № 1.

7. Пат. РФ № 161083. Образец для тарировки коэрцитиметра при плоском напряжённом состоянии / Н.Л. Зайцев. Опубл. 10.04.2016. Бюл. № 10.

REFERENCES

1. Bezlyud'ko G.Ya. Muzhitskii V.F., Popov B.E. Magnitnyi kontrol' (po koertsitivnoi sile) napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya i ostatochnogo resursa stal'nykh metallokonstruktsii [Magnetic Control (According to the Coercive Force) of the Stress-Strain State and the Residual Life of Steel Metal Structures]. Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov — Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials, 1999, Vol. 65, No. 9, pp. 53–57. [in Russian].

2. Muzhitskii V.F., Popov B.E., Bezlyud'ko G.Ya. Magnitnyi kontrol' napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya i ostatochnogo resursa stal'nykh metallokonstruktsii pod'emnykh sooruzhenii i sudov, rabotayushchikh pod davleniem [Magnetic Control of the Stress-Strain State and the Residual Life of Steel Structures of Lifting Structures and Vessels Operating under Pressure]. Defektoskopiya — Defectoscopy, 2001, No. 1, pp. 38–46. [in Russian].

4. Shementov V.A., Zaitsev N.L., Gaidt D.D., Demakov A.M. Sposob vosstanovleniya iskhodnykh mekhanicheskikh svoystv metalla dlitel'no ekspluatiruemyykh elektrovnykh trub [Method for Restoring the Initial Mechanical

Properties of Metal for Long-Operated Electric Welded Pipes]. Patent RF, No. 2290620, 2006. [in Russian].

5. Berdnik M.M., Aleksandrov Yu.V., Aginei R.V. Issledovanie vliyaniya ploskogo napryazhennogo sostoyaniya na izmenenie magnitnykh kharakteristik trubnykh staley [Investigation of the Effect of a Plane Stressed State on the Change in the Magnetic Characteristics of Tube Steels]. Nauka v neftyanoi i gazovoi promyshlennosti — Science in Oil and Gas Industry, 2010, No. 3, pp. 2–6. [in Russian].

6. Aleksandrov Yu.V., Aginei R.V., Kuz'bozhev A.S., Berdnik M.M. Sposob opredeleniya mekhanicheskikh napryazhenii v stal'nykh konstruktsiyakh [Determination Method of Mechanical Stresses in Steel Structures]. Patent RF, No. 2439530, 2012. [in Russian].

7. Zaitsev N.L. Obrazets dlya tarirovki koertsitimetra pri ploskom napryazhennom sostoyanii [A Sample for a Coercimeter Calibrating at Plane Stress State]. Patent RF, No. 161083, 2016. [in Russian]

3. RD IKTs «KRAN»-007-97. Magnitnyi kontrol' napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya i ostatochnogo resursa pod'emnykh sooruzhenii pri provedenii ikh obsledovaniya i tekhnicheskoy diagnostirovani [RD of the Information Center «Kran»-007-97. Magnetic Control of the Stress-Strain State and Residual Life of Lifting Structures during Their Inspection and Technical Diagnosis]. Moscow, 2002. 55 p. [in Russian]

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ABOUT THE AUTHORS

Зайцев Николай Леонидович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Оборудование и технологии сварочного производства» Южно-Уральского государственного университета (национальный исследовательский университет), г. Челябинск, Российская Федерация

Zaitsev Nikolay L., Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of the Equipment and Technologies of Welding Production Department, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russian Federation

e-mail: koka.zaitceff@gmail.com

Сильвестров Степан Аверкиевич, директор ООО «Астрапроект» г. Казань, Российская Федерация

Silvestrov Stepan A., Director, Astraproekt LLC, Kazan, Russian Federation

e-mail: aAstra@mail.ru