

УДК 624.014.2 + 624.014.2.001.2

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ И ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КОЭРЦИТИМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Н.Л. Зайцев, П.Д. Зайцев

В настоящее время для оценки напряжённо-деформированного состояния стальных конструкций широко используют результаты коэрцитиметрических измерений. Однако известные методики, представленные в различных работах, не лишены ошибок методологического характера, что может привести к ошибочным выводам. В докладе выполнен анализ недостатков известных методик и предложены возможные способы устранения этих недостатков.

Ключевые слова: коэрцитивная сила, напряжённо-деформированное состояние, тарировочный образец, упругое нагружение, пластическое нагружение.

По сравнению с другими физическими методами коэрцитиметрические измерения, используемые для оценки напряжённо-деформированного состояния (НДС) стальных конструкций, имеют следующие достоинства:

- неразрушающий характер контроля;
- высокая скорость и простота измерений;
- применение недорогой серийной аппаратуры;
- возможность контроля криволинейных поверхностей;
- удобство использования в полевых условиях;
- отсутствие опасных для жизни оператора полей.

Применяемые на практике методы оценки НДС стальных конструкций по коэрцитивной силе (H_c) используют зависимость последней от НДС металла конструкции. Зависимость H_c металла от уровня механического напряжения является уникальной для каждой марки стали. Её предварительно устанавливают в лабораторных условиях путём нагружения специальных образцов, изготовленных из разных марок сталей, с одновременным измерением H_c . В результате получают тарировочную кривую зависимости H_c от величины механического напряжения. Далее, сопоставляя результаты измерения H_c на реальных конструкциях с полученными на тарировочных образцах, изготовленных из той же марки стали, что и обследуемая конструкция, оценивают величину механического напряжения в обследуемой конструкции.

В литературе наиболее часто цитируются работы авторов [1–3] Г.Я. Безлюдько, В.Ф. Мужижкого и Б.Е. Попова, в которых изложены методические подходы к оценке НДС и остаточного ресурса металлоконст-

рукций по результатам измерения Нс. Методика строится на результатах одноосного растяжения плоских образцов.

На рис. 1 представлены тарировочные кривые изменения Нс в зависимости от напряжения для трёх марок сталей Ст3, 20, 09Г2С, заимствованные нами из работы [1].

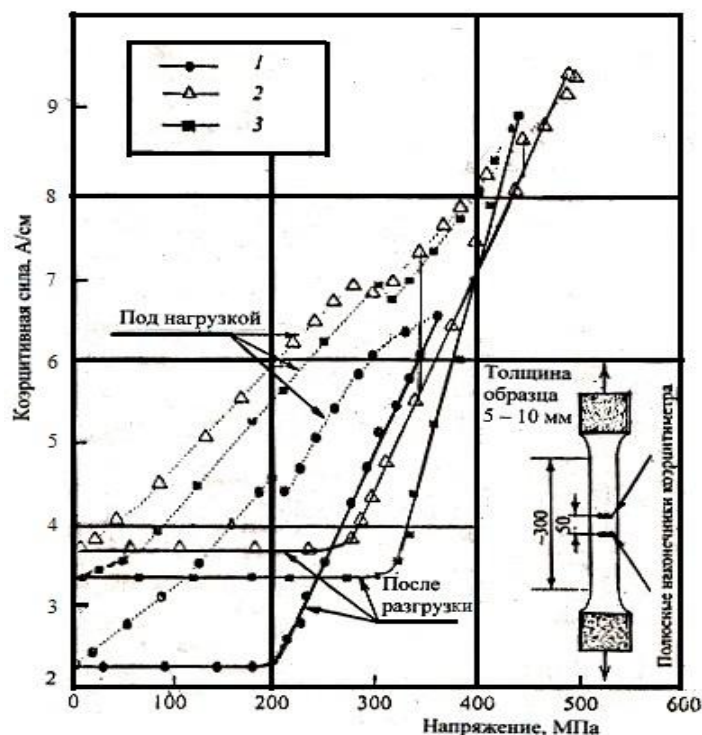


Рис. 1. Изменения коэрцитивной силы в зависимости от напряжения в образцах из сталей Ст3 (1), 20 (2), 09Г2С (3) при испытании их на растяжение

Этот рисунок понятен для объяснения методического подхода авторов статьи [1] к оценке НДС. Однако в действительности тарировочные кривые $H_c = f(\sigma)$ при растяжении плоских образцов существенно отличаются от представленных авторами [1]. Так, в упругой области нагружения H_c , измеренная в направлении вдоль приложенной растягивающей силы, с увеличением напряжения не увеличивается, как это представлено на рис. 1, а вначале с увеличением нагрузки H_c плавно убывает до достижения растягивающими напряжениями уровня $\sigma = P/F \approx \sigma_t/2$, при дальнейшем увеличении растягивающих напряжений H_c начинает монотонно возрастать. При $\sigma = P/F = \sigma_t$ значение H_c принимает исходное (до начала нагружения) значение. Прирост H_c в пластической стадии нагружения происходит более интенсивно. Это наглядно подтверждает рис. 2, на котором представлены тарировочные кривые изменения H_c в зависимости от напряжений, полученные нами для сталей марок 20 и 09Г2С. Такой характер изменения кривых $H_c = f(\sigma)$ наблюдается и для других марок стали, с той лишь раз-

ницей, что максимальное снижение H_c при нагружении в упругой области может быть чуть больше или чуть меньше. Из сказанного следует, что в упругой области нагружения определение напряжённого состояния по измерению H_c может привести к значительным погрешностям, так как одному измеренному значению H_c соответствуют два значения напряжения.

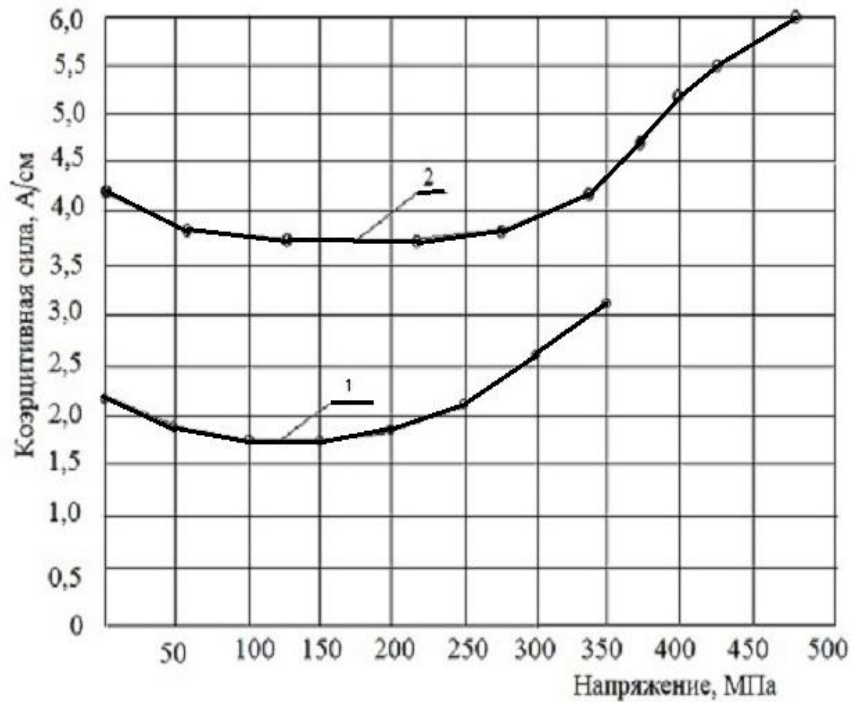


Рис. 2. Изменения H_c в зависимости от напряжения, полученные при растяжении плоских образцов марок сталей 20 (1) и 09Г2С (2)

По-видимому, в определённой мере этот недостаток можно решить, если оценку напряжённого состояния производить по изменению H_c , измеренному в направлении, перпендикулярном к направлению растягивающей силы (рис. 3). Как видно из рис. 3, значения H_c , измеренные в направлении, перпендикулярном приложенной силе, существенно превышают таковые, измеренные в направлении вдоль приложенной силы. При этом на всём интервале увеличения нагрузки значение $H_c = f(\sigma)$ возрастает.

Как утверждают авторы [1–3], в процессе их экспериментов реализованы две схемы испытания на растяжение плоских образцов. В первом случае нагрузку увеличивали ступенчато и после каждого приращения нагрузки измеряли коэрцитивную силу в направлении вдоль приложенной растягивающей силы. Во втором – нагрузку наращивали таким же образом, но с последующим разгрузением до нуля после каждой очередной ступени нагружения. Величину H_c измеряли после каждого приращения нагрузки и после её снижения до нуля. Приращения величины H_c в разгруженном состоянии служили мерой накопления деформационных изменений в результате каждого такого единичного цикла нагружения-разгружения образца.

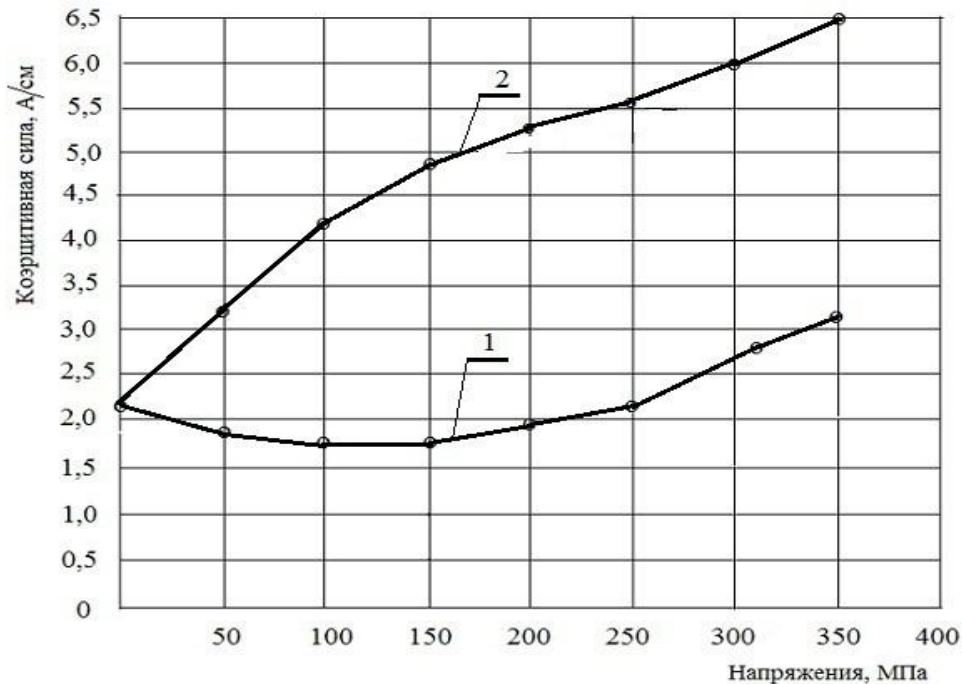


Рис. 3. Кривые $H_c=f(\sigma)$, полученные при растяжении плоских образцов стали марки 20: 1 – в направлении вдоль приложенной силы; 2 – перпендикулярно к приложенной силе

В результате, утверждают авторы, получена возможность по величине H_c однозначно идентифицировать такие характерные точки диаграммы, как предел текучести и предел прочности. По текущему значению H_c оказалось возможным просто и однозначно установить, какой области этой диаграммы (упругой, упругопластической, зоне разрушения) соответствует структура металла в данный момент. А дальше предлагается следующая методика определения НДС реальной конструкции. Нужно только измерить на реальной конструкции, изготовленной из той же марки стали, что и испытанный плоский образец, значение H_c и по диаграмме растяжения образца (рис. 1) найти величину напряжения, соответствующую измеренной H_c на конструкции. Т.е. принимается допущение, согласно которому в металле обследуемой конструкции в процессе её эксплуатации были накоплены такие же повреждения структуры металла, как в растягиваемом плоском образце. Это необоснованные допущения.

Принимаемое авторами [1–3] допущение имеет непосредственное отношение только к испытанному образцу и не может быть распространено на обследуемую конструкцию, так как это может привести к ошибочным заключениям. Значения H_c одного и того же металла изначально имеют разброс (в ряде случаев довольно большой), обусловленный различными причинами, связанными не только с условиями эксплуатации, но и с технологией изготовления 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 экспандирования.

Измерения на листах до изготовления труб показали, что значения H_c в различных местах одного и того же листа могут отличаться в два раза. Если сначала мы сделаем тарировку на одном образце какой-то марки стали, а потом будем сопоставлять тарировочные данные с H_c , измеренными на конструкции из такой же марки стали (в частности на трубе), мы получим из этого сопоставления не величину напряжения или величину накопленных при эксплуатации повреждений структуры металла, а просто значение H_c для конкретного участка конструкции, на котором произвели измерение. И это значение H_c не говорит о том, какой области диаграммы нагружения соответствует структура металла участка, на котором производили измерение H_c . Надо понимать, что в реальных конструкциях уровень действующих напряжений, как правило, никогда не превышает предела упругости.

Как показали измерения на готовых трубах после их экспандирования, разница значений коэрцитивной силы на листе и в готовой трубе составляет величину $\sim (0,8-1,0)$ А/см, что соответствует приросту значений коэрцитивной силы у образцов, подвергнутых деформации растяжением на величину $\sim 1,2\%$ (величина деформации при экспандировании трубы). Однако авторы [1], обсуждая результаты обследования магистральных газопроводов по предлагаемой ими методике, ничего не говорят о наличии пластических деформаций от экспандирования труб.

О каком НДС конструкции может говорить измеренная на ней величина H_c , если измерения проводятся в ненагруженном состоянии, как в примере с воздухосборниками. Тут авторы [1] противоречат самим себе. Как видно из рис. 1, разгрузка до нуля после всякого нагружения в упругой области возвращает H_c в исходное до нагружения состояние. Возникает вопрос, каким образом может произойти увеличение H_c в процессе эксплуатации конструкции, если по правилам эксплуатации уровень напряжений в ней не может превышать $(0,5-0,8)$ σ_T металла, из которого изготовлена конструкция? И если бы авторы измерили значение H_c в упомянутом воздухосборнике в нагруженном (рабочем) и разгруженном состояниях, то они как раз получили бы тот самый уровень упругих напряжений $(0,5-0,8)$ σ_T металла, из которого изготовлен воздухосборник. Не может быть в стенках воздухосборника уровень напряжений отличным от напряжений, определяемых внутренним давлением. Иначе говоря, по измеренному на конструкции значению H_c только в нагруженном или только разгруженном состоянии говорить о её НДС беспочвенно. Нужно измерять, по крайней мере, два значения H_c – в нагруженном и разгруженном состояниях.

В частности, при обследовании нефтегазопроводов измерение H_c с целью определения НДС можно совместить с проведением гидротестов.

Недостатком способа [1–3] является и то обстоятельство, что тарировку проводят при нагружении образца одноосным растяжением. Большинство же реальных конструкций, как правило, испытывают сложное напряжённое состояние. В этом случае значение H_c , измеренное в различных направлениях, в зависимости от соотношения компонент напряжённого состояния может изменяться в широких пределах и слабо коррелироваться с результатами измерения H_c при одноосном напряжённом состоянии. Поэтому переносить результаты измерения H_c , полученные при испытании образцов на одноосное растяжение на реальные конструкции, испытывающие сложное напряжённое состояние, некорректно.

Для устранения недостатков определения НДС по результатам измерения H_c на растягиваемом плоском образце в работах [4, 5] предложено тарировочный образец изготавливать в виде полого цилиндра, а нагружение образца выполнять созданием в нём избыточного внутреннего давления или его изгибом, при этом датчик коэрцитиметра ориентировать таким образом, чтобы направление создаваемого магнитного потока совпадало с направлением действия определяемых напряжений. Результаты этих измерений сопоставляют со значениями H_c , измеренными на натурных конструкциях, например, на трубопроводах, и на основании этого делают заключение о нагруженности трубопровода.

Недостаток этого способа заключается в том, что здесь при всех степенях нагружения и при всех уровнях внутреннего давления соотношение кольцевого напряжения к осевому остаётся неизменным, равным 2. Такое НДС не соответствует НДС реальных трубопроводов.

Для повышения точности и корректности тарировки коэрцитиметрического прибора в работе [6] авторами настоящего доклада предложен полый крестообразный образец с тонкими стенками (рис. 4). При приложении к нагрузочным плечам крестообразного образца изгибающих моментов в двух взаимно перпендикулярных направлениях в рабочей части (в рабочей пластине) создаётся НДС с соотношением компонент напряжений, определяемым величинами изгибающих моментов. При этом напряжения, действующие в рабочей пластине, могут быть только растягивающими, только сжимающими или представлять комбинацию растягивающих и сжимающих напряжений.

Крестообразный образец состоит из четырёх нагрузочных плечей 1 и двух квадратных пластин, одна из которых, например, верхняя 2, рабочая. Нагрузочные плечи и пластины соединены сварными швами 3. В качестве нагрузочных плечей используют отрезки стальных профильных труб прямоугольного сечения ГОСТ 13663-86, размером $B \times b \times S$ мм, где B, b, S – ширина, высота и толщина стенки профильной трубы. Длина отдельного плеча L зависит от используемого нагрузочного стенда и может меняться в

широких пределах. Чем больше длина плеча, тем меньше требуемые для создания моментов M_1 и M_2 величины прикладываемых нагрузок.

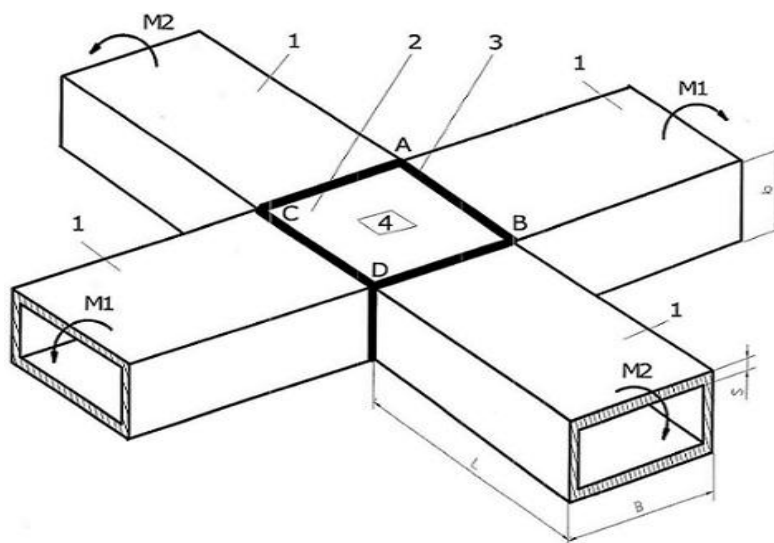


Рис. 4. Крестообразный полый образец

Размеры пластин $AB = BD = DC = CA$ имеют длину, равную ширине профильной трубы в плане (B) и толщину, равную толщине стенки S нагрузочных плечей. В центре рабочей пластины в двух взаимно перпендикулярных направлениях наклеивают тензодатчики перемещений, используемые для установления зависимости между коэрцитивной силой H_c и величинами деформаций (напряжений). Место наклейки датчиков деформации на наружной части рабочей пластины обозначено цифрой 4.

Заключение. При оценке НДС по результатам коэрцитиметрических измерений принимают необоснованные допущения, снижающие достоверность определения уровня действующих в конструкциях напряжений. Выполненный анализ выявил следующие недостатки известных методик:

1. Допущение, согласно которому в металле обследуемой конструкции в процессе её эксплуатации накапливаются такие же повреждения структуры металла, как в растягиваемом плоском образце, ошибочно. Это допущение имеет непосредственное отношение только к испытанному образцу и не может быть распространено на обследуемую конструкцию, так как значения H_c одного и того же металла изначально имеют разброс, обусловленный различными причинами, связанными не только с условиями эксплуатации, но и с технологией изготовления конструкций.

2. Большинство реальных конструкций, как правило, испытывают сложное напряжённое состояние. В этом случае значение H_c , измеренное в различных направлениях, в зависимости от соотношения компонент напряжённого состояния может изменяться в широких пределах и слабо корреспондировать с результатами измерения H_c при одноосном напряжённом состоянии. Поэтому переносить результаты измерения H_c ,

полученные при испытании образцов на одноосное растяжение, на реальные конструкции ошибочно.

3. Для повышения точности и корректности тарировки коэрцитиметрического прибора в работе предложен полый крестообразный образец, нагружаемый изгибающими моментами в двух взаимно перпендикулярных направлениях, позволяющий создавать НДС с любым соотношением компонент напряжений.

Библиографический список

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

2. Мужичкий, В.Ф. Магнитный контроль напряжённо-деформированного состояния и остаточного ресурса стальных металлоконструкций подъёмных сооружений и сосудов, работающих под давлением / В.Ф. Мужичкий, Б.Е. Попов, Г.Я. Безлюдько // 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.

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

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

6. Пат. РФ на полезную модель № 161083 Образец для тарировки коэрцитиметра при плоском напряжённом состоянии / Н.Л. Зайцев. – Опубл. 10.04.2016. Бюл. № 10.

[К содержанию](#)