

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-3-31-35>

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛЬНЫХ ПЛАСТИН МАЛОЙ ТОЛЩИНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОЭРЦИТИМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА

© **Иван Николаевич Андронов, Василий Леонидович Савич***

Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия; e-mail: *vsavitch@yandex.ru

*Статья поступила 28 февраля 2018 г. Поступила после доработки 22 ноября 2018 г.
Принята к публикации 25 ноября 2018 г.*

Представлены результаты исследования деформированного состояния и глубины вмятин в стальных пластинах из низкоуглеродистой кузовной стали К08Ю малой толщины (3 – 5 мм) с применением коэрцитиметрического метода. Известно, что механические напряжения и деформации, возникающие в стальных стержнях и основном металле труб нефтегазового сортамента, оказывают существенное влияние на величину коэрцитивной силы (КС) металла вблизи поверхности образца. Анализировали влияние деформирования пластин и геометрических размеров вмятин на изменение величины КС с помощью коэрцитиметра КМ-445.1 и инструментов для пошагового определения глубины вмятины (штангенциркуль с глубиномером, рулетки, металлической полоски, маркера). Получены расчётные дифференциальные зависимости, связывающие кривизну пластины с глубиной вмятины. Определены линейные деформации, возникающие в пластине, и их интенсивность. Установлены соотношения между КС и деформационными характеристиками пластин с разным характером смятия. Показано, что в пластине, имеющей одинарную вмятину, величина КС монотонно возрастает с ростом глубины вмятины и интенсивности деформаций. В пластине с двойной вмятиной наблюдали волнообразную зависимость КС от глубины и интенсивности деформаций с характерной точкой перегиба. При этом по характеру зависимости можно судить о величине и типе вмятины. Предложенный анализ напряжённого состояния с применением коэрцитиметрического метода позволяет находить геометрические несовершенства поверхности пластин и осуществлять их диагностику.

Ключевые слова: пластина; осевая деформация; интенсивность сдвиговой деформации; коэрцитивная сила; вмятина; коэрцитиметрический метод.

STUDY OF THE STRAINED STATE OF STEEL PLATES OF SMALL THICKNESS USING COERCIMETRY

© **Ivan N. Andronov, Vasily L. Savich***

Ukhta State Technical University, g. Ukhta, Russia; e-mail: *vsavitch@yandex.ru

Received February 28, 2018. Revised November 22, 2018. Accepted November 25, 2018.

The results of studying the strain state and depth of dents in K08Yu low-carbon steel plates of small thickness (3 – 5 mm) using the method of coercimetry are presented. It is known that mechanical stresses and strains that occur in steel rods and base metal of oil and gas pipes have a significant impact on the magnitude of the coercive force (CF) near the sample surface. The effect of plate deformation and geometric dimensions of the dents on the CF magnitude is analyzed using a KM-445.1 coercimeter and tools for stepwise determination of the depth of dents (calipers with a depth gauge, tape measures, metal strip, marker). The calculated differential dependences linking the curvature of the plate with the dent depth are obtained. The intensity of linear strains occurring in the plate is determined. The relations between the coercive force and strain characteristics of plates with different types of collapsing are determined, namely, it is shown that in a plate with a single dent, the value of the coercive force increases monotonically with the depth and intensity of deformations, whereas in a plate with a double dent, there is a complex wave-like dependence of the coercive force magnitude on the depth and intensity of deformations with a characteristic inflection point and the character of the dependence provides a possibility for determination of the size and type of the dent. The proposed analysis of the stress state using the method

of coercimetry makes it possible to detect geometric imperfections on the surface of the plates and carry out their non-destructive diagnostics.

Keywords: plate; axial deformation; shear strain intensity; coercive force; dent; coercimetry.

Развитие методов неразрушающего контроля — важнейшая задача повышения эксплуатационной надежности элементов металлических конструкций в машиностроении и других отраслях современной промышленности. Для контроля дефектов и их устранения применяют разнообразные методы дефектодиагностики и реставрации элементов конструкций и деталей машин до их номинальных геометрических размеров.

Традиционные технологии обнаружения дефектов с помощью толщиномера требуют дополнительного исследования причин изменения толщины изделия. Так, в процессе эксплуатации, например, транспортных средств могут возникать сколы лакокрасочных покрытий, не сопровождающиеся деформацией кузовной пластины. В этом случае толщиномер зафиксирует дефект толщины без фактического деформирования изделия.

Из альтернативных толщинометрии методов с практической точки зрения наибольший интерес представляют магнитные методы диагностики металлоконструкций [1] и прежде всего коэрцитиметрический метод, который нашел прикладное применение в газотранспортной отрасли при анализе напряженного состояния газопроводов [2–8].

Цель работы — исследование деформированного состояния и глубины вмятин в стальных пластинах из низкоуглеродистой стали К08Ю малой толщины (3–5 мм) с применением коэрцитиметрического метода.

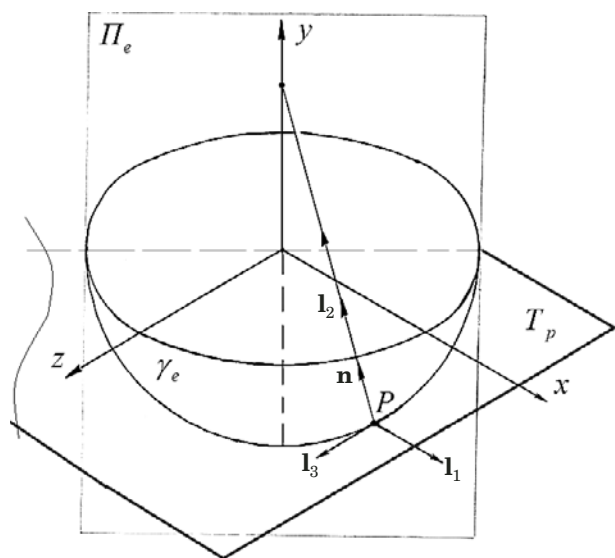


Рис. 1. Схема профиля вмятины

Исследовали деформированное состояние в пластинах, обусловленное локальным смятием. Механические свойства стали К08Ю: $\sigma_T = 190$; $\sigma_B = 270 - 350$ МПа. Для упрощения предполагали, что рассматриваемые вмятины имеют сферическую форму.

На рис. 1 приведена схема профиля сферической вмятины; γ_e — геометрический контур вмятины; P — произвольная точка на глубине вмятины; l_1, l_2, l_3 — единичные векторы точки P (l_1, l_3 расположены параллельно осям x, z); n — вектор нормали для точки P ; Π_e, T_p — плоскости направления линии деформации и недеформированного состояния пластины).

Кривизну вмятины (величину, обратную радиусу кривизны ρ) в плоскости (x, y) определяли из уравнения [9]

$$K_1 = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_x} = -\frac{d^2y/dx^2}{[1 + (dy/dx)^2]^{3/2}}, \quad (1)$$

где $y = y(x, z)$ — глубина вмятины в произвольной точке P с координатами (x, y) .

При этом линейная деформация пластины в направлении l_1 составит

$$\varepsilon_{l1} = \frac{\delta}{2\rho}, \quad (2)$$

где δ — толщина пластины.

Аналогично с учетом сферической симметрии вмятины линейная деформация в направлении l_3 —

$$\varepsilon_{l3} = \frac{\delta}{2\rho}. \quad (3)$$

Исходя из гипотезы неизменности объема материала в процессе деформирования, имеем

$$\begin{aligned} dl_1 dl_3 (1 + \varepsilon_{l1})(1 + \varepsilon_{l3}) dl_2 (1 + \varepsilon_{l2}) &= dl_1 dl_2 dl_3 = \\ &= dl_1 dl_2 dl_3 (1 + \varepsilon_{l1} + \varepsilon_{l3} + \varepsilon_{l1}\varepsilon_{l2})(1 + \varepsilon_{l2}), \end{aligned} \quad (4)$$

где ε_{l2} — линейная деформация в направлении l_2 .

Далее получаем

$$(1 + \varepsilon_{l1} + \varepsilon_{l3} + \varepsilon_{l1}\varepsilon_{l2})(1 + \varepsilon_{l2}) = 1. \quad (5)$$

Пренебрегая величинами второго порядка, находим

$$\varepsilon_{l2} = \frac{1}{1 + \varepsilon_{l1} + \varepsilon_{l3}} - 1 = -\frac{\varepsilon_{l1} + \varepsilon_{l3}}{1 + \varepsilon_{l1} + \varepsilon_{l3}}. \quad (6)$$

Учитывая соотношения (2) и (3), окончательно получаем

$$\varepsilon_{l2} = -\frac{2\varepsilon_{l1}}{1 + 2\varepsilon_{l1}}. \quad (7)$$

Интенсивность сдвиговой деформации определяли по формуле [10]

$$\varepsilon_i = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{(\varepsilon_{l1} - \varepsilon_{l2})^2 + (\varepsilon_{l1} - \varepsilon_{l3})^2 + (\varepsilon_{l2} - \varepsilon_{l3})^2}. \quad (8)$$

Анализировали кузовные пластины с одной и двумя вмятинами (рис. 2). По выделенным равным секторам определяли глубину вмятины с использованием штангенциркуля с глубиномером, коэрцитивную силу (КС) — с помощью коэрцитиметра КМ-445.1 [2]. Относительная погрешность измерения КС не превышала 5 %, абсолютная погрешность измерения глубины — 0,01 мм.

Глубину деформации измеряли по оси y (в направлении, перпендикулярном плоскости T_p), длину — по оси x . Практическое положение плоскости T_p задавали металлической полоской, ориентированной вдоль оси x и жестко зафиксированной в местах отсутствия деформаций или вне

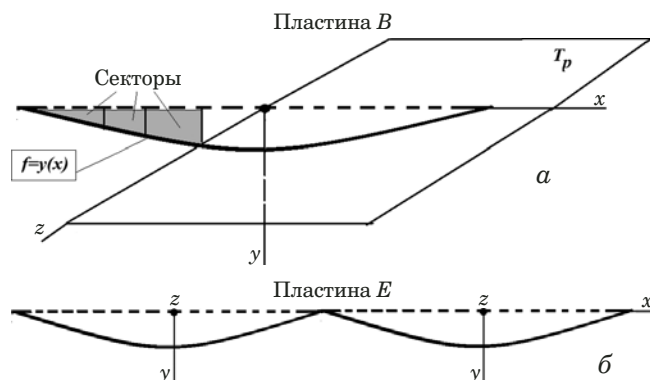


Рис. 2. Схемы с одной (а) и с двумя (б) вмятинами

пластины. Коэрцитиметр ориентировали вдоль оси x .

Кривизну вмятины и линейные деформации определяли по формулам (1) – (3), интенсивность деформации — по (2), (3), (7), (8) с использованием методики численного дифференцирования (программа Excel).

На рис. 3 представлены зависимости линейной (ε_{l3}), сдвиговой (ε_i) деформации и H_c от длины x для пластин В и Е (см. рис. 2).

Видно, что в случае двойной вмятины кривая $\varepsilon_i(x)$ имеет двойной максимум (большой приходится на наиболее глубокий дефект).

Также установили, что кривые $H_c(x)$ (с точностью до знака) повторяют линии прогиба пластин В и Е в плоскости (x, y) . Это свидетельствует о том, что максимум КС достигается в геометри-

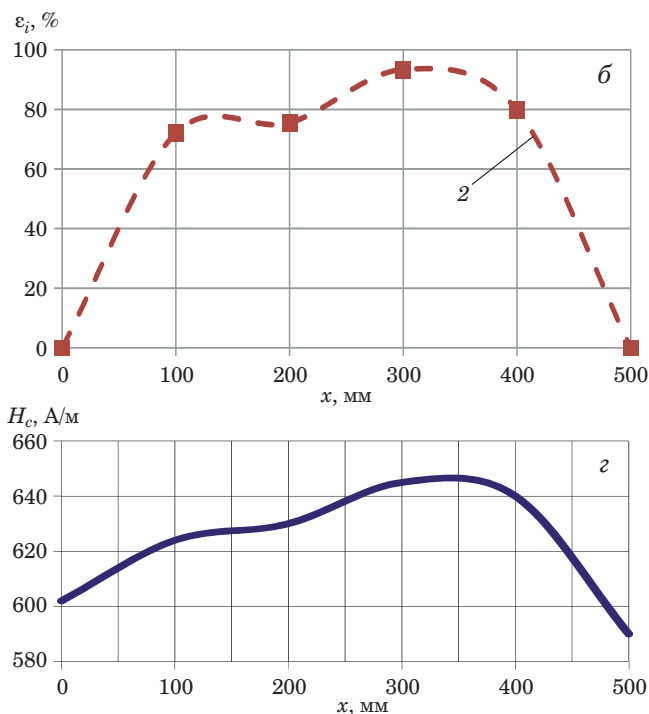
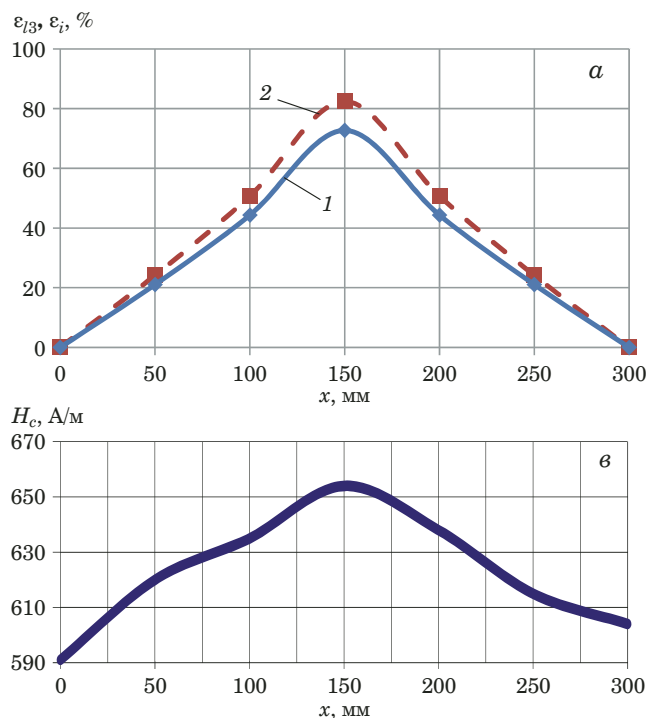


Рис. 3. Зависимости ε_{l3} (1), ε_i (2) и H_c от расстояния x для пластин В (а, б) и Е (б, г)

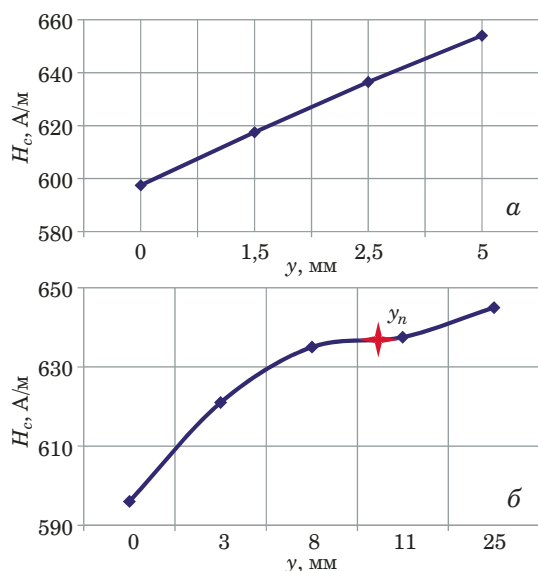


Рис. 4. Зависимости H_c от глубины вмятины y для пластин В (а) и Е (б)

ческом центре одинарной вмятины В. Для двойного дефекта наблюдается характерный двойной (размытый) максимум (рис. 4).

Зависимости H_c от глубины дефекта y (рис. 4) показывают, что в случае одинарной вмятины КС меняется по линейному закону с ростом y . Для двойной вмятины повышение H_c характеризуется следующими соотношениями: $d^2H_c/dy^2 < 0$ при $y < y_n$ и $d^2H_c/dy^2 > 0$ при $y > y_n$ (y_n — координата точки перегиба величины КС при ее изменении вдоль оси y).

Зависимости КС от интенсивности сдвиговой деформации приведены на рис. 5. Видно, что для одинарной вмятины наблюдается практически линейный рост H_c с увеличением ε_i . В случае двойного дефекта повышение H_c имеет волнообразный характер.

Таким образом, проведенные исследования пластин с различной глубиной смятия показали, что при одинарной вмятине величина КС монотонно возрастает с ростом ее глубины и интенсивности деформаций. В случае двойного дефекта наблюдается волнообразная зависимость КС от глубины и интенсивности деформаций с характерной точкой перегиба. По характеру зависимости КС от положения точки измерения (координат x, y) можно судить о величине и характере вмятины.

Следовательно, коэрцитиметрический метод можно применять при диагностике качества поверхности пластин, например, в кузовных частях автомобилей. Существующие методы дефектоскопии (с помощью толщиномера и др.) не позволяют обнаруживать отреставрированные элементы кузова. Предлагаемый подход дает возможность не только диагностировать дефекты пла-

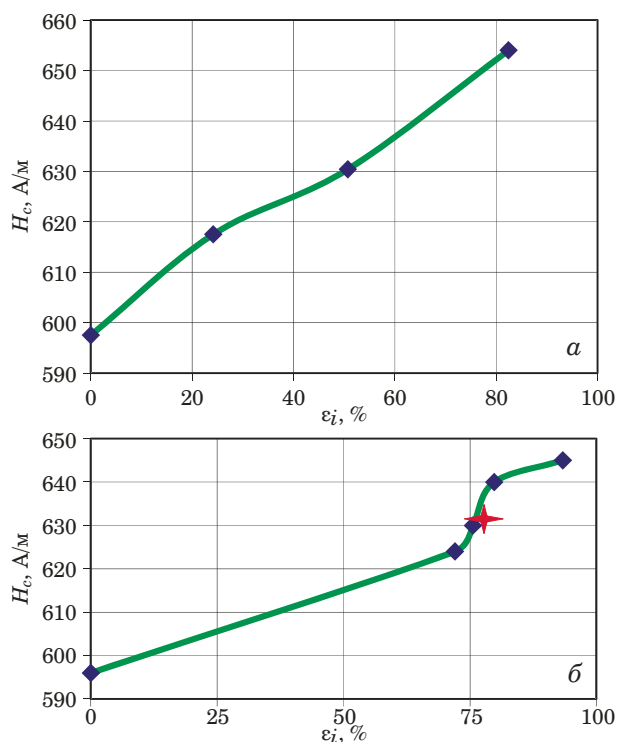


Рис. 5. Зависимости H_c от величины интенсивности сдвиговой деформации ε_i для пластин В (а) и Е (б)

стин после реставрации, но и фиксировать замену одной кузовной пластины на другую.

ЛИТЕРАТУРА

1. Толмачев И. И. Магнитные методы контроля и диагностики: учебное пособие. — Томск: Томский политехнический университет, 2008. — 216 с.
2. Теплинский Ю. А., Агиней Р. В., Кузьбожев А. С., Андронов И. Н. Исследование особенностей изменения магнитных параметров стали марки 17Г1С в условиях одноосной растягивающей нагрузки / Контроль. Диагностика. 2004. № 12. С. 6 – 8.
3. Агиней Р. В., Андронов И. Н., Корепанова В. С. Анализ вида напряженного состояния газопроводных труб коэрцитиметрическим методом / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2008. Т. 74. № 12. С. 52 – 54.
4. Андронов И. Н., Агиней Р. В., Леонов И. С. Коэрцитиметрический анализ плосконапряженного состояния в магнитных сплавах / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. Т. 79. № 6. С. 55 – 58.
5. Андронов И. Н., Агиней Р. В., Леонов И. С. Анализ плоского напряженного состояния стальных трубопроводов по лепестковым диаграммам коэрцитивной силы / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. Т. 79. № 12. С. 50 – 52.
6. Андронов И. Н., Агиней Р. В., Благовисный П. В. Коэрцитиметрический анализ напряженного состояния в стальных трубах, нагруженных поперечными силами и внутренним давлением / Трубопроводный транспорт [теория практика]. 2014. № 5 – 6(45 – 46). С. 66 – 71.
7. Lo C. C. H., Kinser E., Jiles D. Modeling the interrelating effect of plastic deformation and stress on magnetic properties of materials / J. Appl. Phys. 2003. Vol. 93. N 10. P. 6626 – 6628.
8. Андронов И. Н., Благовисный П. В., Алиев Т. Т., Беляев С. Н. Анализ остаточных деформаций в конструкционных сталях коэрцитиметрическим методом / Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2016. № 7. С. 9 – 14.

9. **Феодосьев В. И.** Сопротивление материалов: учебник для вузов. — М.: Наука, 1986. — 512 с.
10. **Малинин Н. Н.** Прикладная теория пластичности и ползучести. — М.: Машиностроение, 1968. — 400 с.

REFERENCES

1. **Tolmachev I. I.** Magnetic methods of control and diagnostics: textbook. — Tomsk: Izd. TPU, 2008. — 216 p. [in Russian].
2. **Teplinskii Yu. A., Aginei R. V., Kuz'bozhev A. S., Andronov I. N.** Study of the peculiarities of changes in magnetic parameters of steel grade 17G1S under uniaxial tensile load / Kontrol'. Diagn. 2004. N 12. P. 6 – 8 [in Russian].
3. **Aginei R. V., Andronov I. N., Korepanova V. S.** Analysis of type of stress state of gas pipelines coercive method / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2008. Vol. 74. N 12. P. 52 – 54 [in Russian].
4. **Andronov I. N., Aginei R. V., Leonov I. S.** Coercitometric analysis flat stress state in magnetic alloys / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2013. Vol. 79. N 6. P. 55 – 58 [in Russian].
5. **Andronov I. N., Aginei R. V., Leonov I. S.** Analysis of the plane stress state of steel pipelines by petal diagrams of coercive force / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2013. Vol. 79. N 12. P. 50 – 52 [in Russian].
6. **Andronov I. N., Aginei R. V., Blagovisnyi P. V.** Coercitometric analysis of the stress state of a steel pipe loaded with transverse forces and internal pressure / Truboprovod. Transp. [Teor. Prakt.]. 2014. N 5 – 6(45 – 46). P. 66 – 71 [in Russian].
7. **Lo C. C. H., Kinser E., Jiles D.** Modeling the interrelating effect of plastic deformation and stress on magnetic properties of materials / J. Appl. Phys. 2003. Vol. 93. N 10. P. 6626 – 6628.
8. **Andronov I. N., Blagovisnyi P. V., Aliev T. T., Belyaev S. N.** Analysis of residual strains in structural steels coarticulation method / Stroit. Neft. Gaz. Skvazhin Sushe More. 2016. N 7. P. 9 – 14 [in Russian].
9. **Feodos'ev V. I.** Strength of materials: Textbook for technical colleges. — Moscow: Nauka, 1986. — 512 p. [in Russian].
10. **Malinin N. N.** Applied theory of plasticity and creep. — Moscow: Mashinostroenie, 1968. — 400 p. [in Russian].