

5. Inozemtsev A. A., Drokov V. G., Drokov V. V., et al. The state and development perspectives of spectral tribodiagnosics of aircraft gas-turbine engines. Part 2. Elemental composition of wear particles accumulated in lubrication system of aircraft gas-turbine engines / Kontr. Diagn. 2011. N 3(153). P. 52 – 61 [in Russian].
6. Smagunova A. N., Karpukova O. M. Mathematical statistics methods in analytical chemistry. — Irkutsk: Izd. Irkutsk. gos. univ., 2008. — 339 p. [in Russian].
7. Pavlinsky G. V., Drokov V. G., Baranov O. E., Vladimirova L. I., Rybakova A. A. Relation between X-Ray fluorescence intensity of specific particle and its shape, size and space orientation / Kontr. Diagn. 2001. N 6. P. 8 – 15 [in Russian].
8. Pavlinsky G. V. Fundamentals of X-Ray Physics. — Cambridge International Science Publishing Ltd. UK, 2008. — 244 p.
9. Certificate of state registration of the computer program N 2015616927 / Khodunayev A. Yu. — registered 25.06.2015 [in Russian].

УДК 621.642.3:539.3

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ДЕФЕКТНЫХ УЧАСТКАХ ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ

© М. И. Кожин¹, Г. Г. Кримчеева²

Статья поступила 5 августа 2016 г.

С использованием метода магнитной памяти металла исследованы дефектные участки резервуарных конструкций, характеризуемые аномальным распределением магнитных параметров: напряженности собственного магнитного поля рассеяния и локального изменения его градиента. Обследованы (с выводом из эксплуатации и без) более 80 вертикальных и горизонтальных резервуаров, изготовленных из сталей Ст3 и 09Г2С и расположенных в различных географических зонах (Европейский Север, Ямало-Ненецкий автономный округ, Восточная Сибирь и Дальний Восток). Установлено, что по характеру распределений напряженности собственного магнитного поля рассеяния и его градиента над повреждениями можно визуализировать и документировать коррозионные и трещиноподобные повреждения на магнитограммах, полученных с помощью малогабаритных магнитометрических приборов типа ИКН (измерителя концентрации напряжений). Показано, что по магнитному сигналу можно идентифицировать зоны концентрации напряжений без дополнительных дефектоскопических измерений, а по значениям магнитного поля и его градиента — определять параметры повреждений. В большинстве случаев (90 %) расположения магнитных аномалий и коррозионных трещиноподобных повреждений в резервуарных конструкциях совпадали с результатами индентификации дефектов с использованием традиционных методов неразрушающего контроля (вихретоковой, магнитопорошковой и ультразвуковой дефектоскопии, ультразвуковой толщинометрии, визуально-оптического, измерительного контроля и др.).

Ключевые слова: цилиндрические стальные резервуары (сосуды); магнитная память металла; линии концентрации напряжений; напряженность собственного магнитного поля рассеяния; неразрушающий контроль; коррозия; трещина.

Метод магнитной памяти металла (МПМ) — относительно новое направление в технической диагностике — основан на регистрации и анализе распределения напряженности собственных магнитных полей рассеяния (СМПР) на поверхности изделий для определения зон концентрации напряжений, дефектов, неоднородности структуры металла и сварных соединений из ферромагнитных материалов [1 – 3]. МПМ-метод не требует специальной зачистки металла и искусственного намагничивания. СМПР возникают в зонах как скопления дислокаций под действием рабочих или остаточных напряжений, так и максимальной неоднородности структуры металла [3 – 6].

Установлено, что СМПР на поверхности объекта контроля (стального образца, трубопровода, резервуа-

ра) интегрально отображают дефекты и структурные неоднородности материала, а также фактические остаточные напряжения и деформации [7, 8]. Однако дешифрирование магнитных аномалий, выявляемых МПМ-методом, усложняется, если контроль возможен только с наружной поверхности (например, в случае контроля заполненного нефтепродуктового резервуара в целях выявления коррозионных поражений, расположенных с противоположной (внутренней) стороны поверхности). При этом для оценки и прогнозирования состояния объекта контроля (например, несущей способности резервуара) большое значение имеют точность измеряемых параметров дефектов и их классификация.

Цель работы — исследование характера распределения магнитных параметров на дефектных участках резервуарных конструкций с визуализацией повреждений на магнитограммах.

¹ Филиал ООО «Газмашпроект» «Нагатинский», Москва, Россия; e-mail: miikov@ya.ru

² Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия.

Исследовали более 80 вертикальных и горизонтальных цилиндрических резервуаров для хранения нефтепродуктов, изготовленных из сталей Ст3 и 09Г2С и расположенных на Европейском Севере, в Ямало-Ненецком автономном округе, Восточной Сибири и на Дальнем Востоке. Они представляют собой замкнутые цилиндрические сосуды, состоящие из нескольких листовых обечайек (поясов). Срок эксплуатации составлял 11 – 59 лет. Техническое диагностирование проводили как с выводом объекта контроля из эксплуатации, так и без.

Техническое состояние резервуаров, включая оперативное определение поврежденных зон (зон концентрации напряжений — ЗКН), оценивали МПМ-методом. Для идентификации дефектов проводили дополнительный дефектоскопический контроль (ДДК) с использованием традиционных методов: вихретоковой и магнитопорошковой дефектоскопии (ВД, МПД), ультразвуковой дефектоскопии (УЗД), ультразвуковой толщинометрии (УЗТ), визуально-оптического и измерительного контроля (ВИК).

Диагностику резервуаров МПМ-методом осуществляли в автоматическом режиме. Применяли специализированные магнитометрические измерители концентрации напряжений (ИКН), которые позволяли регистрировать распределение напряженности СМПР в диапазоне ± 2000 А/м с погрешностью не более 5 % и выявлять ЗКН и напряженно-деформированное состояние с точностью до 1 мм.

Корпуса горизонтальных и нижние пояса корпусов (стенки) вертикальных резервуаров, как наиболее напряженные элементы, сканировали в меридиональном и кольцевом направлениях. Кольцевое сканирование проводили по трем сечениям обечайки, меридиональное — по восьми (через 45° по окружности между кольцевыми сварными швами) (рис. 1). Сварные швы сканировали последовательно по всей их длине (два преобразователя при контроле по зонам термического влияния располагали по обеим сторонам шва, а один — между ними посередине) [1, 3].

Уровень концентрации напряжений (источников повреждений) определяли по величине градиента напряженности магнитного поля (коэффициента интенсивности) [1, 6]

$$K_{ин} = dH/dx, \quad (1)$$

где dH и dx — изменение напряженности магнитного поля (А/м) и расстояние (мм) между двумя точками контроля вдоль линии сканирования.

Общий признак ЗКН и развитых дефектов — резкое локальное изменение магнитного поля H и его градиента dH/dx ($K_{ин}$). При этом зонам максимальной концентрации напряжений соответствуют области с наибольшими величинами градиента напряженности магнитного поля (значения $K_{ин}$, как правило, превышают в два и более раза средний уровень градиента).

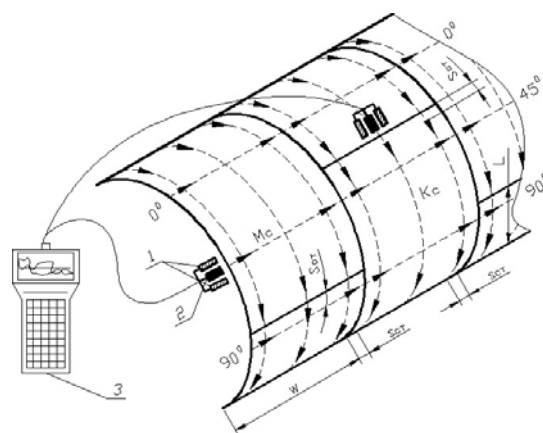


Рис. 1. Схема контроля обечайек (поясов) резервуаров: 1 — феррозондовые преобразователи каналов измерений для регистрации напряженности поля; 2 — датчик измерения длины; 3 — прибор типа ИКН с блоком энергонезависимой памяти и экраном для отображения графической информации (M_c и K_c — сканирование датчиком в меридиональном и кольцевом направлениях; S_{ct} — толщина стенки; W , L — ширина и длина листа обечайки)

На рис. 2 приведено типичное распределение магнитных параметров над коррозионными повреждениями (горизонтальный резервуар). Видно, что в зоне коррозии нормальная (H_y) и тангенциальная (H_x) составляющие напряженности магнитного поля расходятся, образуя магнитную аномалию в форме петли. Значение градиента поля dH/dx в точках пересечения ($ZK_{max} 1$ и $ZK_{max} 2$) в 3 – 4 раза выше среднего.

Остаточную толщину стенки рассчитывали по тригонометрической зависимости [9]:

$$h = l/2, \quad (2)$$

где l — длина дефекта, определяемая по графику градиента поля, мм.

Глубина коррозионных разъеданий стенки резервуара в $ZK_{max} 2$ (см. рис. 2, б), рассчитанная по соотношению (2), составила 4, а минимальная толщина металла обечайки по результатам ДДК (метод УЗТ) — 3,7 мм (номинальная толщина — 9 мм).

Длина поврежденного участка, определенная по максимальным значениям градиента поля, составляла 495 (см. рис. 2, а), а по данным УЗТ и ВИК — 490 мм.

Следует отметить, что в ряде случаев резкое перераспределение поля (магнитная аномалия), фиксируемое на магнитограммах, свидетельствовало об интенсивном процессе разъедания металла в зонах концентрации напряжений.

В результате сопоставления данных, полученных методами МПМ, ВИК и УЗТ, совпадение расположения петлеобразных магнитных аномалий и коррозионных зон наблюдали в 10 случаях из 11 (рис. 3). Процент сходимости результатов контроля, полученных МПМ-методом (в сравнении с методами ВИК и УЗТ), колебался от 95 до 100 %.

Несоответствие в результатах исследования по количеству дефектов (резервуар № 7, см. рис. 3) можно

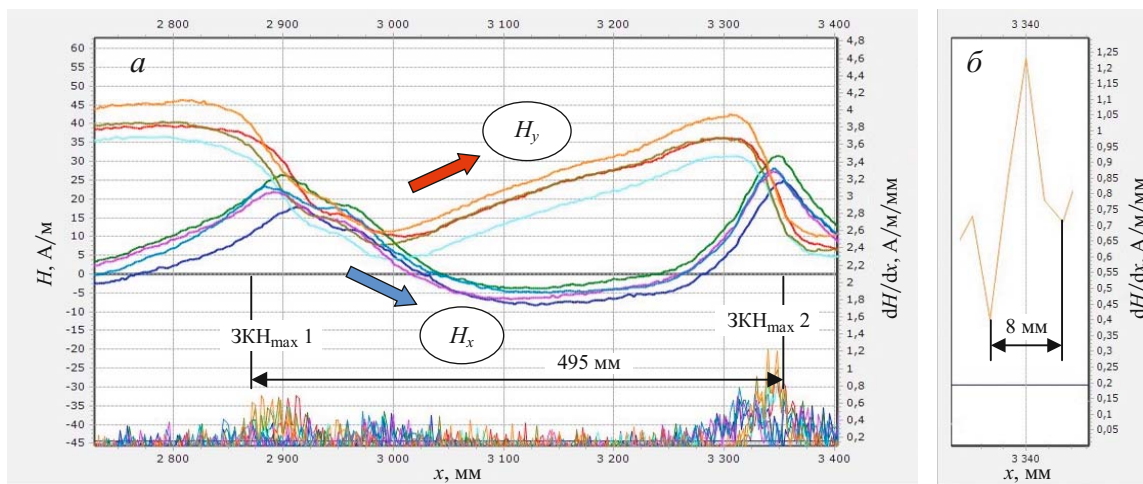


Рис. 2. Характерное расположение линий концентрации напряжений в коррозионной зоне обечайки горизонтального резервуара: *а* — магнитограмма распределения магнитного поля и его градиента dH/dx ; *б* — фрагмент распределения градиента поля dH/dx в зоне максимальной концентрации напряжений

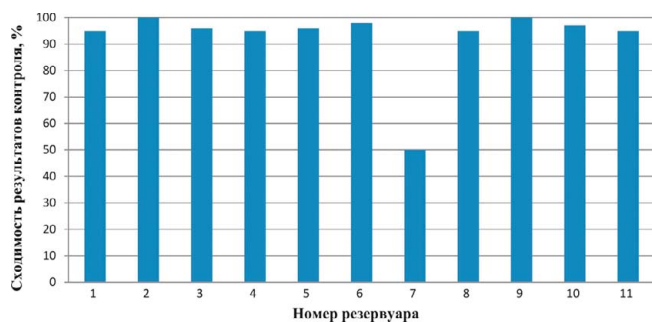


Рис. 3. Гистограмма сходимости результатов исследований коррозионных повреждений методами МПМ, ВИК и УЗТ

объяснить различием в физической природе методов неразрушающего контроля. Так, МПМ-метод слабо реагирует на повреждения, которые не формируют концентрации напряжений, но подобные дефекты не опасны. В то же время методы УЗТ (дефектоскопии) и ВИК выявляют коррозию независимо от концентрации напряжений. При этом идентификация повреждений показала, что расхождение (до 5 %) в измерении протяженности коррозионных участков обусловлено тем, что МПМ-метод по сравнению с другими облада-

ет более высокой чувствительностью и точностью локализации ЗКН (рис. 4, *а*).

На рис. 4, *б* представлены результаты обработки данных измерения минимальной толщины металла коррозионных участков резервуаров.

Типичная магнитограмма, полученная по результатам сканирования основного металла в зоне установки кольца жесткости на горизонтальном резервуаре (трещиноподобные дефекты), приведена на рис. 5. Видно, что напряженность СМПР над трещиной менялась скачкообразно. Значение градиента dH/dx по краям трещины ($ЗКН_{max 3}$, $ЗКН_{max 4}$) в 4 раза превышало среднюю величину. Глубина залегания трещины, определенная по выражению (2), составила 1,7 ($ЗКН_{max 3}$), а длина (по максимумам градиента поля) — 134 мм (по результатам ДДК (метод ВД) ≈ 2 и 129 мм соответственно).

Аналогичный характер расположения линий концентрации напряжений выявили при контроле сварных швов (см. рис. 5, *б*). В результате ультразвукового контроля на глубине 5–6 мм (толщина стенки — 9 мм) обнаружили плоскостной дефект длиной 86 мм

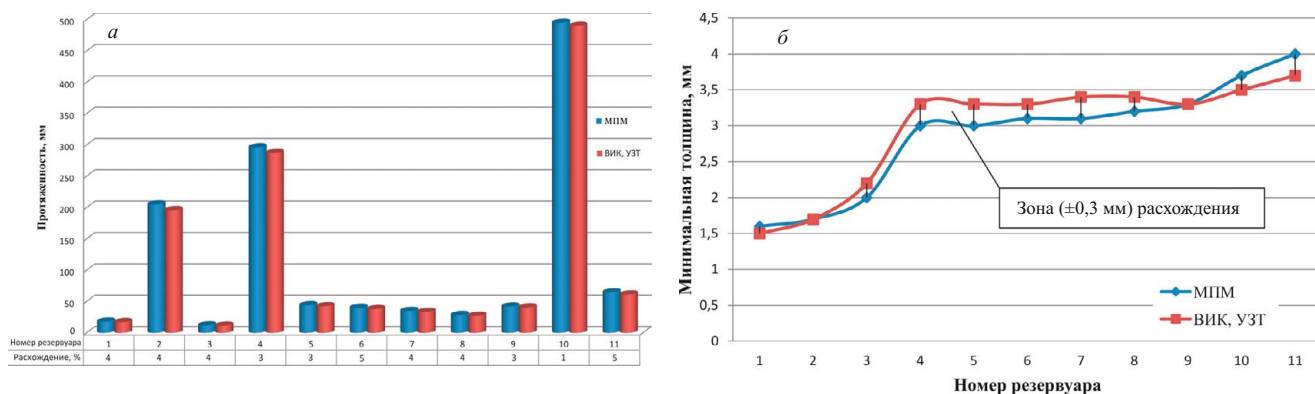


Рис. 4. Результаты анализа данных измерения протяженности (*а*) и толщины металла (*б*) коррозионных участков методами МПМ, ВИК и УЗТ

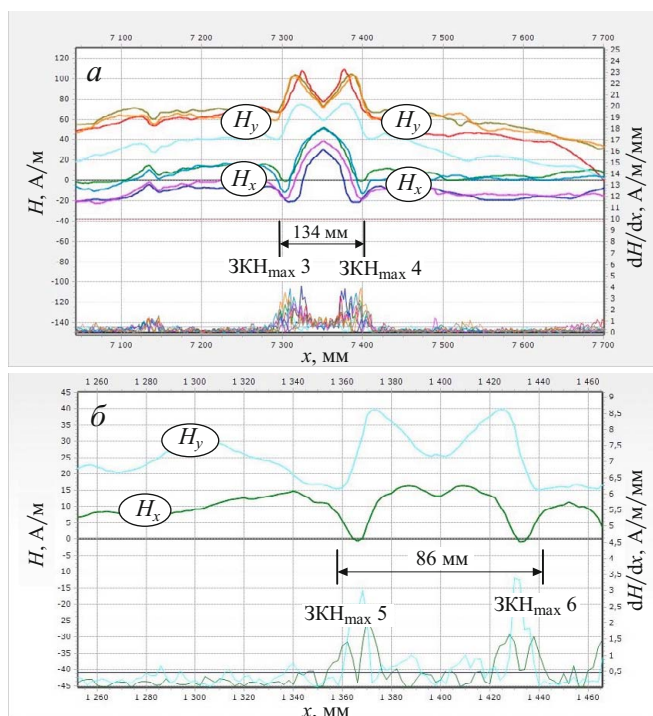


Рис. 5. Характерное расположение магнитной аномалии в случае трещиноподобного дефекта в основном металле (горизонтальный резервуар) (а) и монтажного сварного шва (вертикальный резервуар) (б)

(глубина залегания дефекта, определенная по соотношению (2), составила 5 мм).

В результате обработки данных, полученных методами МПМ, ВИК и традиционной дефектоскопии (ультразвуковой, магнитопорошковой и вихретоковой), расположения магнитных аномалий и трещиноподобных дефектов совпадали в 27 случаях из 30 (90 %) (рис. 6).

При контроле сварных соединений в ряде случаев отмечали смещение (до двух толщин стенок) расположения магнитных сигналов, фиксируемых на поверхности шва, относительно глубинного дефекта, обнаруживаемого ультразвуковой дефектоскопией.

Таким образом, исследованиями характера изменения магнитных параметров на дефектных участках резервуарных конструкций установлена хорошая сходимость (90 – 100 %) результатов, полученных методами МПМ, ВИК, традиционной дефектоскопии

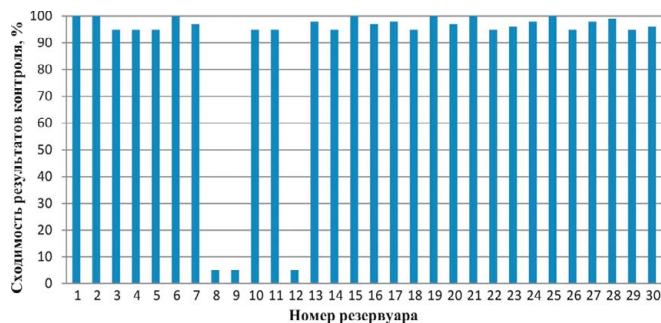


Рис. 6. Гистограмма сходимости результатов исследований трещиноподобных дефектов методами МПМ, ВИК, УЗД, ВД (МПД)

(магнитопорошковой, вихретоковой, ультразвуковой) и толщинометрии. Характер распределения напряженности СМР над коррозионными и трещиноподобными повреждениями позволяет визуализировать и документировать повреждения на магнитограммах. При этом идентификация ЗКН возможна по магнитному сигналу без дополнительных дефектоскопических измерений, а параметры повреждений можно определять по значениям градиента и напряженности поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Методические указания по техническому диагностированию сосудов и аппаратов с использованием метода магнитной памяти (ММП) металла. — М.: ООО «Энергодиагностика», 2005. — 85 с.
2. ГОСТ Р 53006–2008. Оценка ресурса потенциально опасных объектов на основе экспресс-методов. — М.: Стандартинформ, 2009. — 9 с.
3. ГОСТ Р ИСО 24497-1–2009. Контроль неразрушающий. Метод магнитной памяти металла. — М.: Стандартинформ, 2010. — 7 с.
4. Власов В. Т., Дубов А. А. Физические основы метода магнитной памяти металла. — М.: ЗАО «Тиссо», 2004. — 424 с.
5. Власов В. Т., Дубов А. А. Физическая теория процесса «деформация – разрушение». Ч. 1. Физические критерии предельных состояний металла. — М.: ЗАО «Тиссо», 2007. — 517 с.
6. Дубов А. А., Дубов Ал. А., Колокольников С. М. Метод магнитной памяти металла и приборы контроля: Учеб. пособие. — М.: ЗАО «Тиссо», 2008. — 365 с.
7. Дубов А. А. Исследование свойств металла с использованием эффекта магнитной памяти металла / МиТОМ. 1997. № 9. С. 35 – 39.
8. Горичкий В. М., Дубов А. А., Демин Е. А. Исследование структурной повреждаемости стальных образцов с использованием метода магнитной памяти металла / Контроль. Диагностика. 2000. № 7. С. 23 – 27.
9. Дубов А. А., Колокольников С. М. Оценка качества сварных соединений методом магнитной памяти металла в сравнении с радиационным и ультразвуковым методами / Технология машиностроения. 2007. № 3. С. 71 – 75.

UDC 621.642.3:539.3

STUDY OF MAGNETIC PARAMETERS OF THE DEFECTIVE AREAS OF THIN-WALLED CYLINDRICAL TANKS

© M. I. Kozhinov and G. G. Krimcheeva

Submitted August 5, 2016.

The defective areas of tanks constructions with abnormal dispersion of magnetic parameters (strength of self-magnetic dispersion field and local change of the field gradient) are analyzed using the magnetic memory method. More than 80 horizontal and vertical tanks made of steel ST3 and 09G2S were examined without their retirement from service and some of them were partially subjected to full inspection in different geographical regions (Northern Europe, Yamalo-Nenets Autonomous Okrug, Eastern Siberia and Far East). It was determined that the character of distribution of the strength and gradient of self-magnetic dispersion field atop damages provides visualization and recording of corrosive fracture and cracks using compact magnetometric devices similar to SCM (stress concentration meter). It is shown that stress concentration zones can be identified by a magnetic signal without any optional visual control and the values of strength and gradient of the self magnetic field provide determination of the damage parameters. In most cases (90 %) the results of traditional methods of non-destructive testing (eddy current flaw detection, fluorescent magnetic testing, ultrasound detection and optical visual control) match the location of magnetic anomalies and corrosive crack-like damages of tanks.

Keywords: cylindrical steel tanks (vessels); metal magnetic memory; stress concentration lines; strength of self-magnetic dispersion field; non-destructive testing; corrosion; crack.

REFERENCES

1. Methodical instructions for technical diagnostics of vessels and apparatus with using the method of metal magnetic memory. — Moscow: Izd. OOO «Énergodagnostika», 2005. — 85 p. [in Russian].
2. RF State Standard GOST R 53006–2008. Estimation of potential dangerous objects lifetime on the basis on express methods. — Moscow: Standartinform, 2009. — 9 p. [in Russian].
3. RF State Standard GOST R ISO 24497-1–2009. Non-destructive testing. Metal magnetic memory. — Moscow: Standartinform, 2010. — 7 p. [in Russian].
4. Vlasov V. T., Dubov A. A. Physical bases of metal magnetic memory method. — Moscow: Izd. ZAO “Tisso,” 2004. — 424 p. [in Russian].
5. Vlasov V. T., Dubov A. A. Physical theory of process “deformation – destruction.” Part 1. The physical criteria for the limiting states of a metal. — Moscow: Izd. ZAO “Tisso,” 2007. — 517 p. [in Russian].
6. Dubov A. A., Dubov A. A., Kolokol’nikov S. M. Method of metal magnetic memory and monitoring instruments. Tutorial. — Moscow: Izd. ZAO “Tisso,” 2008. — 365 p. [in Russian].
7. Dubov A. A. The analys of metal properties with using the method of metal magnetic memory / Metalloved. Term. Obrab. Met. 1997. N 9. P. 35 – 39 [in Russian].
8. Goritskii V. M., Dubov A. A., Demin E. A. The analys of structural defects of steel models with using the method of metal magnetic memory / Kontr. Diagn. 2000. N 7. P. 23 – 27 [in Russian].
9. Dubov A. A., Kolokol’nikov S. M. Estimation of quality of welded joint with using the method of metal magnetic memory in comparison with radiation and ultrasonic methods / Tekhnol. Mashinostr. 2007. N 3. P. 71 – 75 [in Russian].

УДК 621.7.043:621.785

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУКТУРНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ СТАЛЕЙ X12 И P6M5 МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

© И. А. Панкратов, И. Н. Степанкин¹

Статья поступила 23 декабря 2015 г.

Методами атомно-силовой микроскопии проведен сравнительный анализ упругих характеристик структурных составляющих многофазных материалов. В процессе взаимодействия вершины зонда с поверхностью исследуемого образца в динамическом режиме работы атомно-силового микроскопа фиксировали изменения динамических характеристик микроконсоли (амплитуду и фазу колебаний, резонансную частоту). В результате одновременно с визуализацией топографии поверхности регистрировали фазовый контраст полиморфных материалов с наномасштабным разрешением. Используя полученные данные, определяли упругие характеристики структурных составляющих и упрочненных слоев сталей ледебуритного класса X12 и P6M5. Для оценки упругих характеристик поверхностно-модифицированных слоев материалов проводили сопоставительный анализ фазового контраста на подготовленной поверхности составных (из двух половин, каждая из которых имела модифицированный слой) образцов. Совмещая образцы по поверхностям с модифицированными слоями, половинки жестко скрепляли и место стыка шлифовали. Полученный поперечный микрошлиф позволял исследовать тонкие прослойки двух модифицированных слоев и подложку с обеих сторон. Оценка упругих характеристик структурных составляющих и тонких поверхностных слоев сталей показала, что картина распределения фазово-

¹ Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого, г. Гомель, Республика Беларусь; e-mail: igor-stepankin@mail.ru