

Таким образом, предложенная модель позволяет соотнести оптические признаки, используемые врачом при диагностическом исследовании мазков крови, с количественными признаками в соответствии с предложенной моделью. Использование этих признаков при автоматической классификации позволит создать систему автоматизированного анализа мазков крови, ориентированную на распознавание бластных клеток и определение их типов.

Заключение. Предложена модель описания структуры хроматина ядер лейкоцитов периферической крови на основе представления изображения ядра клетки в виде совокупности геометрических фигур с последующей статистической оценкой их морфологических характеристик. На основе предложенной модели разработаны метод выделения структурных элементов на изображении ядер лейкоцитов и соответствующее программное обеспечение. Проведен эксперимент по распознаванию типов клеток крови, и определены погрешности при их дифференцировке. Экспериментальное исследование по проверке адекватности модели показало эффективность предложенного подхода.

Л и т е р а т у р а

1. **Руководство** по гематологии: в 3 т. Т. 1. / Под ред. А. И. Воробьева. М.: Ньюдиамед, 2007.
2. **Луговская С. А. и др.** Лабораторная гематология. Тверь: Изд-во «Триада», 2006.
3. **Никитаев В. Г. и др.** Стратегия применения автоматизированных анализаторов микроскопических изображений в диагностике острых лейкозов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2006. № 10. С. 56—62.

4. **Штадельман Ж. В., Спиридонов И. Н.** Автоматическая классификация лейкоцитов на изображениях мазков крови // Медицинская техника. 2012. № 2. С. 43—47.

5. **Медовый В. С. и др.** Сравнение характеристик проточных, микроскопических визуальных и микроскопических автоматических методик цитоанализа // Клиническая лабораторная диагностика. 2008. № 12. С. 33—36.

6. **Никитаев В. Г. и др.** Концептуальная модель распознавания бластных клеток в системе компьютерной микроскопии // Спецтехника и связь. 2011. № 4—5. С. 67—69.

7. **Власов В. А. и др.** Построение статистических тестов для испытания автоматизированных медицинских систем анализа микроскопических изображений // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2008. № 4. С. 46—48.

8. **Никитаев В. Г. и др.** Особенности проектирования систем распознавания образов для диагностики острых лейкозов с применением методов компьютерной микроскопии // Измерительная техника. 2012. № 5. С. 65—68; **Nikitaev V. G. et al.** Characteristics of the design of systems for the recognition of shapes for the diagnostics of acute leukoses using methods of computer microscopy // Measurement Techniques. 2012. V. 55. N. 5. P. 583—588.

9. **Бердникович Е. Ю. и др.** Построение базы знаний для интерактивного распознавания в системах компьютерной микроскопии // Измерительная техника. 2012. № 10. С. 67—79; **Berdnikov E. Yu. et al.** Construction of a knowledge base for interactive recognition in systems for computer microscopy // Measurement Techniques. 2013. V. 55. N. 10. P. 1219—1223.

Дата принятия 18.03.2014 г.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

620.179.14

Измерения послойной концентрации водорода в титане методом вихревых токов разной частоты

В. В. ЛАРИОНОВ, А. М. ЛИДЕР, Д. Н. КРАСНОВ

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия,
e-mail: lvv@tpu.ru

Предложен способ послойного определения концентрации водорода в титане при использовании вихревых токов разной частоты. Описана методика использования стандартного образца и схема измерений для конкретных технических ситуаций.

Ключевые слова: вихретоковый датчик, послойное определение водорода, частота тока.

A method of layerwise determination of hydrogen content in titanium at use of different frequency eddy currents is suggested. The procedure of using the specially manufactured certified reference material of the developed standard and the scheme of measurements for concrete technical situations is described.

Key words: eddy current sensor, stratified determination of hydrogen, current frequency.

Различные технологические операции, например мелирование, связанные с производством титановых заготовок и проката, сопровождаются неравномерным насыщением

титана водородом. Несмотря на характерные для титана диффузионные эффекты и образование гидридов, снижающих подвижность водорода, существует распределение

концентрации водорода C_{H_2} по глубине титанового листа. В процессе эксплуатации в металле наблюдаются сложные структурные изменения: на определенной глубине образуются слои, насыщенные водородом, изменяются параметры кристаллической решетки. Последующее облучение металла электронами и рентгеновскими квантами сопровождается образованием кратеров, количество и размер которых зависит от вида металла и концентрации в нем водорода. В результате уменьшается пластичность металла, снижаются эксплуатационные свойства деталей и появляются дефекты структуры [1], причем даже при незначительных динамических нагрузках в указанных местах формируются трещины, приводящие к разрушению детали в условиях эксплуатации. Одним из методов неразрушающего измерения концентрации водорода в металлах является метод вихревых токов [2, 3], применяемый также при диагностике многослойных структур с локализованными потерями металла [4]. Использование метода вихревых токов разной частоты, в частности, для дефектоскопии описано в [3–5]. Задача сводится к аналитическому решению соответствующей системы уравнений Максвелла [6].

Цель данной статьи — разработка метода послойного определения концентрации водорода в титане и выявление факторов, влияющих на точность измерений.

Подготовка образцов для анализа. В рассматриваемом случае физической основой измерений модификации титановых сплавов является зависимость активной и емкостной составляющей вихревых токов от степени его насыщения водородом на различных глубинах.

Для анализа использовали серию прямоугольных плоских образцов титана BT1-0 толщиной 2–10 мм различных размеров, которые механически полировали. Для снятия внутренних напряжений и удаления растворенных газов их отжигали в вакууме (0,00138 Па в течение 60 мин) при температуре от 550 °С с последующим охлаждением в печи. После этого образцы насыщали водородом на установке PCI «Gas Reaction Controller» по методу Сиверта. Контроль концентрации водорода в образцах осуществляли с помощью анализатора RHEN 602 фирмы LECO. Образование гидридов титана исследовали на дифрактометре PDIFFBeamline [8]. Также применяли оптический (OLYMPUS) и сканирующий (Philips SEM515) микроскопы. Вихревые токи измеряли магнитным анализатором 3МА на частотах 2,5 кГц — 1 МГц. Прибор калибровали по IARM 178B:Ti-6Al-6V-2Sn/UNSR 56620 фирмы ARMI (USA), а также по образцам из меди.

Учет краевых эффектов при измерениях вихревых токов на образцах различных геометрических размеров. Вихревое магнитное поле в исследуемом образце распространяется за пределы вихретокового датчика. При этом его сигнал может существенно зависеть от размеров применяемого образца. Для учета краевых эффектов измерения проводили на образцах из титана и отожженной меди разных геометрических размеров. Результаты измерений активной и реактивной составляющей вихревых токов для меди приведены на рис. 1, из которого следует, что они линейно зависят от площади образца до значений $S = 100 \text{ мм}^2$. Дальнейшее увеличение площади образца не влияет на зависимости в пределах погрешностей измерений; показания фазометра не изменяются.

Учет углового положения датчика относительно измеряемого образца. Для увеличения точности измерений структуру поверхностного слоя титана исследовали методом электронной микроскопии, а внутреннюю структуру образ-

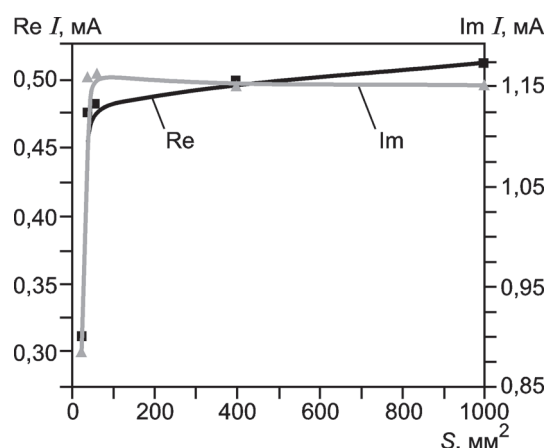


Рис. 1. Зависимости активной и реактивной составляющих вихревого тока от площади образца из меди на частоте 400 кГц

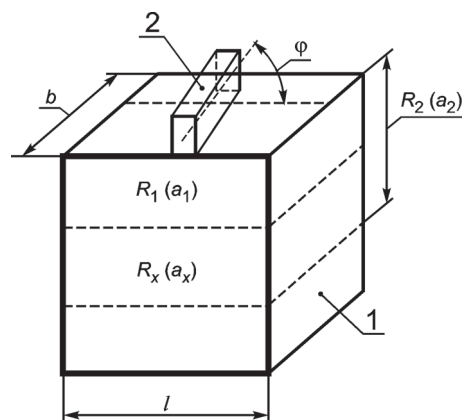


Рис. 2. Схема расположения датчика на поверхности металла: 1 — образец металла; 2 — вихретоковый датчик; l , b — геометрические размеры образца

ца — на дифрактометре. Исследования подтвердили, что в процессе насыщения водородом поверхность титанового образца становится неоднородной и внутренняя структура металла изменяется.

Кроме того, при насыщении титана водородом в течение 180 мин образуются гидриды титана TiH_2 , неравномерно распределяемые по поверхности и глубине образца [8]. Данные по измерению вихревых токов в образце с $C_{H_2} = 0,0312 \text{ масс. \%}$ в зависимости от углового положения φ вихретокового датчика (рис. 2) для различных частот приведены в табл. 1.

Таблица 1

Изменение силы вихревого тока, мА, разной частоты в зависимости от углового положения датчика относительно образца

Угол, φ , °	Частота, кГц			
	110	150	160	170
0	2,2	10,8	14,5	18,6
30	2,2	9,8	13,7	18,2
90	2,4	10,0	13,9	17,8
120	2,4	10,6	14,4	18,4
150	2,0	10,0	14,0	17,6
180	2,2	10,8	14,6	18,6



Рис. 3. Схема стандартного образца для послойного определения концентрации водорода в титане; цифрами указана концентрация водорода в масс. % в каждом слое (высота ступени 0,2 мм)

Из анализа предварительных исследований следует, что при определении C_{H_2} для увеличения точности и чувствительности кроме прямых измерений вихревых токов целесообразно иметь стандартный образец (СО) титана, насыщенного водородом.

Изготовление СО для послойного измерения концентрации водорода в металле. В образце из насыщенного водородом титана делали вырезы на разной глубине; чем тоньше снимаемый слой, тем точнее образец. В вырезанных кусках металла тщательно измеряли C_{H_2} с помощью анализатора. В каждую ступень последовательно помещали вихретоковый датчик и измеряли вихревой ток и сопротивление слоя R . На рис. 3 цифрами обозначена C_{H_2} в каждом слое СО.

Методика измерений послойной концентрации водорода в металле. Для определения C_{H_2} необходимо выбрать два слоя металла толщиной a_1 , a_2 и определить разность $a_1 - a_2$ (см. рис. 2). По сигналам вихретокового датчика в зависимости от углового положения нужно вычислить сопротивления R_1 , R_2 слоев a_1 , a_2 и определить максимальные. В соответствии с теорией вихревой ток проникает в слой металла толщиной

$$a = Rb/\pi f \mu_0 I, \quad (1)$$

где R — сопротивление слоя; f — частота вихревого тока; μ — магнитная проницаемость металла; μ_0 — магнитная постоянная; b , I — размеры образца.

Сопротивление R и электрическая проводимость σ связаны формулой

$$R = l/\sigma ab. \quad (2)$$

Согласно рис. 3 проводимость σ_x слоя толщиной $a_2 - a_1$ выражается как

$$\sigma_x = l(R_1 - R_2)/(a_x R_2 R_1). \quad (3)$$

Размер l должен соответствовать значениям вихревого тока в зависимости от S (см. рис. 1). Для этого из точки на графике, соответствующей максимальному значению вихревого тока, опускают перпендикуляр на ось абсцисс. Полученное значение площади необходимо разделить на ширину образца b . Найденное значение равно l (см. (3)). Разность $a_2 - a_1 = a_x$ соответствует толщине и координате слоя, в котором искомую C_{H_2} определяют по эталонной зависимости σ_x (C_{H_2}). Таким образом, для определения C_{H_2} на заданной глубине образца, например, для слоев a_1 , a_2 , по (1) рассчитывают частоты f_1 , f_2 , на которых измеряют сопротивления R_1 , R_2 зависимости от углового расположения датчика. Затем выбирают максимальное из них и по (2) находят σ_x . Далее по эталонной зависимости для значения σ_x опреде-

ляют C_{H_2} в слое титана. В табл. 2 приведены значения C_{H_2} в титане на различной глубине образца. Полученные данные свидетельствуют о близости результатов, найденных предложенным способом и при использовании прибора LECO при плавлении образцов.

Таблица 2

Сравнение результатов измерений C_{H_2} , масс. %, в образце титана

Глубина, мм	Способ измерения	
	вихретоковый	плавление
1,00	0,0110±0,0003	0,0108±0,0002
1,20	0,0083±0,0002	0,0082±0,0002
1,35	0,0062±0,003	0,0064±0,0002
1,55	0,0040±0,004	0,0038±0,0002

Выводы. Разработан стандартный образец (СО), и предложена методика измерений концентрации водорода вихретоковым способом. Точность измерений предложенным способом соответствует полученной по методу плавления образцов.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования РФ в рамках реализации проектной части государственного задания в сфере научной деятельности (проект № 1524, тема № 0.1325.2014).

Литература

1. Чернов И. П., Лидер А. М., Черданцев Ю. П. Дефекты в титане инициированные водородом // Физическая мезомеханика. 2000. Т. 3. № 6. С. 97—100.
2. Калинин Н. П., Остапенко В. Д. Контроль газонасыщенных слоев титановых сплавов вихревыми токами повышенной частоты // Дефектоскопия. 1983. № 5. С. 15—21.
3. Ларионов В. В. и др. Особенности электромагнитных методов контроля послойного водорода C_{H_2} в конструкционных материалах // Прикладная физика. 2012. № 5. С. 20—24.
4. Сандовский В. А. Измерения толщины и удельной электрической проводимости немагнитных пластин вихретоковым методом // Измерительная техника. 2012. № 10. С. 55—60; Sandoval V. A. Measurements of the thickness and electrical conductivity of nonmagnetic plates by an eddy-current method // Measurement Techniques. 2013. V. 55. N. 10. P. 1201—1208.
5. Liu Z. e. a. Investigations on classifying pulsed eddy current signals with a neural network // Non-Destruct. Test. and Cond. Monit. 2003. V. 45. N. 9. P. 608—614.
6. Ламмеранер И., Штафль М. Вихревые токи / Пер. с чешского. М.-Л.: Энергия, 1967.
7. Mizuno K. e. a. Visualization of hydrides in titanium by means of diffraction-enhanced X-ray imaging // J. Alloys and Compounds. 2005. V. 402. N. 1—2. P. 109—114.
8. Тимченко Н. А. и др. Кинетика гидрогенных фаз в палладии и титане // Вестник науки Сибири. 2011. № 1 (1). С. 77—82.
9. Тюрин Ю. И., Никитенков Н. Н., Ларионов В. В. Радиационно-ускоренная диффузия и выход водорода из металлов под действием ионизирующего излучения // ЖФХ. 2011. Т. 85. № 6. С. 1148—1154.

Дата принятия 30.12.2013 г.