

DOI: 10.15593/2224-9877/2016.4.10

УДК 620.111.3

А.И. Кустов¹, И.А. Мигель²

¹ Воронежский государственный педагогический университет,
Воронеж, Россия

² Военный учебно-научный центр ВВС Военно-воздушной академии
им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, Воронеж, Россия

АНАЛИЗ ТРАНСФОРМАЦИИ СТРУКТУРЫ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ СТАЛЕЙ И ИХ ВЛИЯНИЯ НА ПРОЦЕСС УПРОЧНЕНИЯ АМД-МЕТОДАМИ

Стали широко распространены в военных, промышленных, научных приложениях. Одной из основных проблем является проблема расчета контроля структуры и свойств сталей, особенно их приповерхностных слоев. Ее решение связано с оперативным контролем структуры и прочностных характеристик. В связи с этим объект исследования настоящей работы – стали различных марок, структура и свойства их приповерхностных слоев. Цель исследования – изучение влияния параметров внешних воздействий на прочностные характеристики приповерхностных слоев сталей, подвергнутых процессам цементации и азотирования.

Для достижения поставленной цели предложено использовать инновационные средства контроля структуры и свойств материалов – АМД-методы. Главным методом является метод $V(Z)$ -кривых, основанный на получении характерных интерференционных зависимостей выходного сигнала V от расстояния Z линза – объект в акустических волнах. Измерение параметров $V(Z)$ -кривых позволяет рассчитывать значения скоростей поверхностных акустических волн v_R и оценивать уровень их затухания в образцах по относительному изменению высоты ($\Delta V/V$ %) главного максимума $V(Z)$ -кривых. Здесь V – уровень выходного сигнала акустической линзы до воздействия на материал, ΔV – изменение уровня выходного сигнала в области измерений. Эти характеристики обеспечивают расчет прочностных параметров и параметров пластичности материалов.

Применение предложенных методик позволило получить серии $V(Z)$ -кривых для ряда сталей, рассчитать для конкретных марок значения скорости поверхностных акустических волн v_R и уровни их затухания в образцах ($\Delta V/V$ %). Также были определены глубины диффузионных слоев в сталях при цементации и азотировании, проведены оценки значений коэффициентов диффузии для исследуемых материалов. С помощью АМД-методов рассчитаны упругие модули материалов и скорости ПАВ в них, сравнение их с табличными значениями показало высокую степень совпадения.

Ключевые слова: акустическая микроскопия, структура сталей, азотирование и цементация, скорость акустических волн, диффузионные процессы, глубина проникновения, затухание акустических волн, прочностные характеристики.

A.I. Kustov¹, I.A. Miguel²

¹ Voronezh State Pedagogical University, Voronezh, Russian Federation

² Military Educational Scientific Center of Air Force of Military Academy
Named after professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin,
Voronezh, Russian Federation

ANALYSIS OF TRANSFORMATION OF SUBSURFACE LAYERS STRUCTURE OF STEELS AND THEIR INFLUENCES ON PROCESS OF HARDENING WITH AMD-METHODS

Steel have a wide circulation in military, industrial, scientific applications. One of important problems is the problem of calculation of control of structure and properties steels, especially their near-surface layers. Her decision is connected with an operating control of structure and strength characteristics. Therefore, in the real work, object of researches – steel of various brands, structure and properties of their near-surface layers. The purpose of researches – influence of parameters of external impacts on strength characteristics of near-surface layers steels, to the subjected processes of cementation and nitriding.

For achievement of a goal it is offered to use innovative control devices of structure and properties of materials – AMD-methods. The main method is the method $V(Z)$ -curves, based on obtaining characteristic interferential dependences of an output signal of V from distance Z lens object in acoustic waves. Measurement of parameters $V(Z)$ -curves allows to count values of speeds of surface acoustic waves (v_R) and to estimate the level of their attenuation in samples ($\Delta V/V\%$). These characteristics provide calculation of strength parameters and parameters of plasticity of materials.

Application of the offered techniques has allowed to receive series $V(Z)$ -curves for a row staly, to calculate for concrete brands of value of speeds of superficial acoustic waves (v_R) and levels of their attenuation in samples ($\Delta V/V\%$). Depths of diffusive layers in the steels at cementation and nitriding have been determined. Estimates of values of coefficients of diffusion for the studied materials are carried out. By means of AMD-methods elastic modules of materials and speed surfactant in them which comparison with tabular values has shown high extent of coincidence are calculated.

Keywords: acoustic microscopy, structure steels, nitriding and carburizing, speed of acoustic waves, diffusion process, depth of penetration, damped of acoustic waves, strength characteristics.

Введение

Воздействие на материал в процессе эксплуатации настолько многофакторно, что определяющие его состояние параметры, такие, например, как σ_B , σ_T и др., не характеризуют прочность материала в достаточной степени. Его прочность функционально ограничена, если он не обладает некоторой минимальной, в пределах нескольких процентов, пластичностью ($\delta\%$, $\psi\%$), т.е. *пластичность* для металлов и сплавов является весьма важной характеристикой при оценке их прочности. Обычно в значительном числе случаев *прочность* материала оценивают по значению либо предела прочности, либо предела текучести. Однако для получения более объективной информации о ма-

териале необходимо оценивать совместно и прочностные, и пластические характеристики. Пластичность связана с действием микроскопических механизмов пластической деформации, роль которых определяется внешними условиями: температурой, механической нагрузкой, скоростью деформирования и пр. Основные виды пластичности – самодиффузионная, краудионная, дислокационная. Развитие междислокационного взаимодействия характеризуется диаграммой « $\sigma - \epsilon$ », т.е. зависимостью степени деформации ϵ образца от величины приложенного к нему напряжения σ . Она состоит из трех характерных участков, обусловленных стадиями эволюции дислокационной структуры (легкого скольжения, компактных скоплений, разупрочнения). На последней происходит падение дислокационной плотности, что ведет к зарождению нарушений сплошности – *микротрещин*. В поликристаллах действие рассмотренных механизмов пластической деформации внутри зерен осложнено взаимодействием между зернами. Здесь деформация является суммарным результатом деформации в различно ориентированных относительно нагрузок зернах. В этом случае деформация не имеет четко выраженного стадийного характера, как для монокристаллов. При этом высокая пластичность может достигаться в том случае, если в ходе деформирования успевает произойти рекристаллизация, т.е. поглощение наиболее непластичных, несовершенных зерен.

Методика эксперимента

Влияние на прочность и пластичность материалов, прежде всего сталей, рассматривалось на примере процессов *цементации* и *азотирования*. Их параметры оценивались с помощью измерений акустических характеристик материалов (скоростей акустических волн v_R , уровня затухания $\Delta V/V\%$, упругих модулей и др.) с использованием АМД-методов [1–4].

Для практических расчетов влияния процесса диффузии на структуру материалов рассчитывали значения параметров, входящих в уравнения, описывающие отдельные стадии химико-термической обработки. Известно, что основной параметр кинетики диффузионного насыщения – это коэффициент диффузии. Обычно он определяется по экспериментальному распределению концентрации диффундирующего элемента по толщине слоя $c(x, \tau)$ либо находится путем анализа количества диффундирующего в образцы вещества в зависимости от вре-

мени. Коэффициент диффузии определяют при стационарных условиях химико-термической обработки исходя из толщины диффузионного слоя. Если считать, что толщине диффузионного слоя соответствует конкретное значение концентрации диффундирующего элемента c_T , то

$$c_T(x, \tau) / c_{\text{нов}} = 1 - \operatorname{erf} \left(x_\tau / \left(2 \cdot \sqrt{D \cdot \tau} \right) \right) = \text{const.} \quad (1)$$

Поскольку выражение под знаком функции erf является постоянной, значит,

$$x_\tau^2 = Dk\tau \quad \text{и} \quad D = x_\tau^2 / k \cdot \tau. \quad (2)$$

Последнее выражение позволило оценить D по экспериментальным измерениям толщины слоя. Глубиной слоя диффузии считали расстояние h_0 , определяемое в зависимости от выбранных критериев в 0,5 или 0,8 ($h_{0,8}$) значений v_R в материале без диффузии. Для твердотельного материала с помощью акустических волн получали характерные $V(Z)$ -кривые [5, 6], которые в нашем случае различались как по высоте главного максимума (так как свойства приповерхностных слоев материала после диффузии существенно отличаются по уровню затухания акустических волн от первоначального состояния образцов), так и по виду участка осцилляций, для которого расстояние между пиками ΔZ_N связано с величиной скорости поверхностных акустических волн (ПАВ) [6, 7].

Оценки толщины диффузионных слоев были проведены с использованием выражений для коэффициента диффузии $D(T) = D_0 \cdot \exp(-Q/RT)$ и толщины слоя воздействия $x_1 = 2 \cdot \sqrt{D \cdot t}$. Для диффузии углерода (C) в γ -Fe $D_0 = 2 \cdot 10^{-2}$ см²/с и $Q = 32\,200$ кал/г-атом, а для азота (N) в γ -Fe $D_0 = 3,3 \cdot 10^{-4}$ см²/с и $Q = 34\,600$ кал/г-атом. Тогда, в соответствии с работами [8, 9],

$$x_1 = 2 \cdot \sqrt{D_1 \cdot t} = 2 \cdot \sqrt{3,6 \cdot 10^{-8} \cdot 3600 \cdot 6} = 560 \text{ мкм}, \quad (3)$$

$$x_2 = 2 \cdot \sqrt{D_2 \cdot t} = 2 \cdot \sqrt{2,22 \cdot 10^{-10} \cdot 3600 \cdot 10} = 56,5 \text{ мкм}, \quad (4)$$

т.е. при времени процесса диффузии 6 и 10 ч слои с измененными свойствами в железе составляют от нескольких десятков до нескольких сотен микрометров.

В качестве параметров диффузионного процесса нами были выбраны значения скорости ПАВ v_R , уровень затухания этих волн ($\Delta V/V\%$) [10–12]. По их значениям получали зависимости толщины слоя с измененными свойствами от концентрации вещества – диффузанта, от температуры и времени проведения процесса. Толщина диффузионного слоя оценивалась по параметру $\Delta V/V\%$.

Результаты экспериментов

Используя полученные зависимости $\Delta V/V\%$ и v_R определяли глубину слоя диффузии (рис. 1).

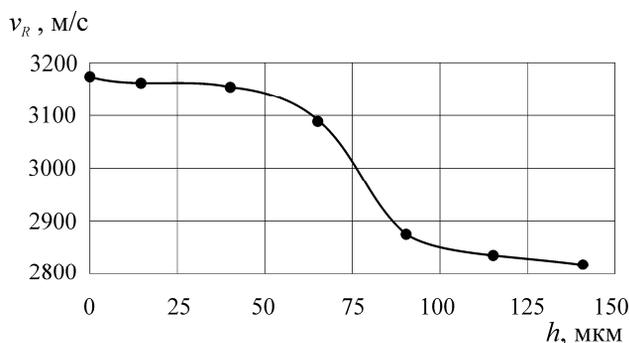


Рис. 1. Изменение значений скорости ПАВ в одном из образцов стали (40ХН) в зависимости от глубины зондирования (корреляция v_R с глубиной слоя диффузии h , мкм)

При температуре цементации диффузионный слой состоит только из аустенита, а после медленного охлаждения из продуктов его распада – феррита и цементита. Эффективная толщина цементованного слоя обычно задается значением контрольного параметра твердости (например, HRC 60) и варьируется от долей до нескольких миллиметров. Цементация проводилась при 940 °С в течение 2,5 ч (слой до 0,8 мм). Процесс неоднозначный и требующий дальнейших исследований (так как возникает ряд различных фаз в приповерхностной зоне), однако чувствительность АМД-методов к изменениям свойств слоев очевидна. В завершение процесса осуществляется отпуск при $T \sim 165$ –175 °С. На рис. 2–4 представлены результаты экспериментов, которые показывают отличие формы $V(Z)$ -кривой в стали, что позволяет рассчитывать глубину измененного слоя по значениям v_R (см. рис. 3).

Рис. 4 демонстрирует, как изменяется значение скорости ПАВ в образцах, для которых различно время проведения процесса (цементации). Изменение времени проводимого процесса приводило к изменению структуры приповерхностных слоев и, как следствие, к изменению их акустических характеристик.

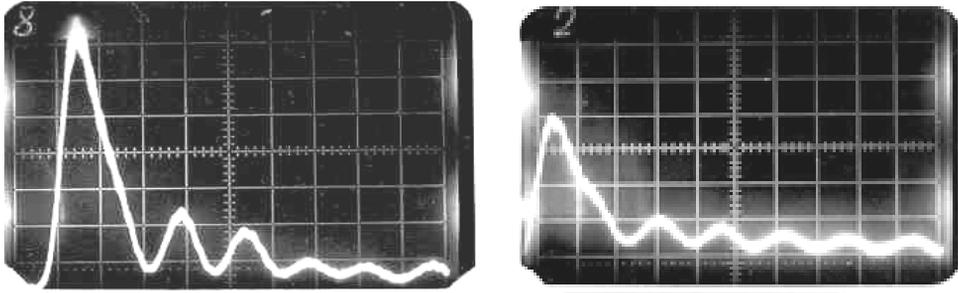


Рис. 2. Трансформация $V(Z)$ -кривой в стали 30ХГСМЛ ($v_R = 3,18 \cdot 10^3$ м/с, $\Delta Z_N = 14,68$ мкм, $(\Delta V/V\%)_{\max} = 37$ %, масштаб по вертикали – 1 деление = 0,25 В, по горизонтали – 1 деление = 12,2 мкм) после цементации (940 °С, 2 ч)

Аналогичные результаты получены и при измерениях с помощью АМД-методов характеристик материалов, прошедших процесс азотирования. Азотирование проводят в атмосфере аммиака, что приводит к насыщению поверхности азотом и к повышению ее твердости (сохраняемой до ~680 °С, т.е. на ~300–330 °С выше, чем для цементованных материалов) (рис. 5 и 6). По порядку величины полученные значения x_i продемонстрировали хорошее совпадение с расчетными (составили ~100 мкм).

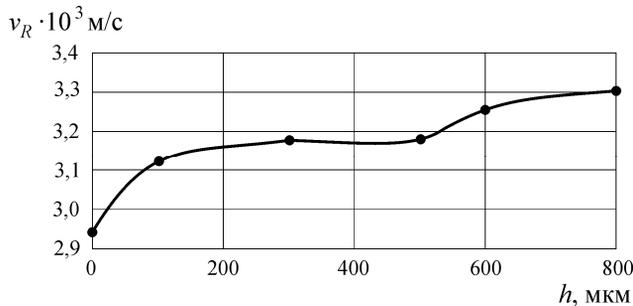


Рис. 3. Зависимость v_R от h при цементации стали (на примере 18ХГТ)

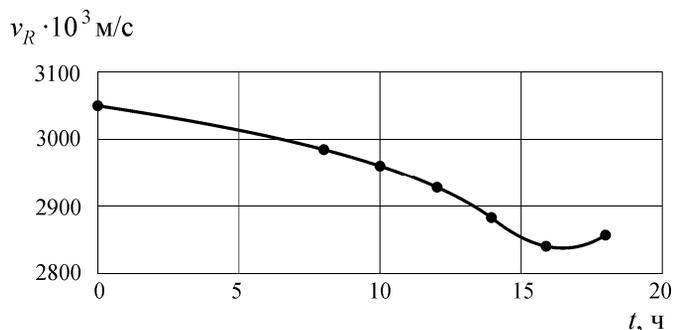


Рис. 4. Изменение скорости ПАВ в стали 30ХГТ в зависимости от времени цементации (при контроле с поверхности за 16–17 ч скорость v_R снижается на 7 % – с 3050 до 2840 м/с)

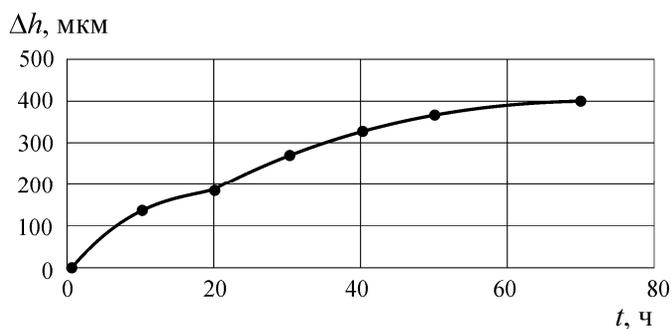


Рис. 5. Зависимость толщины слоя с измененными свойствами, полученной по изменению скорости ПАВ в стали (40ХНМА), от времени азотирования (T процесса 500 °С; оптимальное время 60 ч)

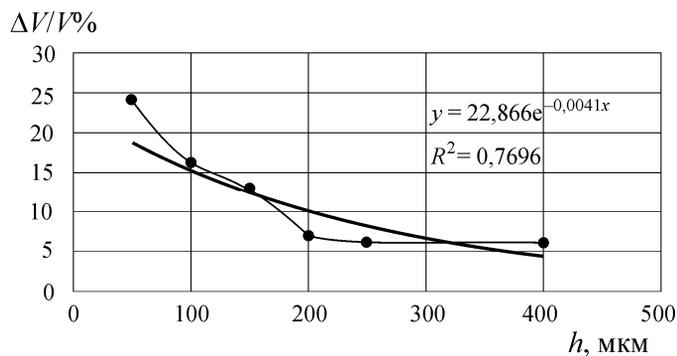


Рис. 6. Зависимость уровня поглощения АВ в приповерхностных слоях стали (38ХМЮА) от глубины слоя азотирования (T процесса 560 °С). С глубины ~250 мкм сталь не подвергнута азотированию

Пример изучения модельного *диффузионного процесса* АД-методами представлен на рис. 7. В ходе эксперимента определялась толщина пленки SiO_2 , получаемая при окислении кремния в атмосфере водяных паров. По изменению значений скорости ПАВ (и соответствующей дисперсионной зависимости) рассчитывали толщину слоя h (мкм), которая, как следует из графика, варьировалась от 2 до 9 мкм.

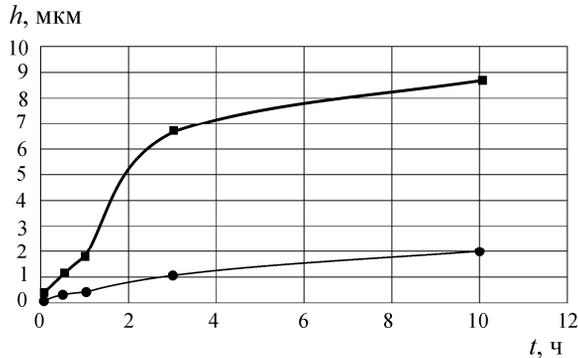


Рис. 7. Зависимость толщины слоя диффузии SiO_2 (на кремнии) при окислении в H_2O при T отжига 1200 (верхняя) и 1000°C (нижняя кривая)

Таким образом, торировочные кривые позволяют определять время диффузии для получения слоя оксидной пленки заданной толщины.

На рис. 5 приведены результаты измерений толщины слоя с измененными свойствами, полученного в процессе азотирования стали (при 500°C) в зависимости от времени процесса (до 72 ч). Сама же глубина азотирования рассчитана по аналогии с приведенной на рис. 6 зависимостью и составила ~ 400 мкм. Для процесса цементации были получены сходные зависимости.

При наличии метода $V(Z)$ -кривых определить значения σ_{02} можно с использованием значений упругих модулей, которые рассчитываются на основе представлений, изложенных в работе [13]:

$$E = v_R^2 \cdot \frac{2\rho \cdot (1 + \gamma)^3}{(0,87 + 1,12\gamma)^2}, \quad (5)$$

$$G = v_R^2 \cdot \rho \cdot \left(\frac{1 + \gamma}{0,87 + 1,12\gamma} \right)^2, \quad (6)$$

где v_R – скорость ПАВ в образце; ρ – плотность материала образца; γ – коэффициент Пуассона. Оценка значений предела прочности проводилась в соответствии с известным выражением $\sigma_{0,2} \cong \frac{G}{10^2 \cdot n \cdot \pi}$. Полученные этим методом значения $\sigma_{0,2}$ совпали в пределах погрешности 5 % с рассчитанными по размеру зерна. Результаты расчета упругих модулей и скорости ПАВ в ряде материалов приведены в таблице.

Физические характеристики металлов, рассчитанные с помощью АД-методов

Металл	$E \cdot 10^{-5}$, МПа	$G \cdot 10^{-5}$, МПа	$v_R \cdot 10^3$, м/с	γ
Железо	2,17	0,83	3,15	0,28
Цинк	1,30	0,72	2,31	0,33
Медь	1,25	0,44	2,22	0,37
Титан	1,08	0,43	3,02	0,31
Серебро	0,83	0,28	1,6	0,36
Золото	0,83	0,29	1,1	0,41
Алюминий	0,72	0,26	3,03	0,31

Представленные в таблице результаты проведенных АД-измерений параметров ряда материалов в конденсированном состоянии подтверждают достоверность и объективность экспериментов, так как в пределах погрешностей совпадают с данными, полученными рядом независимых авторов [14–16]. В связи с этим можно считать доказанным, что предложенные АД-методы обеспечивают надежное и точное измерение характеристик кристаллических и спеченных материалов, в том числе и подвергнутых диффузионной обработке.

Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Разработанные на основе АД-методов способы базируются на использовании акустических изображений структур объектов,

а также на количественных расчетах характеристик материалов по значениям v_R и $\Delta V/V\%$, определяемых из характерных интерференционных зависимостей – $V(Z)$ -кривых.

2. Продемонстрирована перспективность применения АМД-методов оценки свойств различных твердотельных материалов, для обнаружения и характеристики областей материала с измененными физическими параметрами.

3. Показано, что использование метода $V(Z)$ -кривых при исследовании физических свойств модельных материалов и сталей обеспечивает оптимизацию режимов обработки материалов, позволяет находить экстремальные параметры термических и диффузионных процессов.

Список литературы

1. Мигель И.А., Кустов А.И. Исследование структурных параметров металлических материалов и их влияние на физико-механические свойства методами акустической микроскопии // *Металлофизика и новейшие технологии: междунар. науч.-техн. журнал.* – Киев, 2009. – Т. 31, № 3. – С. 381–388.

2. Kustov A.I., Migel I.A. Investigation of physicomachanical characteristics of glasses by acoustic waves // *Glass Physics and Chemistry.* – 1996. – Vol. 22, № 3. – P. 245–247.

3. Кустов А.И. Дефектоскопия стеклянных материалов и методы акустической микроскопии // *Физика и химия стекла.* – 1998. – Т. 24, № 6. – С. 817–824.

4. Мигель И.А., Кустов А.И. Разработка акустомикроскопических методов оценки влияния внешних воздействий на состояние поверхности материалов и их физические свойства // *Вестник Тамбов. ун-та. Естественные и технические науки.* – Тамбов, 2010. – Т. 15, вып. 3, ч. I. – С. 1062–1063.

5. Weglein R.D., Wilson R.F. Acoustic microscopy of material and surface layers // *J. Appl. Phys.* – 1984. – Vol. 55, № 9. – P. 3261–3275.

6. Parmon W., Bertoni H.L. Ray interpretation of the material signatures in the acoustic microscope // *Electron. Lett.* – 1979. – Vol. 15, № 21. – P. 684–686.

7. Atalar A. A physical model for acoustic signatures // *J. Appl. Phys.* – 1979. – Vol. 50, № 12. – P. 8237–8239.

8. Adda Y., Philibert J. La diffusion dans les solides. – Paris: Press Universitaires de France, 1966. – Vol. 2. – P. 87–95.

9. Справочник химика. – М.: Химия, 1965. – Т. 3. – 896 с.

10. Кустов А.И., Мигель И.А. Оценка уровня свойств межзеренных границ и изучение структуры поверхностей раздела в металлических материалах методами акустомикроскопической дефектоскопии // Материаловедение. – 2010. – № 2(155). – С. 9–14.

11. Acoustic microscopy of solid materials / J.M.R. Weaver, C. Plett, M.G. Somekh, G.A.D. Briggs // Metallography. – 1985. – Vol. 17. – P. 3–34.

12. Кустов А.И., Мигель И.А. Определение параметров упрочнения или восстановления свойств поверхности материалов с помощью инновационных методов физического эксперимента – АД-методов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2014. – Т. 11, № 4/2. – С. 592–598.

13. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. – М., 1957. – 372 с.

14. Microwave acoustics handbook / ed. E.D. Slobodnik. – New York: Conway: Office of aerospace Research United State Air Force, 1970. – Vol. 1. – 228 p.

15. Шутилов В.А. Основы физики ультразвука. – Л.: Изд-во Ленинград. ун-та, 1980. – 280 с.

16. Морозов А.И., Проклов В.В., Станковский Б.А. Пьезоэлектрические преобразователи для радиоэлектронных устройств. – М.: Радио и связь, 1981. – 197 с.

References

1. Migel' I.A., Kustov A.I. Issledovanie strukturnykh parametrov metallicheskih materialov i ikh vliianie na fiziko-mekhanicheskie svoistva metodami akusticheskoi mikroskopii [Research of structural parameters of metal materials and their influence on physicommechanical properties by methods of acoustic microscopy]. *Metallofizika i noveishie tekhnologii: mezhduнародnyi nauchno-tekhnicheskii zhurnal*. Kiev, 2009, vol. 31, no. 3, pp. 381-388.

2. Kustov A.I., Migel I.A. Investigation of rhyssicommechanical characteristics of glasses by acoustic waves. *Glass Physics and Chemistry*, 1996, vol. 22, no. 3, pp. 245-247.

3. Kustov A.I. Defektoskopiia stekliannykh materialov i metody akusticheskoi mikroskopii [Defectoscopy of glass materials and methods of acoustic microscopy]. *Fizika i khimiia stekla*, 1998, vol. 24, no. 6, pp. 817-824.

4. Migel' I.A., Kustov A.I. Razrabotka akustomikroskopicheskikh metodov otsenki vliianiia vneshnikh vozddeistvii na sostoianie poverkhnosti materialov i ikh fizicheskie svoistva [Development akustomikroskopicheskikh of methods of assessment of influence of external impacts on a condition of a surface of materials and their physical properties]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2010, vol. 15, iss. 3, part I, pp. 1062-1063.

5. Weglein R.D., Wilson R.F. Acoustic microscopy of material and surface layers. *Journal Appl. Phys.*, 1984, vol. 55, no. 9, pp. 3261-3275.

6. Parmon W., Bertoni H.L. Ray interpretation of the material signatures in the acoustic microscope. *Electron. Lett.*, 1979, vol. 15, no. 21, pp. 684-686.

7. Atalar A. A physical model for acoustic signatures. *Journal Appl. Phys.*, 1979, vol. 50, no. 12, pp. 8237-8239.

8. Adda Y., Philibert J. La diffusion dans les solides. Paris: Press Universitaires de France, 1966. Vol. 2, pp. 87-95.

9. Spravochnik khimika [Reference book of the chemist]. Moscow: Khimiia, 1965. Vol. 3. 896 p.

10. Kustov A.I., Migel' I.A. Otsenka urovnia svoistv mezhzerennykh granits i izuchenie struktury poverkhnostei razdela v metallicheskiykh materialakh metodami akustomikroskopicheskoi defektoskopii [Assessment of level of properties the mezhzerennykh of borders and studying of structure of interfaces in metal materials by methods of akustomikroskopicheskoy defektoskopi]. *Materialovedenie*, 2010, no. 2(155), pp. 9-14.

11. Weaver J.M.R., Ilett C., Somekh M.G., Briggs G.A.D. Acoustic microscopy of solid materials. *Metallography*, 1985, vol. 17, pp. 3-34.

12. Kustov A.I., Migel' I.A. Opredelenie parametrov uprochneniia ili vosstanovleniia svoistv poverkhnosti materialov s pomoshch'iu innovatsionnykh metodov fizicheskogo eksperimenta – AMD-metodov [Determination of parameters of hardening or recovery of properties of a surface of materials by means of innovative methods of a physical experiment – AMD-methods]. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniia*, 2014, vol. 11, no. 4/2, pp. 592-598.

13. Brekhovskikh L.M. Volny v sloistykh sredakh [Waves in layered environments]. Moscow, 1957. 372 p.

14. Microwave acoustics handbook. Ed. by E.D. Slobodnik. New York: Conway, Office of aerospace Research United State Air Force, 1970. Vol. 1. 228 p.

15. Shutilov V.A. Osnovy fiziki ul'trazvuka [Fundamentals of physics of ultrasound]. Leningradskii universitet, 1980. 280 p.

16. Morozov A.I., Proklov V.V., Stankovskii B.A. P'ezoelektricheskie preobrazovateli dlia radioelektronnykh ustroistv [Piezoelectric converters for radio-electronic devices]. Moscow: Radio i sviaz', 1981. 197 p.

Получено 10.07.2016

Об авторах

Кустов Александр Игоревич (Воронеж, Россия) – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологических и естественно-научных дисциплин Воронежского государственного педагогического университета; e-mail: akvor@yandex.ru.

Мигель Ирина Анатольевна (Воронеж, Россия) – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры физики и химии Военного учебно-научного центра ВВС Военно-воздушной академии им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина; e-mail: vuaik@mail.ru.

About the authors

Aleksandr I. Kustov (Voronezh, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Technology and Nature Disciplines, Voronezh State Pedagogical University; e-mail: akvor@yandex.ru.

Irina A. Miguel (Voronezh, Russian Federation) – Ph. D. in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of Physic and Chemistry, Military Educational Scientific Center of Air Force of Military Academy Named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin; e-mail: vuaik@mail.ru.