

АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ АМД-МЕТОДОВ

¹Кустов А.И., Мигель И.А

¹Воронежский государственный педагогический университет, г. Воронеж, Россия
ВУНЦ ВВС ВВА им. профессора Н.Е.Жуковского и Ю.А. Гагарина,
г. Воронеж, Россия, E-mail: akvor@yandex.ru

Кристаллы – твердотельные материалы с совершенной структурой. Благодаря данному факту они обладают целым рядом достоинств, связанных, прежде всего, с низким уровнем дефектов и с высокой анизотропией свойств. Изучение свойств кристаллов – самостоятельная область исследований, для развития которой необходимо постоянное совершенствование методов исследования структурного строения. На наш взгляд для анализа структуры и свойств кристаллических и композиционных материалов перспективны АМД-методы [1,2], построенные на применении акустических волн. Они позволяют получать серии структурных акустических изображений на различной глубине от поверхности, оценивать по ним степень однородности и изотропности материалов. Акустическое изображение одного из типов стали демонстрируется на рисунке 1. Оно позволяет рассчитать по размеру зерна значение условного предела текучести [3,4]. На рисунке 2 представлено акустическое изображение ЦТС-керамики, по которому надежно рассчитывается величина пористости и скорости ПАВв зависимости от температур отжига материалов (рис.3 и 4).

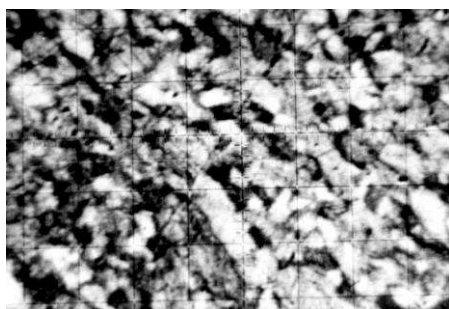


Рисунок 1 – Акустическое изображение структуры стали, позволяющее рассчитать прочностные свойства стали по размеру зерна (масштаб: 20 мкм/дел., Z = - 17 мкм)



Рисунок 2 – Акустическое изображение строения пьезокерамики ЦТС-19 на глубине ~32 мкм (частота 404 МГц, размер по горизонтали 250 мкм)

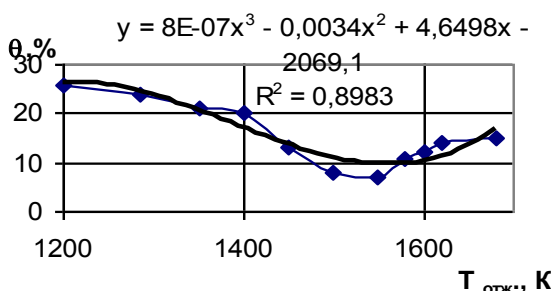


Рисунок 3 – Зависимость ν_R от $T_{отж}$ ЦТС-22

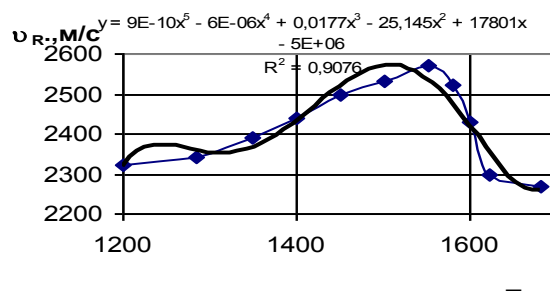


Рисунок 4 – Зависимость θ_p от $T_{отж}$ ЦТС-22

Используя метод V(Z)-кривых [4], по области периодических осцилляций определяли значение характерного расстояния ΔZ_N [5], а по нему рассчитывали величину скорости ν_R (1 и 2) поверхностных акустических волн (ПАВ). При этом точность измерений, достигающая для ряда материалов для используемого САМ десятков ангстрем, обеспечивается, прежде всего, при высокой однородности подложек. Оценка однородности обеспечивается акустической визуализацией области. Данная методика обеспечивает расчет глубины измененного слоя в стали (по изменению уровня затухания АВ) и оценку толщины покрытия из корунда на стеклянной подложке (рис.5 и 6).

$$\Delta Z_N = \frac{v_l}{2 \cdot f} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{v_l}{v_R} \right)^2} \right]^{-1} \quad (1)$$

$$v_R = v_l \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{v_l}{2 \cdot f \cdot \Delta Z_N} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

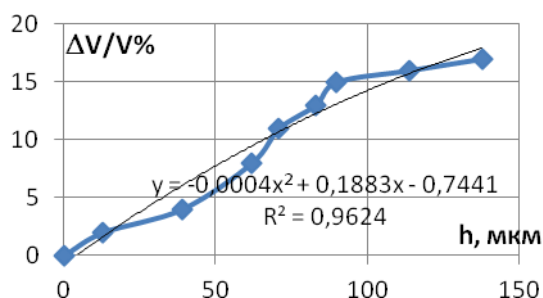


Рисунок 5 – Зависимость затухания АВ(ΔV/V%) в стали 15X2НМФА от глубины зондирования (h)

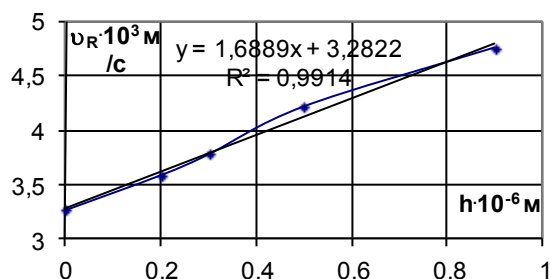


Рисунок 6 – Дисперсионная зависимость скорости ПАВ от толщины покрытия из корунда (Al₂O₃) на подложке из стекла.

Следующий этап был посвящен традиционным инструментальным экспериментам, позволяющим разрушающим методом находить предел пропорциональности ($\sigma_{пц}$), предел упругости (σ_y), условный предел текучести ($\sigma_{0,2}$), предел текучести (σ_T), предел прочности (σ_B). Эти расчеты производятся на базе полученной экспериментально кривой σ – ϵ , один из вариантов которой для ст.3 представлен на рисунке 7.

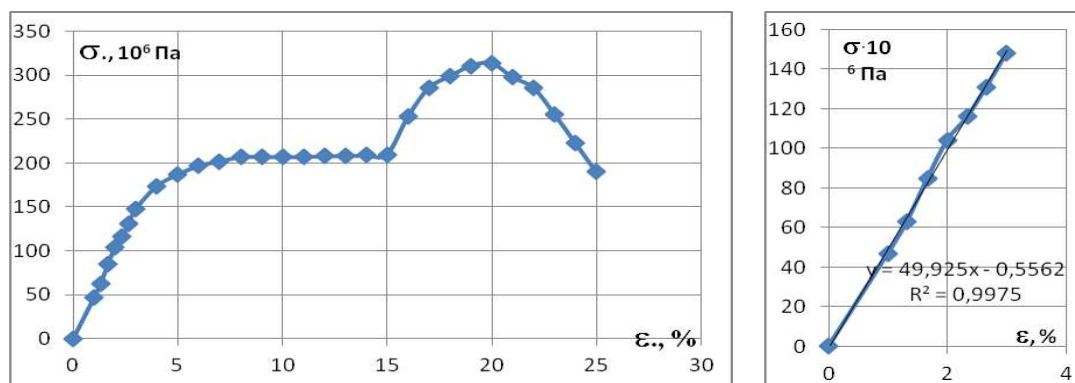


Рисунок 7 – Экспериментальная кривая, полученная с использованием разрывной машины (а-общая кривая, б-область чисто упругих деформаций)

Экспериментальные данные полученные для ст.3 с помощью разрывной машины после предварительной статистической обработки были использованы для построения с помощью MSExcel графической зависимости « σ – ϵ » (рис.7). Условно она была разделена на ряд областей (0 – 3%; 3 – 6%; 6 – 15%; 15 – 20 и 20 – 25%). Анализ процессов в каждой из областей средствами ИТ имело смысл проводить отдельно, рассчитывая присущие материалу параметры (упругие модули, E и G, значение предела пропорциональности, условного предела текучести; предела текучести; предела прочности; величины предельной деформации и проч.) (см. рис.7). Из рисунке 7б был определен угол наклона линейного участка кривой к оси деформаций. Он составил 66° , а тангенс его – 2,246. При этом, напряжению в 148 МПа ($\sigma_{пц}$) соответствует деформация в $(6,58 \cdot 10^{-2})\%$. Отношение этих величин, если выразить его в сотнях ГПа, будет численно равно тангенсу угла наклона прямой упругости к оси деформаций и модулю упругости (в Паскалях) 225 ГПа. Таким образом, на данном этапе были определены предел пропорциональности и модуль упругости материала. Из второй области кривой σ – ϵ для стали 3 было рассчитано значение $\sigma_{0,2}$, которое составило 177 МПа. При деформациях в 8 – 14% для данного сорта стали

наблюдалась площадка текучести ($\sigma_T = 207,5$ МПа). Следует отметить, что значения полученных характеристик подтверждают достоверность данных, получаемых с помощью предложенных методов расчета физико-механических параметров испытываемых материалов.

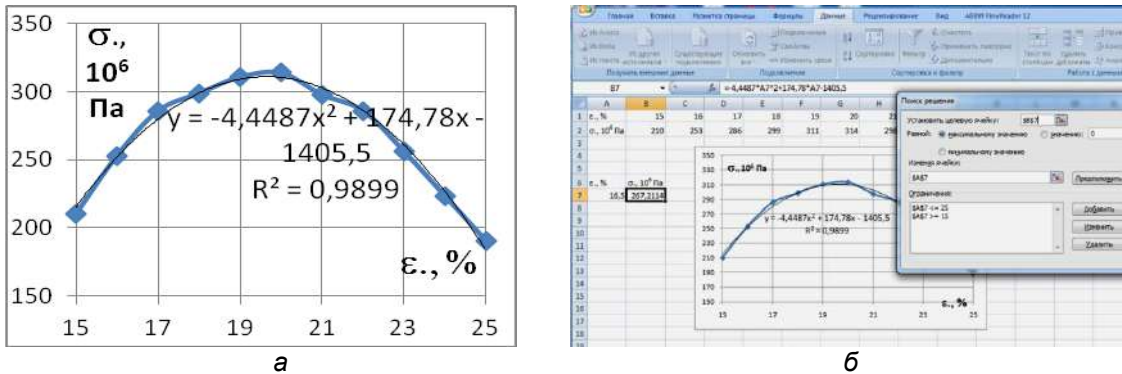


Рисунок 8 – Расчет предельных деформаций и предела прочности материала с помощью функции-оптимизатора (а – вид тренда для экспериментальной кривой; этап решения)

Для четвертой области кривой σ - ϵ (рис.8) рассчитывались значения предела прочности (σ_B) и соответствующая предельная деформация ϵ_B . Решение этой задачи осуществлялось на основе алгоритма оптимизации (с использованием функции «Поиск решения» приложения WindowsMSExcel). После введения соответствующих ограничений и счета получали оптимальные значения (рис.8б) искомых величин (оптимальные значения: $\epsilon, \% = 19,64394$, $\sigma_B = 311,184 \cdot 10^6$ Па), которые в пределах погрешности совпадают со стандартными значениями [6].

В качестве альтернативных физических методов определения искомых параметров материалов были выбраны современные инновационные неразрушающие АМД-методы, позволяющие рассчитать для металлических образцов значения упругих модулей E и G , величину размера зерна и условного предела текучести по скорости поверхностных акустических волн и из акустических изображений. При взаимном перемещении акустической линзы и поверхности объекта вдоль оси Z получали характерные для данного материала интерференционные $V(Z)$ -кривые (см. рис. 9а). Для конкретного вида стали $V(Z)$ -кривая представлена на рис.9б. Она позволила рассчитать характерное расстояние $\Delta Z_N = 15,04$ мкм. На основании выражений 1 и 2 были рассчитаны значения v_R по $V(Z)$ -кривой, которое используется для определения значений упругих модулей: $v_R = 1483 \cdot (1 - (1 - (1483/(2 \cdot 407 \cdot 10^6 \cdot 15,04 \cdot 10^{-6}))^2)^{-1/2}) = 3,107 \cdot 10^3$ м/с, где γ - коэффициент Пуассона исследуемого материала. В ходе инструментальных исследований были рассчитаны плотность стали ($\rho_{cm} = 7820$ кг/м³) и коэффициент Пуассона ($\gamma = 0,28$). При этом скорость акустических волн в иммерсионной жидкости при 20^oC $v_f = 1483$ м/с. $v_s \cdot \alpha' = v_R$,

где $\alpha' = \frac{0,87 + 1,12 \cdot \gamma}{1 + \gamma} = 0,925$; $v_s = v_R / \alpha' = 3,36 \cdot 10^3$ м/с.

$$E = v_R^2 \cdot \frac{2\rho \cdot (1 + \gamma)^3}{(0,87 + 1,12\gamma)^2}; \quad (3) \quad G = v_R^2 \cdot \rho \cdot \left(\frac{1 + \gamma}{0,87 + 1,12\gamma} \right)^2. \quad (4)$$

В соответствии с выражениями 3 и 4 рассчитывали значения упругих модулей ($E = 226 \cdot 10^9$ Па и $G = 88,3 \cdot 10^9$ Па), которые совпали в пределах погрешности со значениями, приводимыми в известных изданиях [6].

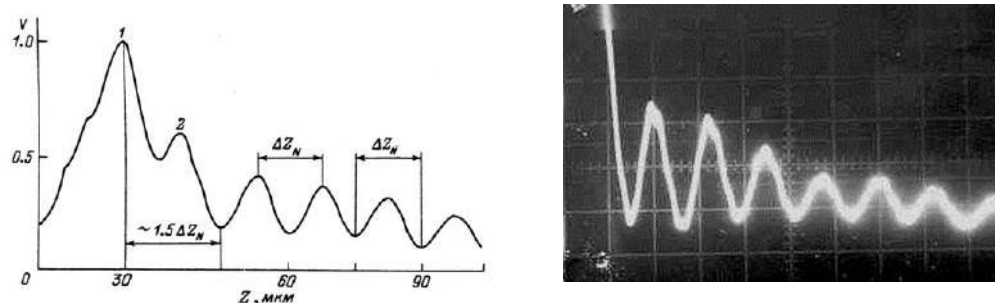


Рисунок 9 – а) Вид характерной $V(Z)$ -кривой для твердотельных материалов (V – выходной сигнал в относительных единицах; 1 и 2 – главный и побочный максимумы; Z – смещение поверхности образца к линзе); б) Пример $V(Z)$ – кривой для стали (H_2O , масштаб по горизонтали: 14 мкм/дел., по вертикали: 0,25 В/дел., $\Delta Z_N = 15,04$ мкм)

Следующий этап исследований был связан с изучением АМД-методами спекаемых диэлектриков, типа ЦТС-керамик. Его главной задачей было доказать, что акустомикроскопические методы исследований обеспечивают визуализацию и характеризацию как структуры самого материала, так и системы дефектов в нём. Наличие и характеристики системы пор влияют на два основных параметра $V(Z)$ -кривых – высоту главного максимума и расстояние ΔZ_N между осцилляциями, определяющее значение v_R . Таким образом, фиксируя v_R или $\Delta V/V\%$ можно различать материалы с различными системами дефектов [7,8]. Был проведен ряд экспериментов и с композиционными материалами (рис.10).

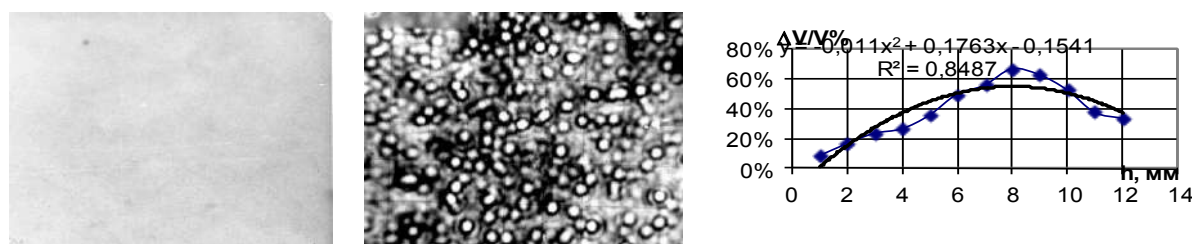


Рисунок 10 – Оптическое(а) и акустическое(б) изображения композита ИНСК-3 и ЦТС-19 (404 МГц, масштаб 100/150 мкм², $Z = -30$ мкм, а-слева, б-справа); в – зависимость уровня поглощения ПАВ $\Delta V/V\%$ для пьезокомпозита ИНСК-3 с ЦТС-19

Результаты исследования:

- представлен алгоритм определения физико-механических параметров образцов сталей с использованием инструментального эксперимента и обработки полученных результатов с помощью информационных технологий;
- сформирован метод определения параметров образцов стали с использованием методов акустомикроскопической дефектоскопии;
- разработанные методики обеспечивают получение таких параметров образцов как Δv_R , v_R , $\Delta V/V\%$, E ;
- АМД-методы обеспечивают надежное определение размера зерна d_3 ; для ряда сталей проведён расчёт этого параметра через v_R и из акустомикроскопических изображений.

Список литературы:

1. Weaver J.M.R., Ilett C., Somekh M.G., Briggs G.A.D. Acoustic microscopy of Solid Materials // Metallography . -1985 . -V.17 . -P. 3-34.
2. Мигель И.А., Кустов А.И. Изучение металлических слоев и полимерных композитов с помощью акустических волн // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. -2015. – Т.12, №2. –С. 241 -247.
3. Кустов А.И., Мигель И.А. Выработка критериев оценки деформации поверхности твердотельных материалов АМД-методами // Вестник Тамбовского университета. Сер. Естественные и технические науки. - Тамбов, 2013. – Т. 18.—

Вып.4.Часть 2. – 612 с. (с.1875-1877).

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

5. Кустов А.И. Мигель И.А. Изменение акустических характеристик материалов как явление, сопровождающее их пластичность и разрушение // Вестник Тамбовского университета. Сер. Ест. и техн. науки. – Тамбов, 2016. – Т.21. – Вып.3. – 1464 с. (с. 1097-1101).

6. Физические величины: справочник / А.П.Бабичев, Н.А. Бабушкина, и др.; п/р И.С.Григорьева и Е.З. Мейлихова. – М.; Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

7. Кустов А.И., Мигель И.А. Анализ трансформации структуры приповерхностных слоев сталей и их влияние на процесс упрочнения АМД-методами Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета., Машиностроение, Материаловедение., Т.18., №4, 2016.,205 с (с. 134-146).

8. Кустов А.И., Мигель И.А. Анализ поведения дефектных структур, возникающих в твердотельных материалах, АМД-методами Фундаментальные проблемы современного материаловедения., Т.13., №4., 2016., с. 490 - 496.