

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТРАНСФОРМАЦИИ ДЕФЕКТНЫХ СТРУКТУР И ДЕФОРМАЦИИ МАТЕРИАЛОВ В КОНДЕНСИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

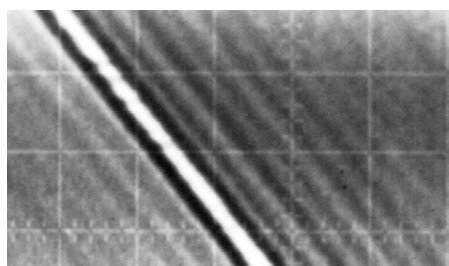
Зеленев В.М., Кустов А.И., Мигель И.А.<sup>1</sup>

Воронежский государственный педагогический университет, Россия

<sup>1</sup>ВУНЦ ВВС ВВА им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, Воронеж, Россия  
[akvor@yandex.ru](mailto:akvor@yandex.ru)

Одна из современных актуальных проблем при создании новых материалов и технологий их производства – проблема зарождения дефектных структур, и их развития в процессе деформации. Для выявления дефектов и их характеристики желательно применение методов исследования, прежде всего, приповерхностных слоев изучаемых объектов, имеющих определяющее влияние на их физические свойства. При этом требуются режимы, обеспечивающие получение взаимодополняющей информации, как относительно друг друга, так и по отношению к развитым стандартным методам исследований. Одними из наиболее соответствующих предъявляемым требованиям, на наш взгляд, являются АМД-методы [1,2]. Решению поставленных задач с их помощью и посвящена настоящая работа.

Первый этап – создание и апробация методики выявления и характеристики дефектов различной физической природы, а также определение критичных параметров объектов исследований. Второй этап – оценка процесса деформации и его параметров с помощью АМД-методов. Рассмотрим более подробно одну из методик, позволяющую выявлять микротрещины, определять их поперечные размеры, глубину, оценивать степень опасности для объекта в целом. Для этого был разработан акустический метод интерференционных полос, который позволяет экспериментально, без применения  $V(Z)$  – кривых [3], рассчитать значения скорости  $v_R$  поверхностных акустических волн (ПАВ) непосредственно по акустическому изображению. Проведенные на модельных образцах эксперименты показали, что при определенных условиях вокруг микротрещин наблюдаются системы интерференционных полос (ОСП), образованные стоячими акустическими волнами [4]. Появление ОПС обусловлено линейностью акустических приемников. Было предложено использовать данное явление для обнаружения микротрещин, толщина которых практически на порядок ниже длины АВ ( $\lambda_R$ ), применяемой для визуализации. Пример акустического изображения трещины в модельном образце из кремния  $\langle 111 \rangle$  с ОСП приведен на рис. 1.



**Рис.1.** Микротрещина в Si  $\langle 111 \rangle$  с окаймляющей системой полос (404 МГц,  $H_2O$ , масштаб 18 мкм /дел., ширина трещины 2,2 мкм,  $\lambda_R = 11,34 \pm 0,3$  мкм,  $v_R = 4,66 \cdot 10^3$  м/с,  $Z = -4$  мкм)

Оно демонстрирует возможность точного расчета значений  $\lambda_R$  (до десятых долей микрометра) и скорости ПАВ (погрешность 0,5 – 1,0%). Кроме того, такие трещины хорошо выявляются и под слоем алюминия толщиной до 15 – 20 мкм. Такие полосы обусловлены интерференцией различных частей отраженного излучения. Они могут быть использованы для количественных оценок акустических параметров образцов, в особенности при количественной оценке параметров малых включений на ограниченной площади.

Выходной сигнал САМ вблизи границы может быть записан в виде:

$$V(x,Z) = A(Z)e^{i\varphi_0(Z)} + V(Z)e^{i\varphi_{ref}(Z)} \quad (1)$$

где  $A(Z)\exp\{i\varphi_0(Z)\}$  – основной сигнал на выходе микроскопа. Он не зависит ни от наличия границы, ни от расстояния от нее до фокального пятна. Амплитуда и фаза основного

сигнала, естественно, зависят от координаты  $Z$  - взаимного положения линзы и поверхности образца. На основной сигнал накладывается дополнительный сигнал  $V_{ref}(Z)\exp\{i\varphi_{ref}(Z)\}$  возбуждаемый вытекающими рэлеевскими волнами, отраженными от препятствия. Реальный вклад в выходной сигнал дают только волны, падающие на это препятствие нормально к границе. Дополнительный фазовый сдвиг  $\varphi_{ref}(x)$  обусловлен распространением рэлеевской волны от фокального пятна до препятствия и обратно вдоль направления нормали к границе раздела (координата  $x$ ):

$$\varphi_{ref}(x) = 2 \frac{\omega}{v_R} x . \quad (2)$$

Из волновых представлений следует, что расстояние между соседними светлыми или темными полосами равно половине длины  $\lambda_R$  рэлеевской волны:

$$\Delta x = \lambda_R / 2 . \quad (3)$$

А скорость  $v_R$ , фактически равная  $v_{пав}$ , определяется выражением

$$v_R = 2v_l \Delta x / \lambda_l , \quad (4)$$

где  $v_l$  – скорость звука в иммерсионной жидкости,  $\lambda_l$  – длина акустической волны в иммерсии;  $\Delta x$  – расстояние между соседними однотипными полосами.

Волны на рис. 1 – стоячие, и изображения их узлов расположены на расстояниях  $\lambda_R/2$ . Для расчета значений  $\lambda_R$ , определили масштаб. На 10 больших делений масштабной сетки приходилось 87,6 мм. С другой стороны, масштабы стандартных изображений САМ, определенные с помощью набора эталонных объектов, составляют 18, 25, 35 мкм/дел. В рассматриваемом эксперименте увеличение было максимальным, а значит, масштаб составлял 18 мкм/дел. Из пропорции находим, что на 1 мм на изображении приходится 2,05 мкм (87,6 мм/10 дел. = 8,76 мм/дел., следовательно, на 1 мм приходится 18/8,76 = 2,05 мкм). С другой стороны, из измерений расстояния, на котором укладывается целое число полуволн можно рассчитать значения  $\lambda_R/2$  в миллиметрах на изображении. Восемь  $\lambda_R/2$  укладывается на 22,3 мм. Следовательно, в миллиметрах  $\lambda_R/2$  в рассматриваемом случае составит 22,3/8 = 2,79 мм. Умножив это значение на величину масштаба получим:  $\lambda_R = 2 \cdot 2,79 \cdot 2,05$  мкм = 11,43 мкм. С учетом известной (407 МГц) рабочей частоты сканирующего акустического микроскопа (САМ), рассчитали величину скорости  $v_R$ :

$$v_R = \lambda_R \cdot f = 11,43 \cdot 10^6 \cdot 407 \cdot 10^6 = 4,65 \cdot 10^3 \text{ (м/с)} . \quad (5)$$

Для оценки достоверности полученных значений  $v_R$  определяли их с помощью другого способа, применив режим вертикального сканирования объекта вдоль оси  $Z$  акустической линзы и метод  $V(Z)$  – кривых. В проведенных экспериментах  $\Delta Z_N$  определялось путем деления расстояния между первой и четвертой впадинами на соответствующее количество “горбов” (равное трем):

$$\Delta Z_N = Z_N / N = 104,7 / 3 = 34,9 \text{ мкм} . \quad (6)$$

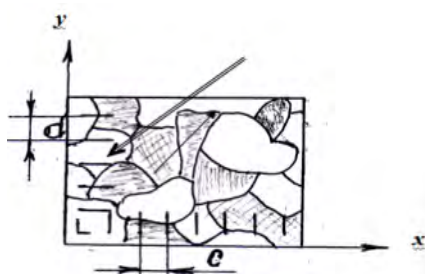
Тогда, используя [4] формулу:

$$v_R = v_l (1 - (1 - v_l / 2f \Delta Z_N)^2)^{1/2} \quad (7)$$

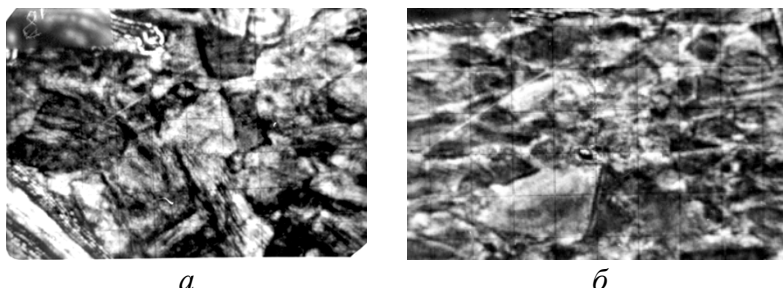
определяли  $v_R$ , считая  $v_l = 1483$  м/с при 20°C и  $f = 407$  МГц. Полученное в результате значение  $v_R = 4650$  м/с с учетом погрешности, не превышающей 1% совпадает с приводимыми в литературе данными для кремния этой кристаллографической ориентации. Этот же метод применен нами для оценки скорости рэлеевской волны в одиночных волокнах нитрида бора внутри керамической матрицы [5] (с диаметром волокон порядка 10–30 мкм).

На акустическом изображении имеется калибровочная сетка, позволяющая рассчитывать размеры тех или иных структурных составляющих. Измерив начальные размеры вы-

бранного объекта вдоль двух взаимно перпендикулярных направлений и контролируя их в процессе деформации или после неё, определяют степень деформации. В настоящей работе использовался оценочный критерий связанный с нанесением на поверхность объекта набора калиброванных “меток” (рис.3). Зная величину периодов  $c$  и  $d$  до деформационного воздействия и их трансформацию после неё рассчитывают значение степени деформации. Оценка степени деформации исследуемого образца может быть осуществлена и путём статистической обработки результатов анализа совокупности зёрен структуры.

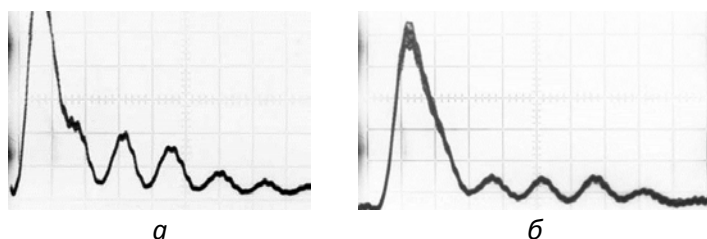


**Рис. 2.** Схема расчета степени деформации

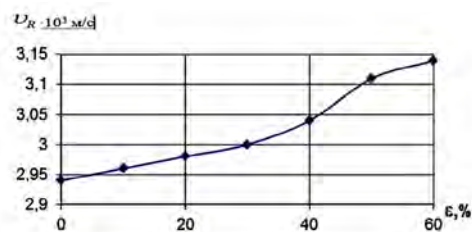


**Рис. 3.** Акустическая визуализация структуры стали с различной степенью деформации (а) 5% деформация; шлиф параллелен плоскости прокатки; б) 50% деформация; шлиф параллелен плоскости прокатки;  $H_2O$ ,  $Z = -12$  мкм, масштаб 50 мкм/дел.).

На основании применения методов анализа  $V(Z)$ -кривых рассчитываются значения скорости акустических волн (АВ), например, поверхностных ( $v_R$ ). При деформации материала меняются как интегральные, так и локальные значения  $v_R$ . По их величинам, а также по степени дисперсии судят о степени деформации материала. На рис.6 представлена характерная  $V(Z)$ -кривая для одного из сортов стали. Её анализ позволяет оценить уровень поглощения АВ в материале, а также величину  $v_R$  и модуля упругости  $E$ .



**Рис. 4.** Оценка физических параметров стали с различной степенью деформации методом  $V(Z)$  – кривых ( $H_2O$ , по вертикали: 1 В/дел., а) 5% деформация; шлиф параллелен плоскости прокатки; масштаб по горизонтали: 12,5 мкм/дел.,  $\Delta Z_N = 14,95$  мкм,  $v_R = 3,11 \cdot 10^3$  м/с б) 50% деформация; шлиф параллелен плоскости прокатки; масштаб по горизонтали: 10,6 мкм/дел.,  $\Delta Z_N = 13,74$ ,  $v_R = 2,98 \cdot 10^3$  м/с;



**Рис. 5.** Зависимость скорости  $v_R$  в стали от степени деформации (измерено методом  $V(Z)$  – кривых).

При исследовании образца по схеме, представленной на рис. 2, получим изображения с различной конфигурацией зёрен после различной степени деформации (рис. 3), и различные значения  $v_R$ . Анализ изображений и расчёт  $v_R$  по  $V(Z)$ -кривым позволил получить для ряда сталей зависимости  $v_R$  и степени деформации от размеров зерна (рис.5). В конечном итоге, можно получить зависимость  $v_R - \epsilon^0$ , анализ которой позволяет простым измерением скорости ПАВ получать величину деформации области исследований.

Таким образом, применение АМД-методов позволяет непосредственно рассчитывать степень деформации по акустическим снимкам, или определять эту характеристику по значениям скорости ПАВ в образцах.

#### Список литературы

1. Кустов А.И., Мигель И.А. и др. // М и ТОМ. 1998. № 4. С. 29 – 32.
2. Кустов А.И. // "Физика и химия стекла", 1998 - т.24 - №6 - с.817-824.
3. Кустов А.И., Буданов А.В. и др. // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естест. и техн. науки. 2000. Т. 5. Вып. 2-3. С. 320 - 322.
4. Кустов А.И., Мигель И.А., Щербинин И.А. // Сб. Трудов XX С.-Петербур. Чтений по проблемам прочности, апр.2010, ч.1 – 368 с (с. 243-245).
5. Кустов А.И., Мигель И.А. // "Материаловедение", №8, 2011 г - с. 15 – 19.

## ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ КРИСТАЛЛОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОКРЫТИЙ АМД-МЕТОДАМИ

Кустов А.И.<sup>1</sup>, Мигель И.А

<sup>1</sup> Воронежский государственный педагогический университет, Россия  
ВУНЦ ВВС ВВА им. профессора Н.Е.Жуковского и Ю.А. Гагарина, Воронеж, Россия  
[akvor@yandex.ru](mailto:akvor@yandex.ru)

Изучение свойств кристаллов – отдельная область исследований, нуждающаяся в постоянном совершенствовании методов исследования степени совершенства структурного строения материалов. Особое внимание при этом уделяется контролю дефектных структур и анализу их трансформации. Весьма перспективны в этой области неразрушающего контроля методы исследований, построенные на применении акустических волн и имеющие ряд преимуществ [1,2]. В частности, АМД-методы позволяют получать серии структурных акустических изображений на различной глубине от поверхности, оценивать по ним степень однородности и изотропности материалов. Не менее информативным методом анализа структуры кристаллов является метод  $V(Z)$ -кривых [3]. Он основан на получении интерференционных картин для зеркально отраженных и переотраженных приповерхностными слоями объекта волн (при сканировании акустической линзы вдоль оси  $Z$ , перпендикулярной поверхности). Эти интерференционные картины формируются в виде характерных кривых, главный максимум которых связан с величиной коэффициента затухания акустических волн в материале объекта ( $\Delta V/V\%$ ), а лежащая правее область периодических осцилляций определяет значение характерного расстояния  $\Delta Z_N$  [4]. Значение  $\Delta Z_N$  позволяет рассчитать величину скорости  $v_R$  приповерхностных акустических волн (ПАВ):

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

При изменении кристаллографической ориентации приповерхностных слоев объекта меняются и характеристики распространения акустических волн в нем. По величине этих изменений судят о трансформации свойств кристалла. На рис.1 представлена характерная кривая для Ge <111>. Акустическое изображение участка исследований демонстрируется на рис.2.