

## ВЫЯВЛЕНИЕ И ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ДЕФЕКТОВ В МАТЕРИАЛАХ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

<sup>1</sup>Кустов А.И., Мигель И.А

<sup>1</sup>Воронежский 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

Проблема выявления и характеристики дефектов в материалах конденсированного состояния – одна из наиболее актуальных в современном материаловедении. При этом важна информация не столько о самих дефектах, сколько об их влиянии на свойства материала. Свойства же определяются структурным строением материала. Поэтому, важно исследовать структуру с минимальным дополнительным воздействием, выявлять в ней области залегания дефектов, определять тип дефектов и характеризовать их по форме, размеру, степени опасности развития и проч. Желательно, чтобы различные методы исследования перечисленных характеристик систем дефектов взаимодополняли друг друга и базировались бы на одних физических принципах. Всем этим требованиям отвечают активно развивающиеся в последние десятилетия АМД-методы [1,2]. Суть их заключается в облучении объекта исследований акустическими волнами (АВ) гигагерцового диапазона, с дальнейшим приемом отраженного сигнала и его анализом. Так как по сути дефекты, это неоднородности материала, в области их локализации существует изменение акустического импеданса, которое и выявляется с помощью сканирующего акустического микроскопа (САМ).

Было предложено разработать режимы работы САМ, позволяющие анализировать структуру материала, характеризовать её по акустическим изображениям и с помощью метода  $V(Z)$ -кривых [3]. Однородность и изотропность структуры определялась по результатам измерений скоростей ПАВ и коэффициента поглощения АВ в материале, а также по акустическим изображениям, по сигналу строки и проч. Обнаружение и характеристика дефектных областей и их систем были проведены АМД-методами для монокристаллов, стекол, сталей, керамик, чистых металлов. Метод  $V(Z)$ -кривых позволил рассчитать значения скоростей акустических волн ( $v_R$ ) с точностью до 0,2%. Деформация металла, возникновение упругих неоднородностей или микротрещин, проявляется в трансформации характерной зависимости выходного сигнала преобразователя  $V$  от расстояния  $Z$  до линзы.

На первом этапе проведены эксперименты на модельных объектах с дефектными структурами, выявленными стандартными методами, или в результате использования взаимодополняющих методик (например, акустомикроскопической визуализации и измерения параметров АВ, рис.1).

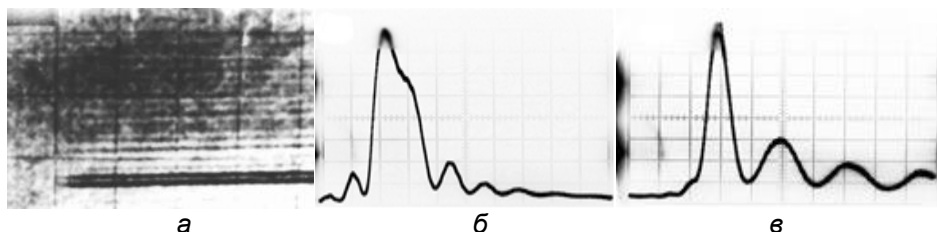


Рисунок 1 – Анализ дефектных структур АМД-методами а– акустическое изображение микротрещины в полупроводнике (Si<111>, масштаб 20 мкм/дел.,  $f = 402$  МГц,  $Z = -16$  мкм); б, в–  $V(Z)$ -кривые для полупроводниковых материалов (германий (б) и кремния(в)), (масштаб по вертикали 0,4 В, по горизонтали, соответственно, 1 дел.=11 мкм и 16 мкм)

На втором этапе были выявлены дефекты в стеклах различных марок, прошедших механическую обработку при различных параметрах воздействия. Такого типа дефекты не выявляются другими способами (рис.2,а). В районе их залегания существенно меняется вид  $V(Z)$ -кривой (рис.2,б), что обеспечивает метод выявления микротрещин и характеристикацию их размеров и распределения в растре. Обнаружение

микротрещины в площади растра можно осуществить и с помощью режима строки (рис.2,в).

Обнаружена корреляция между параметрами обработки (давление на режущее устройство, глубина пропилов, скорость вращения режущего устройства и проч.) и количеством и размером дефектных областей, образующихся в стекле (рис.3).

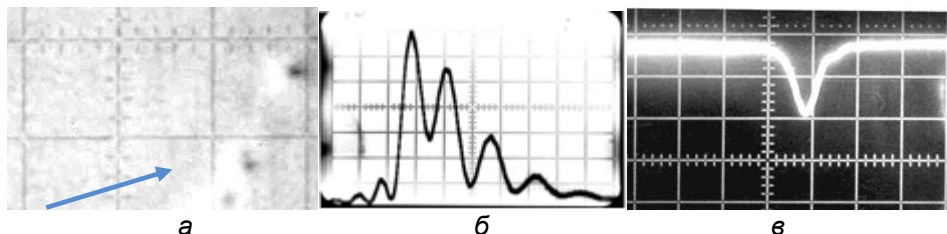


Рисунок 2 – Выявление и характеристика дефектов в стеклах АМД-методами (а – акустическое изображение трещины субмикронного размеров К-108; масштаб 11 мкм/дел.; б – изменение формы V(Z)-кривых в стекле в районе микротрещины; в – выявление микротрещины в режиме строки(по вертикали 1 дел.=0,25 В, по горизонтали 1 дел.=8 мкм)

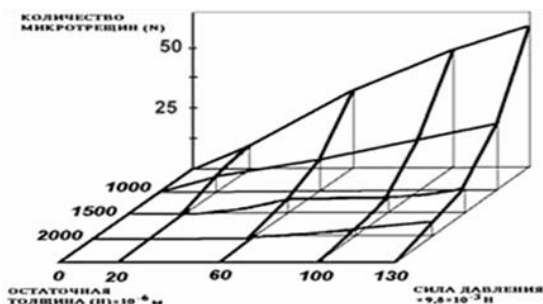


Рисунок 3 – Корреляция числа дефектов в стекле и параметров обработки (по результатам АМД-методов). Экспериментальная зависимость для стекла ТПС числа выявленных микронеоднородностей N от силы давления F на образец и глубины визуализации H

На третьем этапе рассматривались образцы сталей с микротрещинами, образовавшимися как в процессе изготовления, так и после деформационных воздействий различного типа. На рисунке 4 представлены корреляционные зависимости степени деформации и размера зерна стали, а также скорости ПАВ ( $v_R$ ). Измеряя скорость ПАВ с помощью АМД-методов [4-6] можно надежно определять как размер зерна независимым способом, так и степень деформации. При образовании в результате деформации трещин в металле существенно изменяется характерная V(Z)-кривая (рис.4,в), что позволяет оценить и размер, и глубину залегания дефекта. Пример выявления с помощью САМ микротрещин

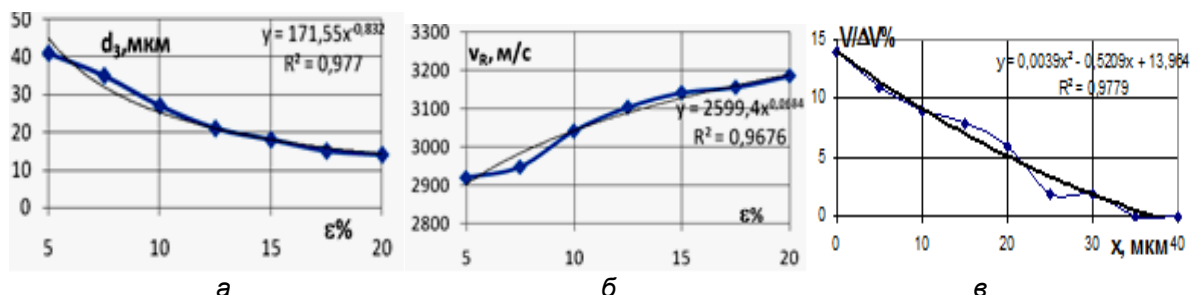


Рисунок 4 – Корреляционная зависимость размера зерна от степени деформации (ст. 20ХГСА); б) Зависимость скорости ПАВ в образце от степени деформации (ст. 20ХГСА); в) изменение коэффициента затухания АВ в меди (М1) с трещиной после деформационного воздействия

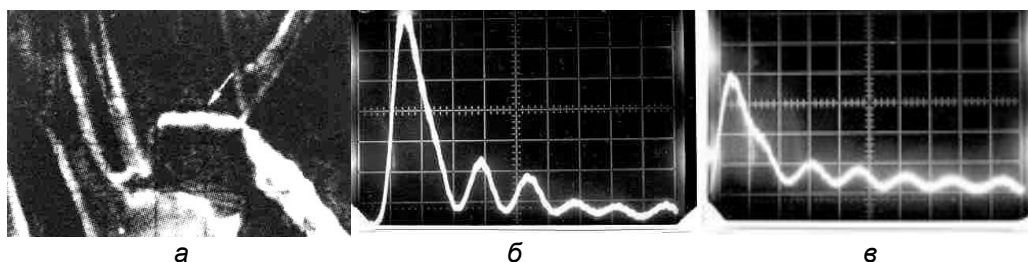


Рисунок 5 – Обнаружение дефектов металлических материалов после деформационного воздействия; а - акустическое изображение трещины субмикронного размера в стали аустенитного класса ( $Z=40$  мкм, масштаб 20 мкм/дел); б – $V(Z)$ -кривые для одного из сортов стали (изменяется форма в районе микротрещины на 8–37%; ст. 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 дел.= 0,25 В, по горизонтали – 1 дел.=12,2 мкм)

В сталях по акустическому изображению и с помощью  $V(Z)$ -кривых (рис.5).

На четвертом этапе применяли АД-методы для выявления и характеристики таких опасных дефектов как питтинги, так как очаги питтинговой коррозии являются концентраторами напряжений.

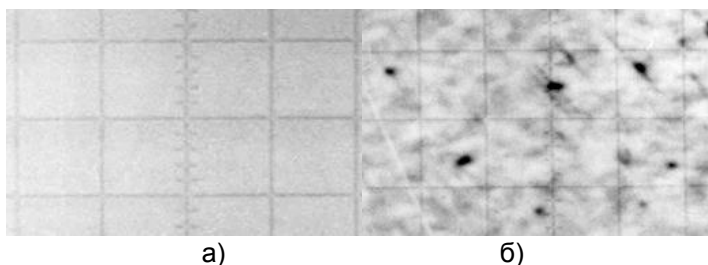


Рисунок 6 – Оптическое (а)  $210\times$  и акустическое (б) изображения приповерхностного слоя стали (08X21H6M2T), подвергнутой коррозионным испытаниям (питтинг, масштаб 35 мкм/дел.,  $f=402$  МГц, б)  $Z=-2$  мкм

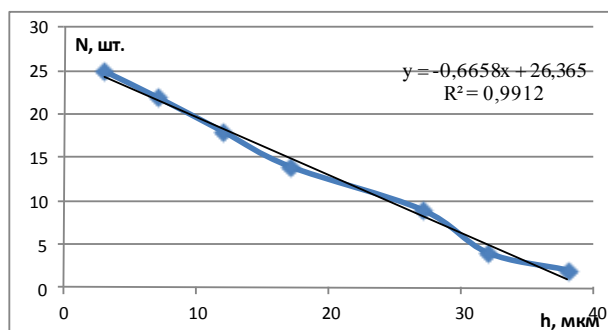


Рисунок 7 – Зависимость количества выявленных питтингов от глубины визуализации

При этом резко снижаются все механические свойства. В качестве объектов исследований были выбраны образцы сталей, подвергнутых питтинговой коррозии. Наиболее важными параметрами изменения состояния материала, вне зависимости от вида коррозии и марки стали, является наличие микродефектов, их размеры, количество, скорости роста, а также взаимосвязь этих параметров с прочностными характеристиками. При этом чаще всего сплав не является однородным материалом, и коррозия в нем носит локальный характер. Одной из разновидностей коррозионностойких сталей являются стали аустенитно-ферритного класса, содержащие 18–22% Cr, 2–7 % Ni, а также Mo и Ti. Для них существует проблема выявления локальных зон поражения, определения таких параметров дефектов, как диаметра и глубины проникновения. Чаще всего на поверхности материала питтинг не проявляется, а при изготовлении шлифов для исследований поверхностный слой часто «заполировывается»(рис.6). Эксперименты по оценке возможности выявления и характеристики микродефектов типа питтингов АД-методами проводились на образцах сталей 08X21H6M2T и 06X14H6MД2T.

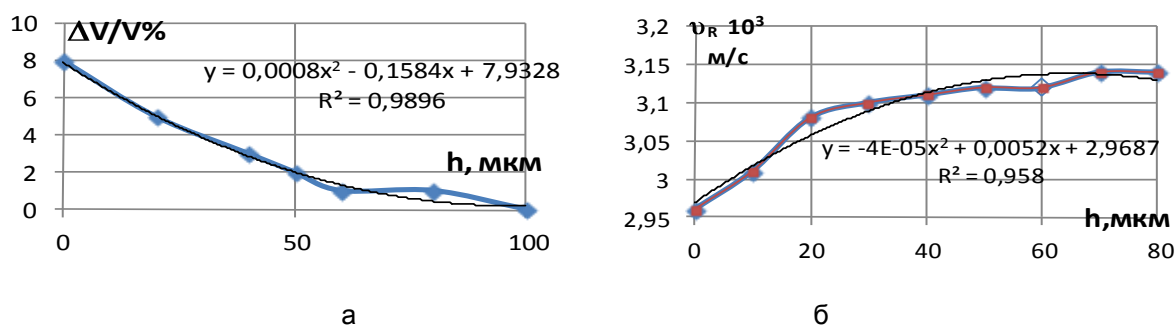


Рисунок 8 – Характеризация дефектных структур в стали с помощью АМД-методов;  
 а – изменение уровня затухания АВ в образце с глубиной зондирования;  
 б – изменение скорости ПАВ в образце с увеличением толщины снятого слоя.

На рисунке 6 представлены сравнительные оптическое и акустическое изображения поверхности стали 08Х21Н6М2Т после испытаний. Очаги микродефектов на оптическом снимке практически неразличимы. Существенный выигрыш при визуализации таких повреждений предоставляет АМД-метод [7]. Изменяя расстояние Z и используя зависимости коэффициентов трансформации на поверхности объекта (сталь–вода, сталь–ртуть, сталь–ацетон) с достаточно высокой точностью определяли глубину визуализации ( $h$ ).

Измеряя на акустическом изображении диаметр питтинга на различных глубинах получали зависимости его размерного параметра от расстояния до поверхности. С учетом масштаба акустического изображения, размеры питтингов для образцов данной партии лежали в пределах 3–12 мкм. С увеличением глубины визуализации количество выявляемых питтингов сокращалось, а их диаметры уменьшались. При этом все отчетливее проявлялось структурное строение образцов. По сериям акустических изображений, аналогичных представленным на рисунке 6 получали зависимости количества ( $N$ ) выявляемых питтингов от глубины визуализации (рис.7). Такие зависимости позволяют оценивать неразрушающим способом как максимальную глубину микродефектов, так и скорости их зарождения [5].

Для определения интегральной характеристики, позволяющей оценивать изменение параметров поверхности образца в целом более продуктивно использовать  $V(Z)$ -метод. Эта характеристика – относительная высота ( $\Delta V/V\%$ ) главного максимума  $V(Z)$  – кривых. С ростом глубины питтингов и при увеличении их количества в приповерхностном слое стали повышается коэффициент затухания акустических волн, а значит и её значение (рис.8,а). Чувствительна к глубине и размерам питтингов и скорость акустических волн (рис.8,б). Следовательно, приняв за точку отсчета значение для бездефектного образца, можно по полученной зависимости оценивать степень поражения образца коррозией.

Таким образом, продемонстрирована эффективность АМД-методов при выявлении и характеризации дефектов в материалах конденсированного состояния. Они позволяют при изучении питтинговой коррозии без дополнительной обработки поверхности визуализировать подповерхностные микронеоднородности, определять их геометрические параметры, наблюдать трансформацию плотности и акустомеханических параметров.

#### Список литературы:

1. Мигель И.А., Кустов А.И. Изучение металлических слоев и полимерных композитов с помощью акустических волн // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения.*, том 12, №2., 2015. – ISSN 1811-1416 (с. 241 -247).
2. 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).
3. 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.

4. 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).

5. 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).

6. 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.

7. Кустов А.И. Мигель И.А. Оценка степени деформации материалов и определение параметров их разрушения АМД-методами // *Вестник Тамбовского университета. Сер. Ест. и техн. науки.* – Тамбов, 2016. – Т.21. – Вып.3. – 1464 с. (с. 1102-1106).