

Предложенный метод обработки хорошо применим для линеаризации отдельных участков сигналов и обеспечивает требуемый уровень точности, установленный для испытательного оборудования пожарных оптико-электронных дымовых извещателей. При этом показатель степени аппроксимирующего полинома является определяющим результирующую точность фактором. Так, число локальных экстремумов в исходном сигнале не должно превышать степень полинома. Данное ограничение связано с плохой обусловленностью степенных функций в окрестностях областей с высокой скоростью её изменения.

#### Литература

1. СТБ EN 54-7-2009 «Системы пожарной сигнализации. Часть 7. Извещатели пожарные дымовые точечные, оптические и радиоизотопные».
2. СТБ EN 54-12-2009 «Установки пожарной сигнализации. Часть 12. Извещатели дымовые. Извещатели линейные оптические»

3. Cashdollar K.L., Lee C.K. Singer J.M., Three-wavelength light transmission technique to measure smoke particle size and concentration, *Applied Optics*, Vol. 18, No. 11, 1979, pp.1763-1769.

4. Putorti, A. D., Jr. Design Parameters for Stack-Mounted Light Extinction Measurement Devices. NISTIR 6215; 1999, 34 p.

5. Deepak A., Box M.A. Forward scattering Corrections for Optical Extinction Measurements in Aerosol Media. 1: Monodispersions, *Applied Optics*, Vol. 17, No. 18, 1978, pp.2900-2908.

6. Измерение характеристик воздуха в верхней зоне помещения при горении бумажной продукции / И.Е. Зуйков [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2014. – № 1 (8). – С. 68–72.

7. Зуйков И.Е., Антошин А.А., Олефир Г.И., Третьяк И.Б. Установка, моделирующая пожары в начальной стадии развития // Сборник научных трудов «Достижения физики неразрушающего контроля и технической диагностики». – Минск : ИПФ НАН Беларуси, 2011. – С. 197–202.

УДК 620.179.16-534.2

### ОБ ИЗМЕРЕНИИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ МЕТОДАМИ

Баев А.Р., Майоров А.Л., Асадчая М.В., Жаворонков К.Г.

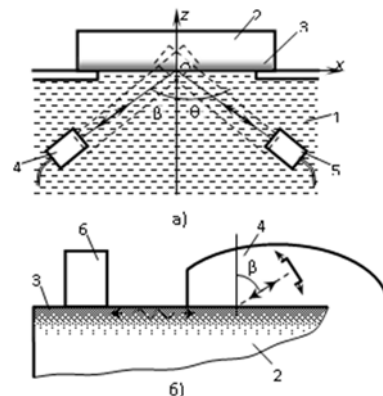
Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Одно из важных направлений повышения производительности и надежности контроля качества упрочнения поверхности металлоизделий цементированием, закалкой ТВЧ, лазерным отжигом, накаткой и др. заключается в использовании акустического метода, где в качестве первичного информативного параметра используется скорость распространения поверхностной волны  $C_R$  или другие параметры, существенно зависящие от нее. Скорость  $C_R$  хорошо коррелирует с физико-механическими свойствами стальных и чугунных металлоизделий, включая глубину упрочненного слоя  $\delta$ , твердость  $B$  и др. Для однородного объекта  $C_R = G(\mu)(E/\rho)^{0,5}$ , где  $\rho$  – плотность,  $E$  – модуль Юнга,  $\mu$  – коэффициент Пуассона. Если же поверхностный слой объекта неоднородный, то при моделировании распространения упругой волны подбираются некоторые эффективные параметры, определяющие  $C_R$ . Так, для изменения величины скорости распространения волны по объекту со слабонеоднородным упрочненным поверхностным (УП) слоем предложена формула Оулдера:

$$\frac{\Delta \tilde{N}_R}{C_{RO}} \sim \int_{-\infty}^0 (-\Delta w^2 \Delta \rho u_i^* u_i + u_{i,j}^* u_{k,l} \Delta E_{ijkl}) F(z) dz, \quad (1)$$

где  $w$  – абсолютное значение средней за период энергии невозмущенной волны, переносимой

через упругое полупространство единичной ширины;  $\Delta E_{ijkl}$  – изменения упругих модулей;  $u_{k,l}$  – поле смещений в волне или тензор смещений; функция  $F(z) \sim \Delta B = B - B_0$ . При реализации амплитудно-угловых методов в качестве коррелирующих со свойствами УП слоя параметров могут быть использованы экстремальные значения углов падения продольной волны  $\beta^*$  на УП слой, определяемые из формулы Снеллиуса:  $C_R = C_L \sin \beta^*$ , где угол  $\beta^*$  соответствует минимуму амплитуды отраженной (рис.1а) или максимуму возбуждаемой в объекте волны (рис.1б).



1 – иммерсионная среда; 2 – образец; 3 – упрочненный слой; 4 – излучающий ПЭП; 5 – приемный ПЭП; 6 – отражатель ПАВ

Рисунок 1 — Схемы экспериментов:

В работе предложены способы повышения эффективности амплитудно-угловых и импульсно-фазовых методов для определения глубины УП слоя стальных образцов, упрочненных цементацией, закалкой ТВЧ, а для образцов чугуна – отбелом. Так, в отличие от зеркально-теневое варианта прозвучивания [1], предложен режим эхо, позволяющий не только уменьшить погрешность установки угла  $\beta^*$  в 1,5-2 раза, но и упростить измерительную процедуру за счет использования вместо приемного преобразователя рефлектора с заданной апертурой.

В качестве иммерсионной среды предложено использовать магнитожидкостный коллоид, что позволяет проводить измерения при различной ориентации контролируемой поверхности объекта и локализации жидкости под воздействием пондеромоторных сил. Как видно (рис.2), этот метод является достаточно простым и позволяет производить оценку глубины УП слоя по корреляционным зависимостям  $\beta^*(\delta)$ . Рекомендуемая длина зондирующей волны  $\lambda_R \geq \delta$ , т.к. при  $\lambda_R > \delta$   $\beta_\delta = d\beta^*/d\delta \rightarrow 0$  (для стальных образцов). Для отбела же на чугуне –  $\beta_\delta < 0$ , что, по видимому, обусловлено влиянием рассеянных в окрестности границы чугуна с отбелом волн. Как видно, чувствительность  $\beta_\delta$  для случая контроля отбела весьма высока, что позволяет использовать этот метод в производственных условиях – при  $R_z$  до ~ 20-30 мкм и выше.

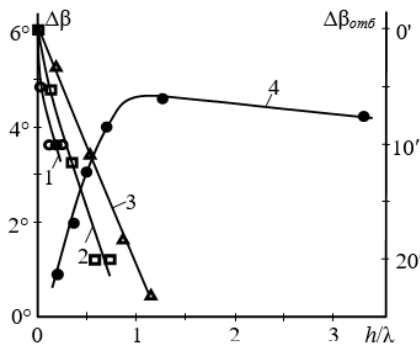


Рисунок 2 – Влияние безразмерной глубины среза стального образца, упрочненного цементацией, на изменения угла экстремума  $\Delta\beta$  (минимума) (1-3), а также изменения  $\Delta\beta$  с ростом безразмерной глубины отбела (4):  $f$ , МГц = 1,1 (1); 3,3 (2); 5 (3)

Поясняемый на рис.1б метод контроля  $\delta$  заключается в определении угла максимума зависимости  $A(\beta)$ , характерной для каждого значения  $\delta$  (рис. 3). Усовершенствование метода заключается в использовании эхо-режима прозвучивания объекта – с помощью одного ПЭП, работающего в совмещенном режиме, и отражателя ПАВ в виде призматического тела специальной формы с острым выступом, контактирующего с объектом через контактную среду [2].

Расчитанные на основе представлений лучевой акустики геометрические параметры отража-

теля обеспечивают соотношение сигнал-шумовой фон не менее 35 дБ. Такие отражатели могут быть использованы для создания опорного сигнала при контроле объектов в труднодоступных местах и имеющих сложный рельеф – как по данным амплитудно-угловых зависимостей, так и при реализации импульсно-фазовых методов. Отметим, что амплитудно-угловые методы имеют погрешность измерений скорости ПАВ больше, чем при использовании импульсно-фазового метода, реализуемого с помощью предложенного высокоточного устройства [3], содержащего один источник УЗК и два приемных малоапертурных ПЭП, расположенных на расстоянии  $L$  между ними.

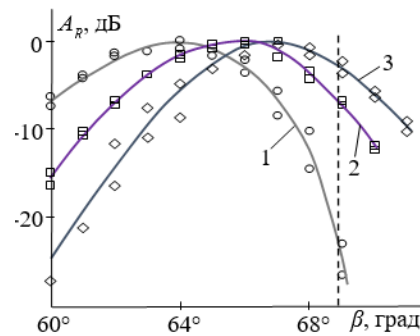


Рисунок 3 – Зависимость нормализованной амплитуды ПАВ от угла призмы  $\beta$ ;  $h^* = 0$  (1); 0,4 (2); 1,5 (3)

Во второй части работы проводится численное и экспериментальное моделирование распространения ПАВ в упрочненных цементацией и ТВЧ закалкой стальных образцах. При этом распределение твердости по высоте имеет трапециевидальную форму, параметры которой варьировались. При этом использовалась зависимость  $\Delta C_R \sim \Delta B$ . Некоторые результаты численного моделирования и опытных данных представлены на рис.4, где приведены зависимости изменения  $C_R$  от толщины срезаемого УП слоя на разных частотах. Как видно, наблюдается неплохое качественное соответствие между данными эксперимента и расчетной модели.

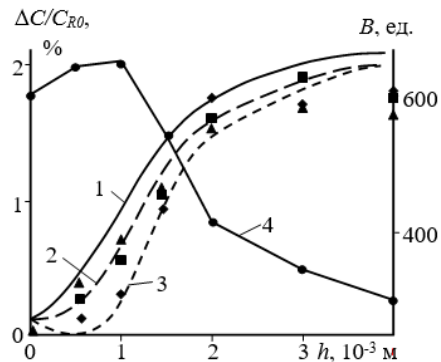


Рисунок 4 – Влияние глубины среза УПС  $h$  на скорость  $C_R$ : эксперимент (●, ■, ◆, ▲) и расчет (1-4): 1-3, ▲, ◆, ■ -  $\Delta C/C_R$ ; 4, ● - твердость  $B$ ;  $f$ , МГц = 1 (1, ▲); 1,8 (2, ◆); 3,8 (■); 4 (3),  $\beta$ , град

Экспериментальные зависимости  $C_R(\delta)$  (рис. 4) являются квазилинейными при  $\delta < (0,6-0,7)\lambda_R$ , а характерный тангенс их наклона с уменьшением частоты падает. Кривая скорости 2 в окрестности максимума функции  $V(\delta)$  претерпевает четко выраженный излом, обусловленный особенностями изменения модуля Юнга, зависящего от твердости УП слоя. Т.о., использование дисперсионных характеристик  $C_R(f)$  является весьма важным не только для определения глубины УП слоя, но и для зондирования распределения по высоте его твердости, бальности зерна и других свойств УП.

*Настоящая работа выполнена при частичной поддержке БРФФИ, проект №Т17-159.*

УДК 621.3.049

### ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ ФОТОПРИЕМНИКОВ НА БАЗЕ СТРУКТУР С МНОГОЗАРЯДНЫМИ ПРИМЕСЯМИ Воробей Р.И., Гусев О.К., Свистун А.И., Тявловский К.Л., Шадурская Л.И.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

Фотоэлектрические полупроводниковые преобразователи (ФЭПП) являются элементной базой фотоприёмных устройств различного назначения. Основными параметрами ФЭПП, определяющими область его применения, являются динамический диапазон энергетической характеристики, спектральная чувствительность, быстродействие, зависящие от физических параметров полупроводникового материала. Для расширения динамического диапазона и управления спектральной чувствительностью ФЭПП с собственной фотопроводимостью [1] предложено использовать многозарядные примеси в невысокой концентрации ( $<10^{14}$  см<sup>-3</sup>), формирующие несколько глубоких энергетических уровней в запрещенной зоне [2].

Особенностью создания структур для таких ФЭПП является требование высокой точности легирования и однородности распределения примеси по объему активной области полупроводника. Традиционные методы легирования при использовании быстродиффундирующих многозарядных примесей, такие как диффузия и ионная имплантация, не обеспечивают необходимую управляемость, точность (прецизионность) и однородность легирования. В связи с чем для создания таких структур был предложен метод твердофазного (плазменного) легирования с использованием лазерной плазмы или плазмы тлеющего разряда [3], отличающийся воспроизводимостью, экологичностью и прецизионностью легирования эпитаксиальных структур. Однако попытки введения цинка и меди в гидридном процессе газоразрядного легирования не увенча-

### Литература

1. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. / Под общ.ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2003. – Т. 3. – 864 с.
2. Ультразвуковое устройство с отражателем поверхностных волн: пат. 9911 Респ. Беларусь, МПК G 01 N 29/04 / А.Р. Баев, О.С. Сергеева, М.В. Асадчая, М.А. Тищенко. – № u 20130571; заявл. 08.07.13; опубл. 28.02.14 // Открытия. Изобретения. – 2014. – 4 с.
3. Ультразвуковое устройство для контроля физико-механических свойств изделий: пат. 6160 Респ. Беларусь, МПК G 01 N 29/04 / А.Р. Баев, А.Л. Майоров, М.В. Асадчая, Г.Е. Коновалов, В.В. Парадинец. – №u20090742; заявл.08.09.2009; опубл. 30.04.2010 // Открытия. Изобретения. – 2010. – 5 с.

лись успехом. Анализ возможных способов распыления твердотельных мишеней, характеризующихся определенными ограничениями на их проводимость и состояние образующейся при этом газовой атмосферы, указывает на целесообразность применения для легирования эпитаксиальных слоев кремния плазмы, формируемой при лазерном облучении мишени [4].

Основным физическим эффектом при воздействии лазерного излучения на твердое тело является образование высокотемпературной плазмы при плотности потока лазерного излучения превышающей критическое значение. В этом случае поглощенная энергия превышает энергию связи атомов в веществе и энергию ионизации. В результате чего слой облучаемого вещества превращается в плазму. Исследования плазменного сгустка на ранних стадиях разлета [4] показали, что в нем можно выделить три зоны, различающиеся плотностью частиц и характером газодинамического движения. На поверхности мишени формируется плотное ядро факела, поглощающее лазерное излучение. Затем следует зона ускорения, в которой происходит переход тепловой энергии плазмы в кинетическую энергию направленного газодинамического движения. Далее реализуется зона, в которой скорость движения частиц плазмы выходит на асимптотическое значение, а тепловая энергия плазмы существенно меньше энергии направленного движения. Поскольку интенсивным эмиттером ионов является, в первую очередь, область плотного горячего ядра, именно эта область и ее параметры представляют наибольший интерес. В работе