

ная уменьшена на 41%). Радиусы кривизны и осевое расстояние между поверхностями, а также парааксиальные характеристики (фокусное расстояние, передний и задний отрезки) остались неизменными.

Таким образом, зафокальные системы с малым главным и большим вторичным зеркалами и равными по абсолютной величине радиусами являются светосильными и способны развивать значительные поля зрения. Они обеспечивают удовлетворительное качество изображения при относительных отверстиях до 1:1,2 и полях зрения до 4°. Возможны варианты модулей, обеспечивающих удобное положение

плоскости изображения. В зафокальных двухзеркальных системах данного типа экранирование определяется размером приемника излучения и блендой-экраном, необходимым для за-

щиты приемника излучения от прямой засветки. Рассчитанная система технологически адаптирована. В зафокальном объективе зеркала имеют эллипсоидную форму, но асферичность зеркальных поверхностей не превышает 0,01мм, что соответствует технологическим стандартам.

Результаты расчетов и полученные формулы могут быть использованы при проектировании новых зеркальных систем с повышенными оптическими характеристиками.

1. Максудов, Д.Д. Изготовление и исследование астрономической оптики / Д.Д. Максудов. – М.: Наука, 1984. – 276 с.
2. Артюхина, Н.К. Теория, методы проектирования и расчет зеркальных систем: монография / Н.К. Артюхина, БНТУ. – Минск, 2009. – 309 с.

УДК 620.179.1+534.1

## ВОЗБУЖДЕНИЕ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОЛНЫ ПО ОБЪЕКТУ С НЕОДНОРОДНЫМ ПОВЕРХНОСТНЫМ СЛОЕМ

Баев А.Р., Левкович Н.В., Коновалов Г.Е., Асадчая М.В., Стойчева И.В.

*Институт прикладной физики НАН Беларуси*

*Минск, Республика Беларусь*

На промышленных предприятиях нашей республики и за рубежом упрочнение поверхности металлоизделий производится различными способами обработки, включая термические, химико-термические, а также механические способы. В подавляющем большинстве случаев контроль этой важной операции осуществляется разрушающим методом – по данным зависимости твердости от глубины упрочняемого слоя  $B(z)$  либо изменения бальности зерна. Такой подход не дает полного представления о качестве контролируемой выборочно партии производимой продукции. В работе проведен анализ известных в мире разработок по контролю качества упрочнения металлоизделий магнитными, электромагнитными, акустическими методами в США, Франции, Германии, а также в странах СНГ и Республики Беларусь. Применение предлагаемых методов и средств имеет существенные ограничения, обусловленные требованиями к составу металла, геометрии и габаритам объекта, диапазону измеряемых толщин упрочненного слоя  $h$ , локальности и точности измерений, а также их трудоемкости и производительности.

Использование именно ультразвукового контроля для решения указанной проблемы обусловлено наличием наиболее высокой степени корреляции между твердостью  $B$  и скоростью

моды упругой волны, которая может быть представлена в обобщенном виде:

$$C = \Theta(\mu^*) (E^*/\rho^*)^{0,5} = \Theta(\mu^*) c^*,$$

где  $E^*$ ,  $\rho^*$  и  $\mu^*$  – некоторые эффективные параметры: модуль Юнга, коэффициент Пуассона и плотность материала соответственно;  $\Theta(\mu^*)$  – некоторая функция, от вида которой зависит определяемая мода (продольная, поперечная и поверхностная);  $c^*$  соответствует скорости нулевой моды стержневой волны. Отметим, что по отношению к свойствам слоя  $\Xi_{A,i} \in \{E, \rho, \mu\}$  упрочненный поверхностный слой (УПС) большого числа объектов можно считать слабонеоднородным, т.к.

$$\varepsilon_A = \Delta \Xi_{A,i} / \Xi_{A,i} = \{\Delta C/C, \Delta \mu/\mu, \Delta E/E, \Delta \rho/\rho\} \ll 1,$$

где  $\Delta \Xi_{A,i}$  – максимальные изменения указанных параметров по глубине УПС. В то же время для физико-механических параметров величина  $\varepsilon_{M,i} = \Delta \Xi_{M,i} / \Xi_{M,i} = \{\Delta \sigma_{np}/\sigma_{np}, \Delta B/B\}$  составляет десятки и сотни процентов. Данные об указанных свойствах УПС могут быть получены как при непосредственном измерении скорости поверхностной акустической волны (ПАВ) [1], так и зависящих от нее (косвенных) акустических параметров. Это могут быть: экстремумы углов падения и отражения падающей на упрочненный объект продольной волны  $\beta_m$  [2]; зависимости амплитуды подповерхностной поперечной волны

$A_T(x)$  от расстояния, характер которых обусловлен эффектами рефракции [3]. Необходимо отметить, во-первых, что для создания надежных и высокоточных методик и средств контроля УПС необходимо учитывать состояние поверхности объекта и характер распределения функции твердости по его глубине  $B(z)$ , которая может быть неоднозначной. Во-вторых, как правило, не учитываются особенности дисперсии волны и расположение приемных преобразователей с акустической базой между ними  $L$  при измерении времени распространения волны  $\Delta t$  между ними и определении скорости волны -  $C_{ПAB}=L/\Delta t$ .

Одна из задач настоящих исследований заключается в получении связи между характерной высотой слоя  $h$  и физико-механическими параметрами  $\Xi_{M,i}$  с одной стороны, и скоростью ПАВ с другой. Причем восстановление  $\Xi_{M,i}$  по глубине слоя УПС на основе данных о скорости или времени распространения ПАВ представляет собой фундаментальную научно-прикладную задачу.

Проведено численное моделирование процессов возбуждения и распространения ПАВ в зависимости от профиля твердости УПС, частоты волны  $f$  и глубины УПС. При моделировании переходных процессов используется программный пакет "COMSOL MULTY PHYSICS". Дисперсионные зависимости скорости ПАВ рассчитывались на основе формулы Олдера и данных о пространственном распределении плотности потока ПАВ:

$$\Delta C_{ПAB}(C_0)^{-2} \sim \int_{-\infty}^0 (-\Delta w^2 \Delta \rho u_i^* u_i + u_{i,j}^* u_{k,l} \Delta P_{ijkl}) F(z) dz,$$

где  $u_i$  и  $u_i^*$  – скорости смещений невозмущенной и возмущенной волны соответственно;  $w$  - абсолютное значение средней за период энергии невозмущенной волны, переносимой через упругое полупространство единичной ширины;  $C_0$  - скорость ПАВ в материале без УПС;  $\Delta P_{ijkl}$  - максимальные изменения упругих модулей, причем  $\{\Delta \rho, \Delta P_{ijkl}\} \sim F(z)$ . Некоторые результаты численного моделирования влияния профиля твердости на изменение скорости ПАВ от частоты приведены на рисунках 1 и 2. Причем в первом случае (рисунок 1) профиль твердости УПС подобен ступеньке с различным углом наклона боковой стенки – т.е.  $\Delta B \sim z$ . Согласно данным работы [1], а также нашим исследованиям -  $\Delta B \sim \Delta C$ .

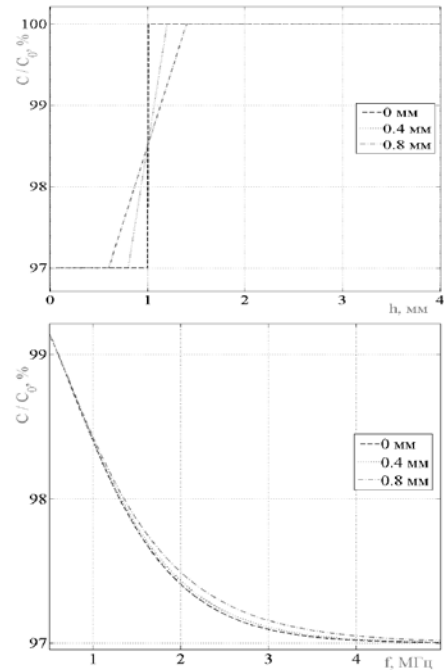


Рисунок 1 – Данные расчета скорости ПАВ от частоты при изменении профиля твердости с учетом того, что  $\Delta B \sim \Delta C$

Как показывают результаты численного моделирования, зависимости  $C(f)$  являются монотонно убывающими функциями, выходящими на насыщение при  $f \rightarrow \infty$ , если  $\partial B/\partial z < 0$  при  $z > 0$ , а в окрестности  $z \rightarrow 0$   $\partial B/\partial z \rightarrow 0$ . С увеличением глубины слоя частотная область квазилинейного изменения дифференциального параметра  $c_f = \partial C/\partial f$  возрастает. Показано, что в ряде случаев, измеряя тангенс угла наклона квазилинейной зависимости  $C(f)$  путем зондирования объекта на двух частотах  $f_i$ , представляется возможным оценить глубину УПС по данным разницы фазовых сдвигов ПАВ:  $\varphi_{12} = \varphi_2 - \varphi_1$ . На рисунке 2 представлены данные численного моделирования и данные эксперимента для случая, когда максимум твердости лежит в окрестности  $z = z_0 > 0$ , что может иметь место в реальных производственных условиях. При этом для характерных значений  $f > f_0$  или  $h < h_0$  отсутствует однозначное соответствие между значениями скорости ПАВ и толщиной упроченного слоя, обусловленное инверсией дифференциального параметра  $\partial B/\partial z$  в окрестности  $z_0$ . Устранение неоднозначности измерений достигается в том случае, когда сохраняется подобие профиля  $B(z)$ , а выбранная длина волны зондирующего сигнала  $\lambda$  больше характерного значения  $\lambda_0$ .

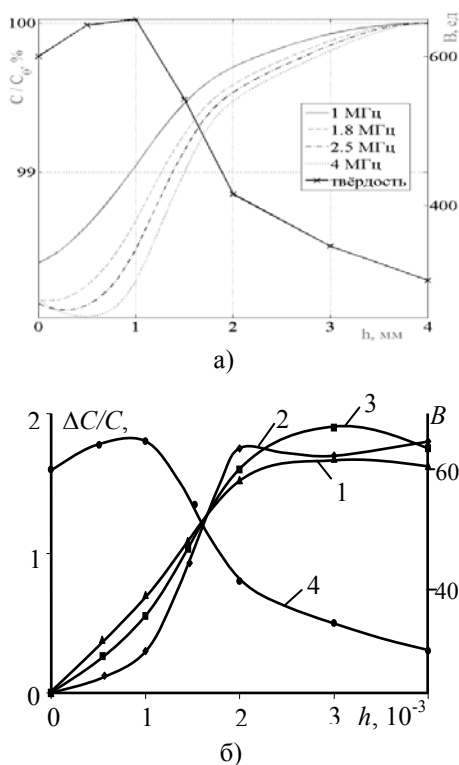


Рисунок 2 - Данные расчета (а) и эксперимента (б) по изменению скорости ПАВ от глубины среза слоя УПС:  $\Delta C/C$  - 1-3; твердость УПС - 4;  $f, MHz=1$  (1); 1,8 (2); 3,5 (3)

В отсутствие же указанной априорной информации, определение глубины УПС производится по характеру изменения фазовых задержек гармоник, составляющих спектр зондирующего сигнала.

1. Кондратьев, А.И. Влияние термообработки на акустические характеристики материалов / А.И. Кондратьев, А.Н. Иванов, С.Н. Химухин // Дефектоскопия. – 2006. - №3. – С.28-31.
2. Баев А.Р., Майоров А.Л., Тищенко М.А. Ультразвуковой метод анализа поверхностного упрочнения металлических изделий -Литье и металлургия. - 2010, №3. – С. 187-192.
3. Неразрушающий контроль: Справочник: в 7 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. - М.: Машиностроение, 2003. - Т. 3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов [и др.] –2003. – 864 с.

УДК 620.179.1+534.1

## МАГНИТНАЯ ЖИДКОСТЬ В КАЧЕСТВЕ ОПТОАКУСТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗУЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА В ТЕХНИЧЕСКОЙ АКУСТИКЕ

Баев А.Р.<sup>1</sup>, Майоров А.Л.<sup>1</sup>, Митьковец А.И.<sup>2</sup>, Асадчая М.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной физики НАН Беларуси

<sup>2</sup>Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси  
Минск, Республика Беларусь

Магнитные жидкости (МЖ) относятся к классу наноматериалов, обладают высокой агрегативной и седиментационной устойчивостью в магнитных полях [1]. Под воздействием последних представляется возможным управлять формой поверхности МЖ, локализацией в пространстве, а также микроструктурой [2-3]. Нами предложено применять такие среды для оптоакустического (ОА) преобразования при решении ряда задач технической акустики и неразрушающего контроля. В частности, это касается использования МЖ в качестве как ОА-преобразователя, так и магнитожидкостной призмы. Во-первых, это позволяет достаточно легко возбуждать в объекте продольные, поперечные и поверхностные волны заданной направленности, высокой интенсивности и частоты, что реализуется с помощью представленной на рисунке 1

схемы. При этом угол падения волны  $\theta$  на исследуемый объект для возбуждения в нем той или иной моды под углом  $\beta$  может быть определен из закона Снеллиуса:

$$\beta \approx \arcsin[(C/C_S)\sin\theta], \quad (1)$$

где  $C_S$  – скорость упругой моды в твердом теле.

Учтем, что скорость  $C$  в МЖ для широкого спектра коллоидов с органической основой и концентрацией  $q$  может быть определена из предложенного ранее аддитивного правила [4], используемого для нахождения адиабатной сжимаемости коллоида  $\beta$  и плотности  $\rho$ :  $(C_0/C)^2 = (1+AQ)(1+Bq)$ , где  $A$  и  $B$  – некоторые постоянные, характеризующие сжимаемость и весовые характеристики компонент, входящих в коллоид, а  $C=C_0$  при  $q=0$ . Отметим, что коэффициент затухания  $\alpha(q)$  для возбуждаемых в объ-