

ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Канд. физ.-мат. наук Ю.Б. НИКИТИН, канд. техн. наук Д.Н. КОРОТАЕВ, асп. Д.Ю. НИКОНОВ

Представлены исследования возможностей применения оптико-акустического эффекта для неразрушающего контроля материалов и изделий. Показано, что в ряде случаев такой метод имеет преимущества по сравнению с традиционными методами контроля. Приведены результаты экспериментов по контролю изменений структуры и повреждений в твердых телах.

Researches on optical - acoustic effect application availability for a not destroying check of materials and engineering products are presented. It is shown that in some cases such method has advantages in comparison with the testing routine. Results of experiment obtained from the structure inspection and damage assessment in solid bodies are presented.

Принципиальная возможность использования оптико-акустического эффекта для неразрушающего контроля (НК) материалов общеизвестна [1—5]; однако информация о конкретных разработках оптико-акустических методик и применения их в прикладных исследованиях весьма ограничена, несмотря на такие достоинства метода, как возможность проведения бесконтактной дефектоскопии и очень широкий спектральный состав возбуждаемого акустического импульса ($10 - 10^3$ МГц). Последнее из отмеченных преимуществ позволяет надеяться на повышение разрешающей способности устройств для НК при проведении измерений частотных зависимостей затухания и дисперсии скорости ультразвука [5], а возможность легко повышать амплитуду акустических импульсов делает этот метод весьма перспективным для проведения исследования свойств и дефектоскопии сильнопоглощающих материалов.

Все сказанное определило цель проведенной работы по исследованию возможностей использования оптико-акустического эффекта для НК материалов.

Блок-схема проведения экспериментальных исследований приведена на рис. 1.

Для возбуждения акустических сигналов использовали лазер с модулированной добротностью на неодимовом стекле. Длительность импульса излучения равнялась 15 нс, длина волны 1,06 мкм, мощность < 5 МВт. Энергию излучения измеряли калориметром ИКТ-1М; коаксиальный фотоэлемент ФЭК-9 служил для регистрации временной формы импульса излучения и синхронизации измерительных осциллографов С8-14 и С1-75.

Регистрацию акустических импульсов осуществляли в одних случаях лазерным интерферометром Майкельсона с фотоэлектрическим счетом полос и стабилизацией чувствительности, в других — с помощью пьезопреобразователя.

Для стабилизации чувствительности и активной виброзащиты опорное зеркало интерферометра закреплялось на пьезоподвижке, движение которой управлялось электрическим сигналом со схемы стабилизации. Регистрацию интерферометрической картины (изменение интенсивности излучения, обусловленное движением поверхности образца при выходе на нее упругой волны) осуществляли фотоумножителем ФЭУ-84. Чувствительность интерферометра равнялась 1 нм в полосе частот до 50 МГц.

В случае регистрации упругих волн пьезопреобразователем использовали пьезо-керамический датчик (ПД) марки ЦТС-19 диаметром 5 мм и высотой 100 мм. Датчик работал в режиме генератора тока, то есть нагружался на низкоомную нагрузку

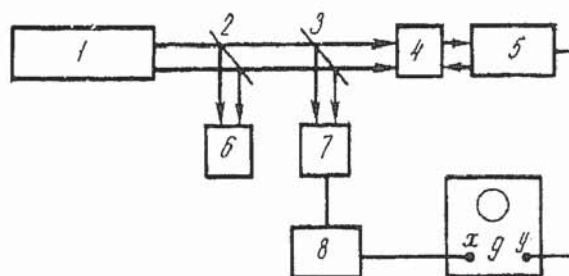


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки для НК: 1 — лазер; 2, 3 — полупрозрачные зеркала; 4 — образец; 5 — интерферометр или пьезодатчик; 6 — калориметр; 7 — фотодиод; 8 — генератор задержки; 9 — осциллограф

$R = 50$ Ом, равную волновой нагрузке коаксиального кабеля. В такой схеме включения и при условии, что длительность регистрируемого акустического импульса меньше времени распространения упругой волны по высоте датчика, пьезопреобразователь работает в режиме поверхностного возбуждения [6], напряжение на нагрузке датчика пропорционально величине давления на границе образец - датчик, а его широкополосность не ограничена резонансной частотой и определяется собственной емкостью датчика и сопротивлением нагрузки. В нашем случае временное разрешение датчика было порядка 3 нс. Акустический контакт на границе образец - датчик достигали за счет прижима датчика через тонкий слой силиконовой смазки.

Для увеличения точности измерения скорости распространения акустических импульсов и их затухания в эксперименте одновременно регистрировались импульс, прошедший один раз через образец, и последующий эхоимпульс, прошедший еще несколько раз через образец. Для этого осциллограф С1-75 включался в режим работы «поочередно», а синхронизация его осуществлялась генератором парных импульсов с временем задержки между ними $t = K2h/c$, где h — толщина образца, c — продольная скорость звука, $K = 1, 2, \dots$ Такая методика регистрации позволяет стробировать при оптимальном выборе пьезоприемника любую пару эхоимпульсов и таким образом увеличить измеряемый интервал времени и эффективную толщину исследуемого образца. Точность измерений при такой методике повышается, во-первых, за счет совмещения начальных элементов фронтов эхоимпульсов на экране осциллографа изменением задержки между парой импульсов синхронизации с погрешностью, определяемой толщиной линии (при развертках 20...100 нс/дел, $t \sim 1-5$ нс), во-вторых, за счет точности измерения интервала времени между стабильными по форме импульсами синхронизации, который равен интервалу времени между эхоимпульсами. Оценка максимальной погрешности наших измерений скорости звука при толщинах образцов ~ 10 мм и регистрации ближайших эхоимпульсов дает следующее значение:

$$\delta c = \delta h + \delta t \sim 0,002 \text{ мм} / 20 \text{ мм} + 5 \text{ нс} / 400 \text{ нс} \sim 0,15\%.$$

Для определения чувствительности оптико-акустического метода были проведены исследования изменения параметров акустических сигналов в зависимости от структуры металлов. Исследования проводились на образцах из меди М1Р0, дюралюминия Д16, железа 0,3 ЖР. Структуру образцов изменяли часовым отжигом при заданной температуре и медленным остыванием вместе с печью. Измерялись плотность, микротвердость и размер зерна образцов.

На рис. 2 приведены зависимости продольной скорости звука (кривая 1) и затухания (кривая 2) акустических импульсов в зависимости от температуры отжига образцов из железа 0,3 ЖР, на кривой 3 представлена зависимость размера зерна.

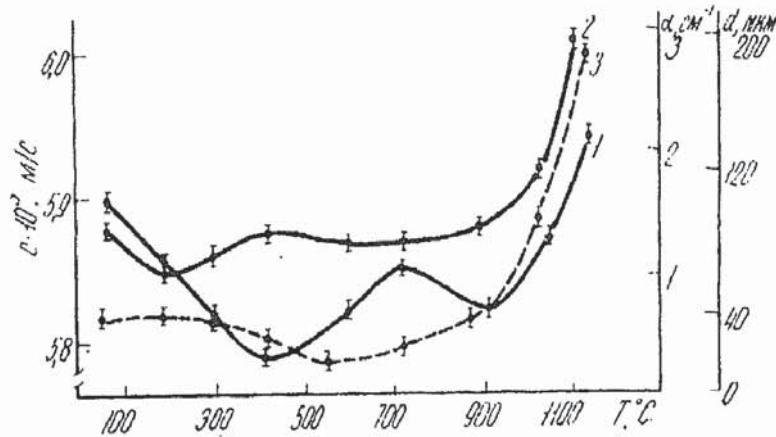


Рис. 2. Зависимости продольной скорости звука (кривая 1), затухания акустических импульсов (кривая 2), размера зерна (кривая 3) образцов железа 0,3 ЖР от температуры отжига.

Аналогичные зависимости для других исследованных металлов качественно схожи с представленными на рис. 2.

Анализ полученных зависимостей позволяет отметить общие, характерные для всех исследованных металлов изменения зависимостей скорости и затухания от структурных изменений, происходящих при отжиге. Во-первых, наличие минимума затухания в конце процесса возврата (для железа $T \sim 150$ °C), что, по-видимому, определяется уменьшением остаточных напряжений и упорядочением дислокационной структуры в результате отжига. Во-вторых, общее для всех металлов наличие минимума продольной скорости звука в области процесса полигонизации, то есть при уменьшении размера зерна (для железа при $T \sim 500$ °C). В-третьих, наличие второго минимума продольной скорости звука в конце процесса первичной рекристаллизации и начале вторичной рекристаллизации (при $T \sim 900$ °C). В-четвертых, увеличение скорости звука и затухания в процессе вторичной рекристаллизации с ростом зерен (для железа при $T > 900$ °C).

Таким образом, характерные изменения параметров распространения акустических импульсов хорошо коррелируют с изменениями структуры металлов, происходящими при отжиге. Анализ изменения фурье-спектров позволит получить частотную зависимость затухания и дисперсию скорости звука в широком диапазоне спектра, так как основная гармоника спектра, возбуждаемого лазерным излучением акустического импульса, порядка 5 МГц, а верхняя граница спектра ~ 50 МГц [3]. Подобный анализ позволит также сопоставить указанные выше зависимости с изменениями микроструктуры исследуемых материалов [7, 8].

Измерения скорости и затухания коротких акустических импульсов, возбуждаемых лазерным излучением, были проведены также на образцах титанвольфрамового сплава, вырезанных из различных мест массивной заготовки (рис. 3). Кривые 1, 2 соответствуют изменению скорости звука по длине образца для двух ортогональных плоскостей, в которых проводились измерения. Кривые 3, 4 представляют собой соответствующие зависимости затухания амплитуды акустических импульсов. Измерения проводили по вышеописанной методике. Погрешность измерений скорости для данных образцов не превышала 0,1 %.

Наблюдается существенное различие этих зависимостей для образцов, вырезанных из различных мест заготовки. Этот факт определяется спецификой технологии получения заготовок и ее неравномерным влиянием на структуру и свойства сплава в различных областях заготовки. Измерения, проведенные стандартным ультразвуковым дефектоскопом на частоте ~ 2 МГц, не позволили выявить обнаруженных особенностей.

Серия экспериментов была направлена на исследование возможностей оптико-акустического — импульсного метода НК материалов и элементов конструкций.

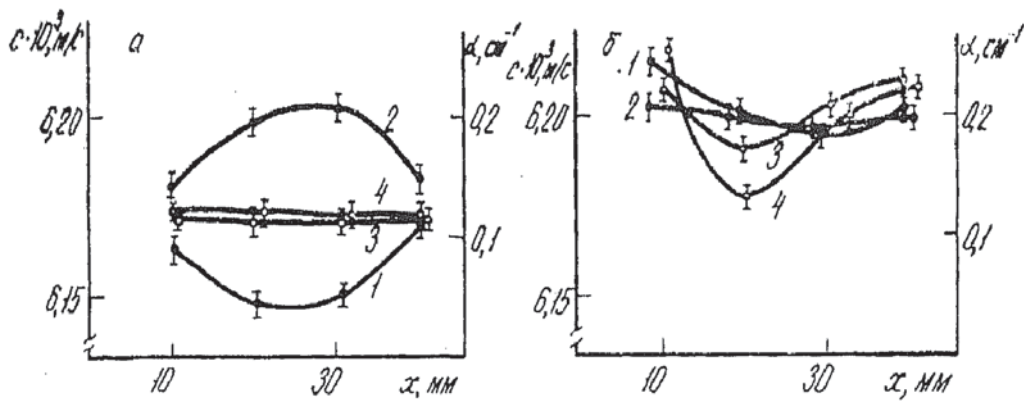


Рис. 3. Изменения скорости (кривые 1, 2) и затухания (кривые 3, 4) акустических импульсов в образцах титанвольфрамового сплава по длине образца, для двух ортогональных плоскостей измерения: а — образец вырезан вблизи края заготовки; б — образец вырезан из центральной области заготовки

Были проведены исследования акустических свойств турбинной лопатки из титанового сплава, подвергшейся продолжительному циклическому нагружению. Турбинная лопатка имела визуально наблюдаемую трещину в области максимальных напряжений, возникающих при циклическом нагружении. Возбуждение и регистрация акустических сигналов проводились вдоль оси лопатки, ниже регистрируемого микроскопом конца трещины. Регистрация акустических сигналов осуществлялась двумя способами — пьезодатчиками и интерферометром. На рис. 4 приведена характерная интерферограмма смещения тыльной поверхности образца и указаны эхосигналы, соответствующие реверберации упругих импульсов в образце. На рис. 5, а сопоставлены зависимости скорости смещения поверхности от расстояния до плоскости трещины (точка O), полученные дифференцированием интерферограммы (кривая 1) и измеренные пьезодатчиком (кривая 2), воспроизводящим профиль давления на границе образец — датчик.

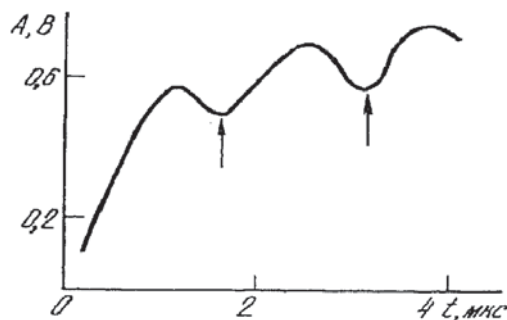


Рис. 4. Характерная интерферограмма смещения тыльной поверхности образца. (Стрелками указаны эхоимпульсы, соответствующие реверберации акустического сигнала)

Очевидно качественное совпадение приведенных зависимостей. Меньшее и более плавное изменение сигналов с пьезодатчика в районе трещины (точка O) обусловлено усреднением сигнала поверхностью датчика (диаметр 5 мм), тогда как интерферометрия проводится практически в точке (диаметр 0,2 мм).

Изменения зависимости скорости смещения поверхности в плоскости трещины обусловлены изменением микроструктуры материала в области максимальных напряжений, возникающих в условиях циклического нагружения, в которой и происходит зарождение трещины. При этом следует отметить, что при оптико-акустическом методе чувстви-

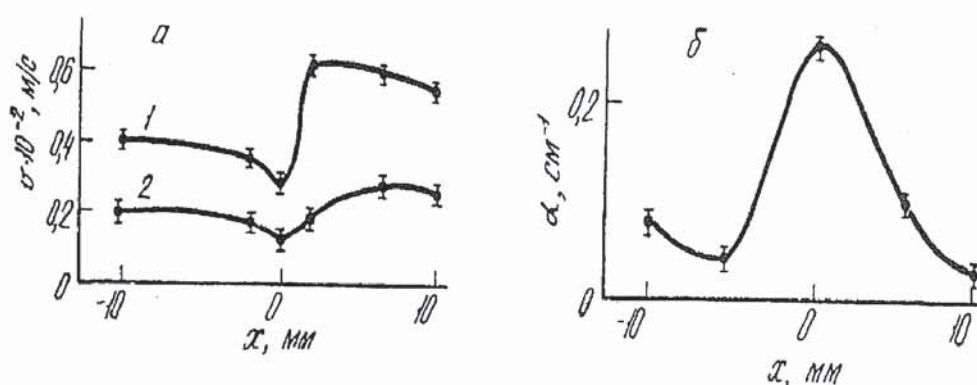


Рис. 5. Зависимости скорости смещения поверхности (а) от расстояния до плоскости трещины («0») (1 — зависимость, полученная дифференцированием интерферограммы, 2 — зависимость, измеренная пьезодатчиком) и затухания акустических сигналов (б) от расстояния до плоскости трещины

тельность к изменению структуры материала обусловлена как изменением эффективности генерации акустического импульса в зависимости от структуры поверхностного слоя (рис. 5, а), так и влиянием изменений структуры объема на процесс распространения эхоимпульсов. На рис. 5, б представлена зависимость затухания акустических сигналов от расстояния плоскости трещины, полученная из анализа эхоимпульсов, регистрируемых интерферометром.

Эти эксперименты продемонстрировали не только высокую чувствительность импульсного оптико-акустического метода к структурным изменениям материалов, но и возможность создания надежного бесконтактного метода прогнозирования прочностных характеристик различных элементов конструкций, работающих в условиях интенсивных продолжительных нагрузок.

Исследования чувствительности оптико-акустического метода к обнаружению единичных несплошностей в материалах были проведены на образце из алюминиевого сплава. Несплошности моделировали цилиндрическими отверстиями разного диаметра. Регистрацию осуществляли пьезокерамическим датчиком, работающим в режиме короткого замыкания. На рис. 6 приведены схема эксперимента и временные профили сигналов пьезоприемника. Расстояние между моделируемыми дефектами было более 1 мм, а размер зоны возбуждения равнялся 4 мм, что обеспечивало возбуждение плоской акустической волны, следовательно, влияние дифракционных эффектов от соседних отверстий было ощутимо лишь при интервалах времени, больших, чем 10 мкс, тогда как влияние дефекта проявляется уже при интервалах времени $< 0,5$ мкс. Изменение формы акустического сигнала во временном интервале 0...1,5 мкс показывает, что с легкостью обнаруживаются отверстия диаметром менее 0,8 мм и, более того, формы сигналов значительно различаются для отверстий диаметрами, отличающимися на 0,1—0,2 мм. Представленные результаты весьма наглядно демонстрируют высокую разрешающую способность оптико-акустического метода дефектоскопии.

Известны сложности применения ультразвуковых методов исследования сильнопоглощающих (керамики, композиты, полимеры) материалов, что особенно значительно проявляется при измерениях в мегагерцевом диапазоне частот. Оптико-акустический метод и в данном случае имеет существенные преимущества. Это связано как с возможностью легко повышать амплитуду возбуждаемых лазером акустических сигналов, так и с весьма широким частотным спектром возбуждаемого таким способом акустического импульса. В проводимых нами экспериментах при длительности акустическо-

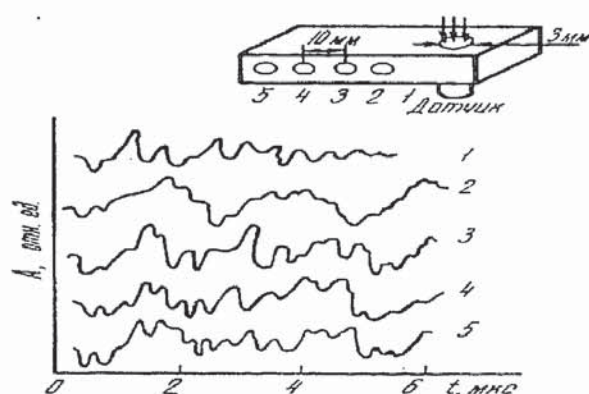


Рис. 6. Схема эксперимента и временные профили сигналов пьезодатчика: 1 — сплошной образец; 2 — диаметр отверстия 800 мкм; 3 — 950 мкм; 4 — 1080 мкм; 5 — 1450 мкм

го сигнала 0,1 мкс основная гармоника спектра равнялась 5 МГц, а высокочастотная граница спектра была порядка 50 МГц.

Были проведены измерения зависимости скорости звука и затухания на образцах железа с различной пористостью (рис. 7). Регистрацию акустических сигналов осуществляли пьезокерамическим приемником с одновременной регистрацией первого прошедшего импульса и эхоимпульса, прошедшего две толщины образца. Толщина образцов равнялась 10 мм и измерений традиционными у. з. методами скорости и затухания на частоте 2 МГц уже на образцах плотностью $0,16 \text{ г/см}^3$ реализовать практически не удалось из-за сильного затухания звука на этих частотах.

В качестве примера исследования сильнопоглощающих материалов приведем измерения на образце из фторопласта. Для исследований был взят стандартный для испытаний на маятниковом копре призматический образец с надрезом, подвергшийся разрушению. Сечение образца 15×15 мм. На рис. 8 приведены зависимости скорости распространения и затухания акустических импульсов от расстояния до сечения разрушения. При этом измерения проводились в двух перпендикулярных плоскостях.

Вблизи сечения разрушения наблюдаются существенные изменения как скорости, так и затухания, при этом характер их изменения различен для двух направлений измерений. Изменение параметров распространения акустических импульсов вдоль направления предварительного надреза (плоскость 1) характеризуется уменьшением затухания и увеличением скорости вблизи сечения разрушения. В перпендикулярном направлении (плоскость 2) изменение скорости и затухания в области разрушения носит противоположный характер. Это определяется изменением условий распространения акустических импульсов в зоне разрушения, вдоль плоскостей микроразрушений, либо перпендикулярно этим плоскостям. Различие скоростей звука в двух плоскостях вдали от зоны разрушения определяется анизотропией свойств полимера. Приведенный пример очень наглядно демонстрирует преимущество оптико-акустической методики диагностики сильнопоглощающих сред, так как известно, что традиционные у. з. исследования таких сред в мегагерцевом диапазоне спектра могут быть реализованы лишь на образцах с толщинами, не превышающими 1 мм, потому что затухание ультразвука на частотах 10 МГц составляет сотни дБ/см. Это, естественно, сказывается на точности и чувствительности контроля [9].

Таким образом, оптико-акустический метод дает возможность не только измерить скорость и затухание звука в сильнопоглощающих материалах, но и с высокой чувствительностью проводить дефектоскопию изделий из таких материалов.

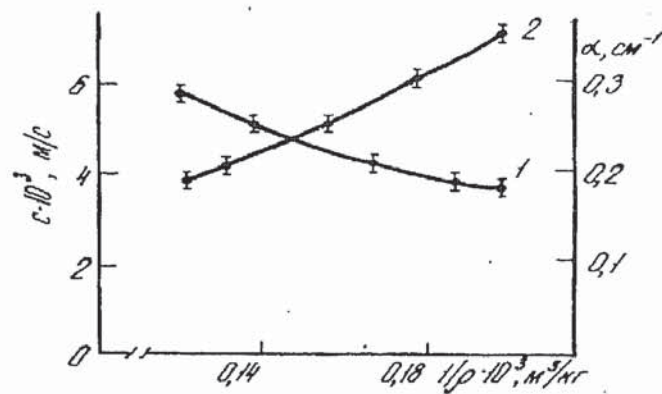


Рис. 7. Зависимости скорости звука (1) и затухания (2) в образцах железа с различной пористостью

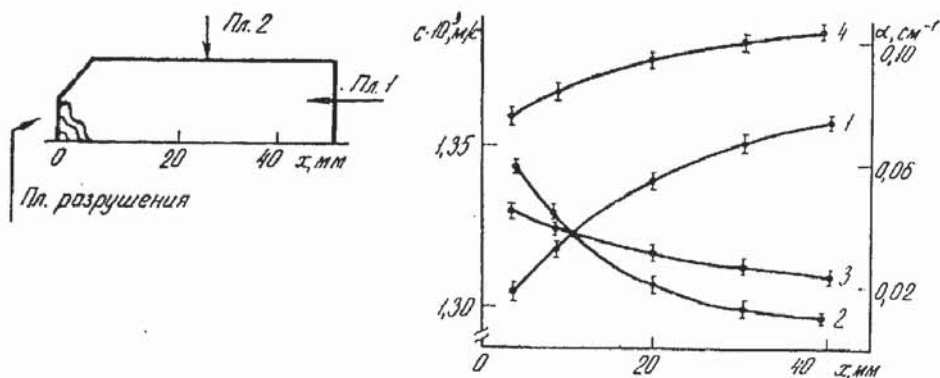


Рис. 8. Зависимости скорости распространения и затухания акустических импульсов от расстояния до сечения разрушения: 1, 2 — зависимости скорости и затухания в плоскости 1; 3, 4 — зависимости скорости и затухания в плоскости 2

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Scruby C. V. Some applications of laser ultrasound. — *Ultrasonics*, 1989, 27. — № 4. P.p. 195—208.
2. Edwards C., Taylor G. S., Palmer S. B. Ultrasonic generation with a pulsed TEA CO₂ laser. — *J. Phys. Appl. Phys.*, 1989, 22. — P.p. 1266—1270.
3. Бондаренко А. Н. Лазерные методы возбуждения и регистрации акустических сигналов. — М.: Изд-во стандартов, 1989. — 150 с.
4. Лямшев Л. М. Оптико-акустические источники звука. — *Успехи физич. наук*, 1981, 35. — Вып. 4. — С. 637—669.
5. Судьенков Ю. В., Филиппов Н. М., Воробьев Б. Ф., Недбай А. И. Исследование механизмов взаимодействия мощного лазерного излучения с металлами. — *Письма ЖТФ*, 1983, 9. — Вып. 7. — С. 395—399.
6. Graham R. A., Nelson F. W., Benedicht W. B. Piezoelectric current from shock loaded quartz a submicrosecond stress gauge. — *J. Appl. Phys.*, 1965, 36. — № 4. — P.p. 1775—1789.
7. Мэзон У. Физическая акустика. Т. IV-A. — М.: Мир, 1969. — 345 с.
8. Рохлин Л. Л. Акустические свойства легких сплавов. — М.: Наука, 1974. — 138 с.
9. Недбай А. И., Федоровский Г. Д. Импульсно-интерференционный метод измерения скорости ультразвука. — *Дефектоскопии*, 1985. — № 1. — С. 49—53.