

УДК 534.16

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ ОБЪЕКТОВ С НЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРОЙ*А. Р. БАЕВ¹, А. Л. МАЙОРОВ¹, Е. П. БАБУК², Г. Е. КОНОВАЛОВ¹*¹Институт прикладной физики НАН Беларуси²ОАО «МАЗ» – управляющая компания холдинга «БЕЛАВТОМАЗ»

Минск, Беларусь

UDC 534.16

DEVELOPMENT OF METHODS AND MEANS OF ULTRASONIC CONTROL OF OBJECTS WITH INHOMOGENEOUS STRUCTURE*A. R. BAEV, A. L. MAYOROV, E. P. BABUK, G. E. KONOVALOV*

Аннотация. Представлены результаты исследований и разработки новых методов и средств структуроскопии и дефектоскопии объектов машиностроительной промышленности, имеющих неоднородную структуру, включая изделия с неразъемными соединениями, с поверхностно упрочненными слоями стальных изделий, а также чугуны. Повышение эффективности неразрушающего контроля указанных объектов достигается за счет использования выявленных эффектов распространения и рассеяния подповерхностных и поверхностных волн на объектах со слоистой структурой, а также применения разработанных преобразователей.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, упрочненный слой, поверхностные волны, дефекты сцепления, чугуны.

Abstract. The results of research and development of new methods and means of structuroscopy and flaw detection of objects of the machine-building industry with a heterogeneous structure, including products with permanent joints, with surface-hardened layers of steel products, as well as cast iron are presented. Improving the efficiency of non-destructive testing of these objects is achieved through the use of the revealed effects of propagation and scattering of subsurface and surface waves on objects with a layered structure, as well as the use of developed transducers.

Key words: ultrasonic evaluation, cast iron, case hardened layer, be-metals, waves scattering, subsurface and surface waves, sound velocity, defects.

Представлены результаты исследований и разработок, выполненные в ИПФ НАН Беларуси в лаборатории ультразвуковых методов диагностики и позволившие создать эффективные методы и средства контроля указанного класса объектов, внедренные в производство на десятках предприятий как Беларуси, так и за рубежом.

Особенности структуроскопии чугунов. Использование акустического метода для диагностики физико-механических свойств литья чугунов (ЧГ) основано преимущественно на наличии взаимосвязи между скоростью C_{LT} продольной L или (что реже) поперечной T волны и модулем Юнга E металла, плотностью ρ и коэффициентом Пуассона ν : $C_{LT} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} f_{LT}(\nu)$.

Последняя может изменяться практически в 2 раза преимущественно в зависимости от содержания в нем включений графита и их формы. Используя данные [1], показано, что причиной этого являются эффекты рассеяния УЗК на ансамбле включений шаровидного и пластинчатого графита, сжимаемость которого в $\sim 40\text{--}50$ раз меньше металла основы. На основе проведенных исследований разработан прибор (рис. 1), нашедший широкое применение для отбраковки высокопрочного чугуна (ВЧ) от серого (СЧ) с «промежуточной фазой» по данным корреляции между скоростью УЗК и прочностными свойствами ЧГ.

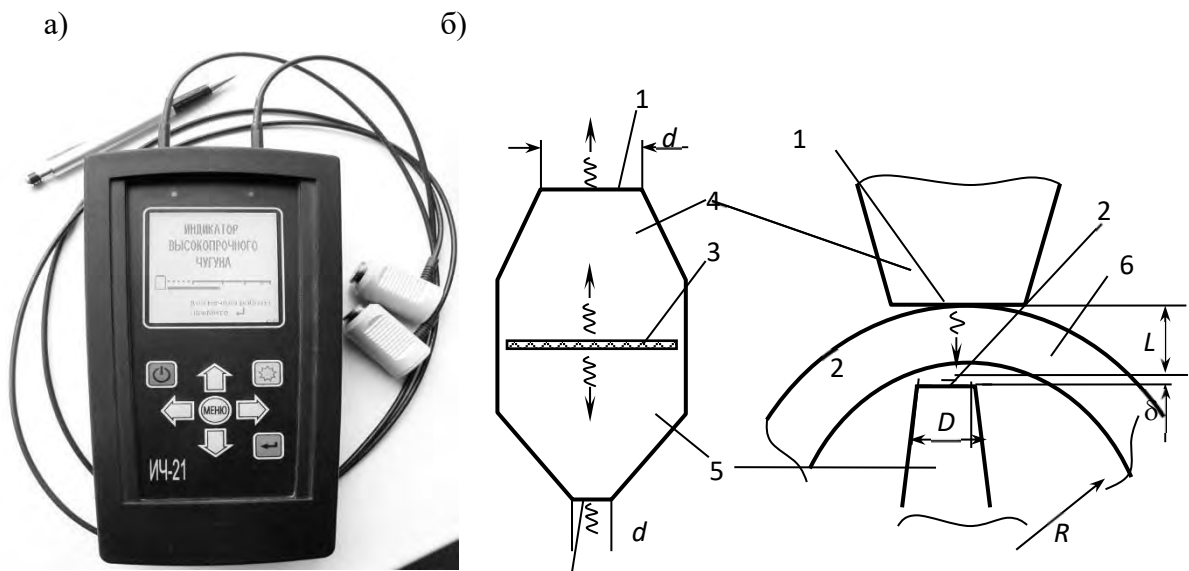


Рис. 1. Прибор ИЧ для структуроскопии чугунов и пояснение к одной из конструкций ПЭП и их работе: 1, 2 – поверхности излучения и приема УЗК; 3 – пьезопластина; 4, 5 – волноводы ПЭП; 6 – объект

В электронном блоке таких приборов заложена программа нивелирования влияния состояния акустического контакта на точность измерений, проводимых в теновом режиме и режиме эхо, зависящего от шероховатости и радиуса кривизны поверхности. Размеры акустической базы прозвучивания ($0,7\text{--}30$ см), соответственно с которыми выбраны апертуры ПЭП, позволяющие нивелировать «волноводный» шумовой фон.

Выполненные в последнее время совместно с ЦЗЛ Минского автомобильного завода исследования позволили разработать и внедрить методику отбраковки чугуна марки СЧ20 от СЧ15 и 25, в основу которой положена корреляционная зависимость C_L от твердости (рис. 2). Подобный предварительный результат был получен и при исследовании образцов марки КВЧ35. Для повышения эффективности контроля ЧГ были изучены возможности использования магнитного метода в качестве дополнительного. Он реализуется путем измерения остаточного поля H_{OC} после отрыва магнита от поверхности образца. Установлена высокая эффективность использования сочетания двух указанных методов контроля не только для определения

марки чугуна (ВЧ50), но и (что весьма важно) оценки их твердости B_r , зависящей от содержания перлитной фазы. С увеличением же последней в диапазоне $q_{II} = 20 \dots 80$ % среднее значение H_{OC} возрастает практически

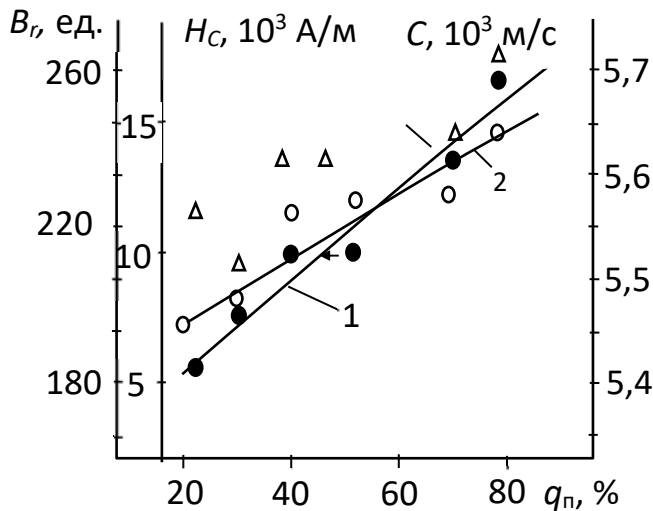


Рис. 2. Зависимости остаточного магнитного поля (1, о), твердости по Бринеллю (2, ●) и скорости УЗК (Δ) в чугуне ВЧ50 от содержания перлита

в ~ 3 раза, а B_r — в 1,3–1,4 раза. Изменение же C_L близко к погрешности измерений. Для повышения эффективности контроля свойств ЧГ предложено использовать обнаруженный эффект рассеяния возбуждаемой ПАВ, реализованный с помощью раздельно совмещенного ПЭП. Установлено, что усредненная амплитуда A^* акустического шума, вызванного рассеянием поверхностной волны на включениях графита, существенно зависит от их формы и эффективного размера. Так, например, величина A^* , измеренная на образцах СЧ20

более чем на порядок превышает полученную на образцах ВЧ50. Эффективность такого метода определяется преимущественно рабочей частотой волны и углами излучения-приема УЗК.

Контроль глубины упрочненного поверхностного слоя (УПС). Задача определения глубины h упрочнения изделий ТВЧ-закалкой, термохимической обработкой и др., а также восстановления твердости по глубине УПС решается на основе использования данных о скорости поверхностной волны C_R или частотной зависимости $C_R(f)$. При этом максимальное изменение величины $C_R(h)$ не превышает 2...3 %, что требует измерения времени прохождения сигнала на заданной базе L с точностью $\sim 2 \dots 3$ нс и реализуется с использованием разработанных авторами конструкций малоапертурных ПЭП, с рабочей поверхностью $S \sim 0,1$ мм² [2]. Измерение же C_R проводится на основе анализа корреляционной функции между двумя подобными сигналами, поступающими на приемные ПЭП от источника УЗК. Созданное программное обеспечение предполагает применение «компенсационного метода» для отстройки от ошибок, связанных с изменением акустического контакта, а также использование при обработке спектральных характеристик принимаемого сигнала дисперсионной зависимости $C(f)$, что позволяет исключить влияние свойств обезуглероженного слоя, а также ряда случайных факторов, обусловленных контактными явлениями, на измерения. Таким образом, можно определять глубину упрочненного ТВЧ-закалкой, цементированием, лазерным

отжигом поверхностного слоя среднеуглеродистых сталей с погрешностью не более 10...15 % и менее в диапазоне измеряемых толщин слоя от 0,3 до 5...6 мм. Электронный блок универсален, а конструкция преобразователей (излучателя и приемников УЗК) и рабочая частота определяются геометрией поверхности изделия, возможным диапазоном изменения глубины УПС. Разработанные устройства для контроля УПС металлоизделий различной конфигурации поставлены на ряд предприятий (Беларусь, Россия, Южная Корея) и перспективны для определения микроповрежденности металла, наклепа, накатки, ржавчины и др.

Совершенствование контроля качества сцепления материалов. В основу создаваемых в ИПФ НАН Беларуси акустических методов и средств контроля сцепления различных материалов, получаемых при сварке, склейке, пайке, при газопламенном нанесении порошковых материалов, положены выявленные закономерности формирования акустических полей: подповерхностных продольных и поперечных волн, возбуждаемых при падении УЗК на объект под первым β_1 или вторым β_2 критическими углами, при наличии и отсутствии акустической нагрузки ($\beta_i = \arcsin(C_2/C_1)$, где $C_1 = C_L$, а $C_2 = C_T$), рассеянных при пересечении акустическим пучком неоднородной границы соединяемых материалов.

Метод и устройство контроля поршней двигателей внутреннего сгорания грузовых автомобилей на качество сцепления нирезистовой вставки (в виде диска) с телом поршня. В основу разработки положен принцип зондирования границы сцепления нирезистовой вставки с телом поршня подповерхностной вертикально поляризованной поперечной волной [3, 4]. Проведенные исследования (рис. 3) показали принципиальную возможность использования таких волн для обнаружения подповерхностных (плоских) дефектов с малой отражающей способностью, и существенно большую чувствительность, чем при применении головных волн. Это достигается, прежде всего, за счет ориентации вектора смещений $\vec{\xi}$ сдвиговой волны в направлении, близком к боковой плоскости сцепления вставки поршня с его телом, а также за счет меньшей (~ 2 раза) длины.

Программно-вычислительный комплекс установки позволяет определять количество дефектов, их общую площадь на каждой границе контакта вставки с основой поршня, а также взаимную площадь их перекрытия. При этом исключается выход на технологическую линию чистовой обработки дефектных изделий. Разработанный метод и установки контроля поршней двигателей внутреннего сгорания впервые внедрены на крупных моторостроительных и др. предприятиях Беларуси и России (Минск, Ярославль, Тутаев, Кострома, Набережные Челны). Последняя версия разработки не имеет аналогов в мире и может быть использована для интенсивного контроля поршней 14 видов.

Эффекты трансформации и рассеяния УЗК при контроле биметаллических соединений и сварки. При проведении исследований

распространения подповерхностных волн в материалах с низким акустическим импедансом R_2 и «скользящей акустической нагрузкой» (АН) с импедансом $R_1 \gg R_2$ и скоростью объемных волн $C_1 > C_2$, впервые обнаружен эффект распространения слабо затухающей поверхностной волны, подобной волне Стоунли (BC), имеющей скорость $C_{St} \approx C_2$ и глубину локализации в поверхностном слое АН $\delta < 0,5\lambda$ [5].

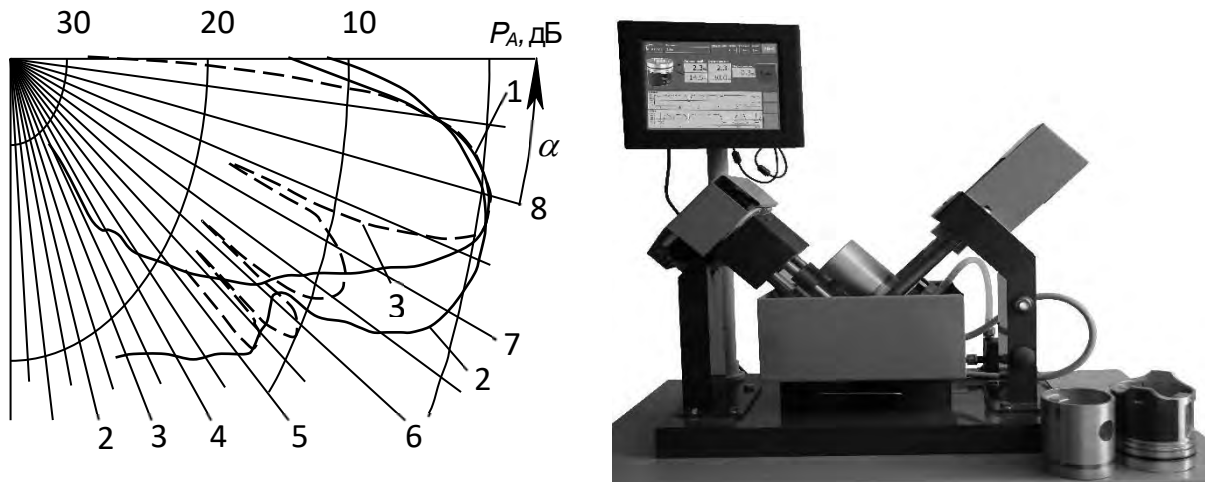


Рис. 3. Поле излучения источника подповерхностной поперечной (1) и продольной (2) волны в стали и установка для контроля поршней двигателей автомобилей ($f = 1,8$ МГц), расчетная диаграмма направленности для поперечной подповерхностной волны (3); размер излучателя $2a = 18$ мм, $f = 1,8$ МГц

Более глубокое изучение особенностей возбуждения и рассеяния таких волн в области контакта АН с основой позволили: существенно повысить дальность действия подповерхностных волн, увеличив угол ввода УЗК в объекты с низкой скоростью УЗК; установить основную причину возникновения акустического шума, ограничивающего использование современных раздельно-совмещенных ПЭП и предложить принципы снижения шума, позволившие увеличить чувствительность измерений. Разработанные конструкции ПЭП выполнены с локальной иммерсионной ванной и управляемой разделительной перегородкой для создания опорного сигнала, что существенно расширило возможности контроля сцепления тонких защитных покрытий объектов с разной кривизной поверхности. Такие конструкции ПЭП впервые внедрены на ряде предприятий автомобильной и нефтеперерабатывающей промышленности. В частности, для контроля оловянно-свинцовых покрытий подшипников скольжения толщиной до $h \geq 0,2 \dots 0,3$ мм и радиусом $R \geq 2,5$ см без притирки рабочей поверхности ПЭП к поверхности подшипников не только со стальной, но латунной и чугуновой основой. Причем наличие пор в основе (чугуне и латуни) вблизи границы, создающих ложные отражения, не оказывают существенного влияния на достоверность и производительность контроля. Такие устройства применены для контроля напыленных покрытий рессор

автомобилей, сварки заднего моста грузовых автомобилей, заменив рентгеновский контроль и др. При этом имеются возможности механизировать и автоматизировать трудоемкие процессы контроля.

Метод оптимизации апертур и фаз мнимых источников УЗК, рассеянных неоднородной границей. Этот метод, предложенный в [4], предназначен как для выявления дефектов сцепления (адгезии) материалов со слабой отражающей способностью, включая дефекты слипания, так и для определения эффективной площади дефекта. Он реализуется именно в процессе перемещения падающего на границу сред акустического пучка через дефектную область, когда происходит интерференция акустических лучей, рассеянных дефектной S_D и бездефектной S_{DN} частью поверхности. Особенность метода состоит в выборе углов падения УЗК на границу сред α и их приема φ , при которых фазовый сдвиг φ между рассеянными от поверхностей S_D и S_{DN} волнами максимален; прием сигнала же производится в окрестности минимумов или максимумов 1-го или 2-го порядка диаграммы направленности. Развитие указанного подхода позволило впервые предложить прямой метод и средства ультразвукового контроля качества сварки газовых (полиэтиленовых) трубопроводов низкого и среднего давления для выявления наиболее опасных дефектов слипания материалов.

Работа выполнена при частичной поддержке БРФФИ, проект T19-136 от 02.05.2019.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Аббакумов, К. Е.** Методы и аппаратура ультразвукового контроля изделий из материалов порошковой металлургии. Контроль микро- и макроструктуры / К. Е. Аббакумов, Т. М. Гурьева // Дефектоскопия. – 1993. – № 8. – С. 39–45.
2. Повышение точности измерения временных интервалов при использовании ультразвуковых преобразователей с локализованным акустическим контактом / А. Р. Баев [и др.] // Достижения физики неразрушающего контроля: сб. науч. тр. – Минск, 2011. – С. 118–123.
3. Способ ультразвукового контроля качества склеивания материалов: пат. BY 15036 / А. Р. Баев. – Оpubл. 2012.
4. **Baev, A. R.** New aspects of excitation and propagation of subsurface longitudinal and transverse waves / A. R. Baev, M. V. Asadchaya, G. E. Konovalov // Materials of 10-th European Conf. on NDT. – Moscow, 2010. – P. 240–247.
5. Влияние акустической нагрузки на распространение подповерхностных продольных волн / А. Р. Баев [и др.] // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2014. – № 1. – С. 14–24.

E-mail: baev@iaph.bas-net.by.