

УДК 620.179

Ю. Г. БЕЗЫМЯННЫЙ, О. В. ТАЛКО, Л. О. ТЕСЛЕНКО**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН
ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В ПЛАСТИНАХ С ПОКРЫТИЕМ**

В работе представлены результаты решения задачи анализа возможности выявления дефекта в виде риски или царапины малой глубины, которые находятся под покрытием на поверхности металла. Задача имеет практическое значение при входном контроле лопастей винтов вертолёта. Для её решения был поставлен измерительный эксперимент. В результате его показано, что царапина глубиной 0,4 мм может быть обнаружена при условии использования поверхностных акустических волн, параметры которых адаптированы к особенностям формирования акустического поля в объекте контроля. Критерии выявления дефекта могут быть основаны на энергетическом, временном или частотном принципах.

Ключевые слова: поверхностные акустические волны, слоистые материалы, дефекты, неразрушающий контроль, ультразвуковые методы, импульсное зондирование.

Ю. Г. БЕЗЫМЯННИЙ, О. В. ТАЛКО, Л. О. ТЕСЛЕНКО**ВИКОРИСТАННЯ ПОВЕРХНЕВИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ
ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ У ПЛАСТИНАХ З ПОКРИТТЯМ**

В роботі представлені результати рішення задачі аналізу можливості виявлення дефекту у вигляді риски або подряпини малої глибини, які знаходяться під покриттям на поверхні металу. Задача має практичне значення під час вхідного контролю лопатей гвинтів гелікоптера. З метою її вирішення здійснено вимірювальний експеримент. Показано, що подряпина глибиною 0,4 мм може бути виявлена за умови використання поверхневих акустичних хвиль, параметри яких адаптовані до особливостей формування акустичного поля в об'єкті контролю. Критерії виявлення дефекту можуть базуватися на енергетичному, часовому або частотному принципах.

Ключові слова: поверхневі акустичні хвилі, шаруваті матеріали, дефекти, неруйнівний контроль, ультразвукові методи, імпульсне зондування.

YU. G. BEZIMYANNIY, O. V. TALKO, L. O. TESLENKO**THE USE OF SURFACE ACOUSTIC WAVES FOR DEFECT DETECTION IN COATED PLATES**

The work represents the results of solving the task to analysis possibilities of detecting a defect in the form of a line or a scratch of little depth, which are situated under the coating on metal surface. The task has a practical importance at input control of a helicopter screw blade. A measuring experiment was performed to solve the task. It has been shown that a scratch of 0.4 mm depth can be detected subject to the use of surface acoustic waves, parameters of which are adapted to the peculiarities of acoustic field formation in the object under control. Criteria of defect detection can be based on energy, time or frequency principles. The further development of the work implies the conduction of the experiment directly on the spar. In this case a special attention should be paid to providing the possibility of sounding an item with surface acoustic waves in the conditions of a real coating. Practical realization of the developed method on a real item implies the creation of surface acoustic wave sensors with an input angle for certain material of the item, the choice and the realization of the most effective diagnostic parameter.

Keywords: surface acoustic waves, layered materials, defects, non-destructive testing, ultrasonic methods, pulse sounding.

Введение. Поверхностные акустические волны (ПАВ) были изучены и рекомендованы к применению ещё в середине прошлого века [1, 2]. Однако их широкое использование в неразрушающем контроле слоистых изделий не состоялось из-за сложности постановки и обработки результатов эксперимента, а также отсутствия промышленно изготавливаемых датчиков возбуждения-приёма волн такого типа [3]. В настоящее время, в связи с повышением научно-технического уровня обеспечения акустического эксперимента, снова наблюдается интерес к практическому применению волн Релея, Лемба, Лява при решении различных задач выявления локальных изменений состояния материалов [4–7]. В этих работах отмечается, что эффективность использования ПАВ при контроле изменения состояния материала связана с точностью постановки измерительного эксперимента и обработки его результатов.

При входном контроле лопастей несущего винта вертолёта на ремонтном заводе возникает задача выявления в лонжероне на поверхности металлического слоя под неметаллическим покрытием одиночных дефектов в виде рисков или царапин глубиной более 0,25–0,3 мм [8]. Эти дефекты классифицируют как механические. Они

недопустимы для дальнейшей эксплуатации изделия, требуют выявления и устранения. Рекомендации по выявлению таких дефектов при наличии покрытий отсутствуют.

Литературные данные [1] позволяют предположить, что для решения указанной задачи могут быть использованы ПАВ, однако в [7] предупреждают, что на практике не всегда подтверждаются рекомендации литературы.

Лопать вертолёта – дорогостоящее изделие, поэтому изготовление из неё образцов для проведения поисковых экспериментов нецелесообразно. Проверку возможности решения рассматриваемой задачи можно провести с помощью измерительного эксперимента на модели реального объекта, позволяющей реализовать и учесть особенности формирования в нём акустического поля применяемой упругой волны.

Цель исследования: экспериментально, посредством ультразвукового неразрушающего контроля, показать возможность выявления одиночных дефектов в виде рисков или царапин глубиной более 0,3 мм на поверхности металлического слоя под неметаллическим покрытием.

Для достижения поставленной цели применяли методологию обоснованного синтеза и оптимизации методов контроля [9], которая, в нашем случае, заключалась в решении следующих последовательных операций: анализ акустических особенностей объекта в условиях задачи контроля и выбор его адекватной физической модели; разработка акустической модели формирования ультразвукового поля в объекте контроля и требований к постановке эксперимента; разработка методики и проведение измерительного эксперимента; анализ полученных результатов; выводы.

Акустические особенности объекта контроля и его физическая модель. Для анализа был взят лонжерон несущего винта вертолёта Ми-8 [8]. Поперечное сечение лонжерона с вскрытым для визуального наблюдения и контроля дефектом в виде риски или царапины показаны на рис. 1.

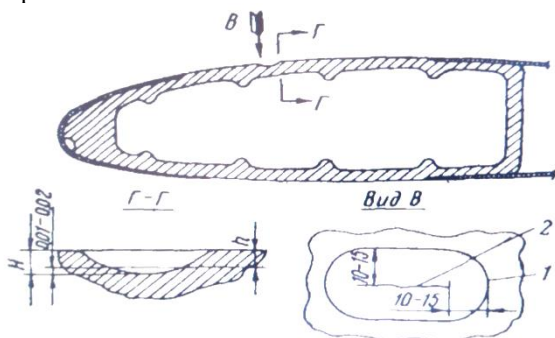


Рис. 1 – Вскрытая риска или царапина на поверхности металлической части лонжерона несущего винта вертолёта Ми-8 [8]

Как видно из рисунка, в месте возможного наличия дефекта лонжерон состоит из основы в виде слоя, наружная поверхность которого имеет незначительную кривизну, а внутренняя – усилена рёбрами жёсткости. На наружную поверхность слоя нанесен тонкий слой покрытия. Основа изготовлена из сплава алюминия, а покрытие – из резиноподобного материала.

Проблемами при выявлении указанных дефектов стандартными ультразвуковыми методами [10] являются: 1 – малые отражающая и рассеивающая способности дефекта, не позволяющие использовать объёмные упругие волны; 2 – наличие рёбер жёсткости, усложняющих акустическое поле в основе; 3, 4 – наличие покрытия, приводящее к изменению акустического поля за счёт появления системы основа-покрытие (3) и усложняющего доступ упругой волны к дефекту (4).

Для определения возможности прозвучивания основы лонжерона при наличии покрытия был поставлен пробный эксперимент, заключающийся в прозвучивании со стороны покрытия реального лонжерона с помощью ультразвукового толщиномера. В результате эксперимента на частоте 5 МГц был получен полноценный эхо-сигнал от внутренней поверхности лонжерона, свидетельствующий об акустической прозрачности покрытия. Поэтому, в соответствии с рекомендациями [1, 2], есть основания предполагать, что все указанные проблемы могут

быть решены путём использования ПАВ, распространяющихся вдоль основы лонжерона вблизи её внешней поверхности.

В качестве модели основы лонжерона был взят образец для исследований в виде элемента листа ($180 \times 19 \times 5$ мм) из используемого в самолётостроении алюминиевого сплава Д16Т. На поверхности образца была нанесена риска глубиной $h_p = 0,4$ мм. (рис. 2) Моделями покрытия служили: липкая лента толщиной 0,04 или изоляционная лента – 0,2 мм, наклеенные на образец со стороны покрытия.



Рис. 2 – Модель основы лонжерона с риской

Выбранный образец позволяет решать поставленную задачу в два этапа: первый – оптимизация вида и параметров акустического поля при оценке возможности выявления риски на его поверхности; второй – оценка возможности выявления риски при наличии покрытия.

Акустическая модель эксперимента и требования к его постановке. Использование ПАВ Рэлея позволяет сфокусировать энергию акустического поля вблизи поверхности изделия на глубине длины волны (λ_R), тем самым увеличивая отражающую (рассеивающую) способности риски пропорционально волновому размеру её глубины [2], которые, в нашем случае (скорость распространения волн Рэлея $c_R = 2,9$ км/с, $h_p = 0,4$ мм), достигнут максимума уже на частоте ≈ 3 МГц. Дальнейшее увеличение частоты приведёт к росту затухания упругой волны, что нежелательно при прохождении неметаллического покрытия [10]. Для формирования радиоимпульса на этой частоте его длительность должна быть не менее 2 мкс [11]. Дальнейшее увеличение длительности из-за реверберационных явлений может привести к усложнению структуры акустического поля в пластине [12], приведя к возможному маскированию дефекта.

ПАВ Рэлея возбуждается на поверхности среды, если из другой, граничащей с ней среды, на эту поверхность падает продольная упругая волна под углом, несколько большим второго критического, который, в случае падения из оргстекла на дуралюмин составляет $70,6^\circ$ [10]. Поскольку состав дуралюмина может варьироваться, то и значение угла требует подстройки под реальный материал.

Таким образом, согласно рекомендациям литературы, акустический тракт для проведения эксперимента должен включать в себя электроакустические преобразователи с перестраиваемым углом ввода-снятия упругой волны $\approx 70,6^\circ$. Зондирование образца следует проводить радиоимпульсом с тональным заполнением на частоте ≈ 3 МГц и длительностью ≈ 2 мкс при необходимости подстройки указанных параметров. Выбор критериев выявления дефекта и их оптимизация связаны с возможностями подстройки параметров зондирования

и обработки сигнала в приёмном тракте. Желательно иметь возможности такой обработки по временному, энергетическому и частотному принципам.

Аппаратура, методика, эксперимент. Приведенным требованиям удовлетворяет разработанный нами аппаратный комплекс для прецизионных акустических измерений [13]. В его состав входят электроакустические преобразователи с переменным углом ввода [14] (рис. 3).



Рис. 3 – Электроакустические преобразователи с переменным углом ввода

Для получения ПАВ Рэлея преобразователи разместили на бездефектной части рабочей поверхности образца на расстоянии $l=4$ мм между их торцами и провели настройку углов ввода таким образом, чтобы отсутствовали другие типы волн (рис. 4 а). Это позволило отстроиться от паразитных сигналов и их интерференционного взаимодействия.

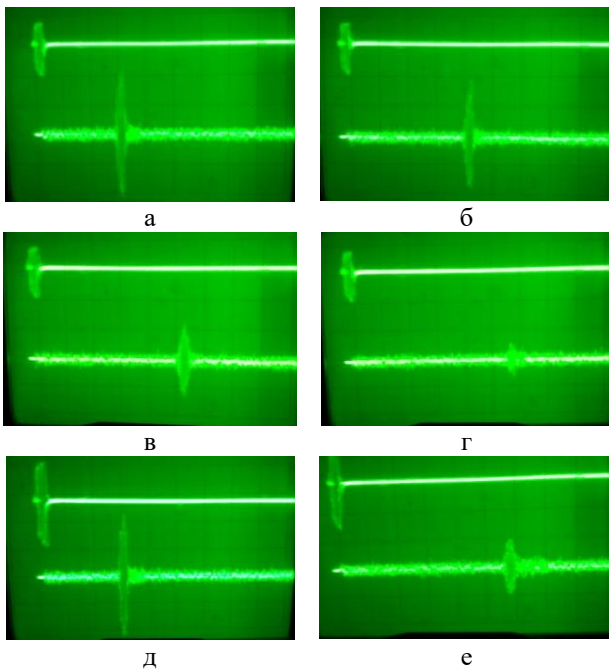


Рис. 4 – Осциллограммы сигналов ПАВ

При пошаговом увеличении l до 5,3 см амплитуда ПАВ убывала по известному [1] закону (рис. 4 б-в). Как только в зоне ПАВ появился дефект ($l=6$ см), амплитуда сигнала резко упала (рис. 4 г), появились дополнительные составляющие, разнесенные во времени, изменился частотный спектр (рис. 5 б). При этом основная гармоника сместилась на 10 %. Последнее свидетельствует об изменении формы сигнала. Начиная с $l=8,5$ мм, риска перестает влиять на формирование акустического сигнала и его вид, закономерности изменения амплитуды восстанавливаются.

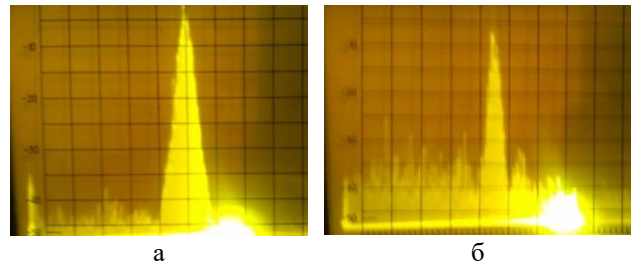


Рис. 5 – Спектрограммы сигналов ПАВ

Наличие покрытия (липкой ленты), после повышения уровня зондирующего сигнала и чувствительности приёмной аппаратуры, не существенно изменило характер полученных результатов (рис. 4 д, е).

При использовании в качестве покрытия изоляционной ленты возможности имеющейся в наличии аппаратуры не позволили обеспечить достаточный уровень зондирующего сигнала для формирования волны Рэлея.

Переход на частоту 1,5 МГц не позволил решить поставленную задачу даже при отсутствии покрытия.

Анализ полученных результатов. Результаты эксперимента показали принципиальную возможность выявления с помощью ПАВ Рэлея одиночных дефектов в виде рисок глубиной 0,4 мм на поверхности металлического слоя под неметаллическим покрытием. При этом:

- высокой эффективности использования ПАВ Рэлея, как и было отмечено в литературе, можно достичь только при условии адаптации их параметров к условиям поставленной задачи, в частности, точной настройки угла ввода электроакустических преобразователей на ПАВ;

- критериями выявления дефекта могут быть энергетические, частотные и временные параметры сигнала, его форма;

- важным фактором при выявлении дефекта является его расположение относительно приёмного преобразователя, что связано с конечными размерами зоны тени от дефекта;

- при наличии покрытия система должна обладать достаточной мощностью при зондировании и чувствительностью в приёме, чтобы обеспечить получение сигнала.

Выводы. В результате работы посредством измерительного эксперимента на модели лонжерона, имеющего дефект в виде риски глубиной 0,4 мм, несущего винта вертолёта показана принципиальная возможность выявления такого дефекта с помощью поверхностных акустических волн, параметры которых настроены на эффективное взаимодействие именно с этим видом дефекта.

Развитие работы может быть направлено на совершенствование измерительной аппаратуры для обеспечения надёжного контроля в условиях более толстого покрытия с последующим переходом к реальному объекту.

Список литературы

1. Викторов И. А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. – М.: Наука, 1966. – 168 с.

2. Викторов И. А. Звуковых поверхностные волны в твёрдых телах. – М.: Наука, 1981. – 288 с.
3. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник. / Под ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2003. – 656 с.
4. B. Lu. Study on Surface Stress Measurement of Laser Cladding Fe-Based Alloy Coating Based on Rayleigh Wave Signal Analysis // Advanced Materials Research, Vols. 399-401, P. 2177-2180, 2011.
5. Characterization of Local Residual Stress at Blade Surfaces by the V(z) Curve Technique/ Yanxun Xiang, Da Teng, Mingxi Deng, Yunze Li, Changjun Liu, Fujhen Xuan // Metals.– 2018, – 8 (8). – P. 651.
6. Edouard G. Love Surface Waves for Materials Evaluation // Nesvijski Civil Engineering Department University of Minnesota Minneapolis, MN 55455.
7. Generation Mechanism of Nonlinear Rayleigh Surface Waves for Randomly Distributed Surface Micro-Cracks /Xiangyan Ding, Feilong Li, Youxuan Zhao, Yongmei Xu, Ning Hu, Peng Cao and Mingxi Deng // Materials. – 2018 – 11 (4). – P. 644.
8. Вертолёт Ми-8. Инструкция по технической эксплуатации. Книга 1. Планер и силовая установка.
9. Безимьянный Ю. Г. Акустичний контроль матеріалів з розвинутою мезоструктурою // Фізико-хімічна механіка матеріалів 2007. № 4. С. 53-65.
10. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 3: И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге. Ультразвуковой контроль. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.
11. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Советское радио, 1971. – 672 с.
12. Безимьянный Ю. Г. Особенности акустических измерений при импульсном зондировании материалов, изготавливаемых методами порошковой металлургии // Современные проблемы физического материаловедения: Сб. науч. тр. Института проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины. Сер. "Фізико-хімічні основи технології порошкових матеріалів" – К., 2005. – С. 190–201.
13. Безимьянный Ю. Г. Возможности акустических методов при контроле структуры и физико-механических свойств пористых материалов // Порошковая металлургия. – 2001. – № 5/6.
14. А.С. № 1010551 СССР Безимьянный Ю. Г., Гришаков С. В. Ультразвуковой искатель с переменным углом ввода. Заявка № 3355952 от 18.11.1981.
4. B. Lyu Study on Surface Stress Measurement of Laser Cladding Fe-Based Alloy Coating Based on Rayleigh Wave Signal Analysis, Advanced Materialy Research, Vols. 399-401, P. 2177-2180, 2011
5. Characterization of Local Residual Stress at Blade Surfaces by the V(z) Curve Technique/ Yanxun Xiang, Da Teng, Mingxi Deng, Yunze Li, Changjun Liu and Fujhen Xuan // Metals – 2018, – 8 (8). – P. 651
6. Edouard G. Love Surface Waves for Materials Evaluation // Nesvijski Civil Engineering Department University of Minnesota Minneapolis, MN 55455
7. Generation Mechanism of Nonlinear Rayleigh Surface Waves for Randomly Distributed Surface Micro-Cracks /Xiangyan Ding, Feilong Li, Youxuan Zhao, Yongmei Xu, Ning Hu, Peng Cao and Mingxi Deng // Materials. – 2018 – 11 (4). – S.644
8. Vertol'ot Mi-8. Instruksiya po tehničkoj ekspluatatsii. Kniga 1. Planer i silovaya ustanovka. [Helicopter of Mi- 8. Instruction on technical exploitation. Book 1. Glider and power-plant.]
9. Bezmyannyy Yu. H. Akustychnyy kontrol' materialiv z rozvynutoyu mezostrukturoyu [Acoustic control of materials with developed mesostructure] // Fyzyko-khimichna mekhanika materialiv [Physical-chemical mechanics of materials] 2007. No 4. pp. 53-65.
10. Nerazrushayushchiy kontrol': Spravochnik [Non-destructive testing: Handbook]: V 8 t. / Rus. ed.: V. V. Klyuev. Vol. 3: I. N. Ermolov, Yu. V. Lange. Ul'trazvukovoy kontrol' [Ultrasonic testing]. – Moscow: Mashinostroenie, 2004. – 864 p.
11. Gonorovskiy I. S. Radiotekhnicheskie tsepi i signalyi. [Radiotechnical chains and signals] Moscow: Sovetskoe radio, 1971. – 672 p.
12. Bezmyannyy Yu. G. Osobennosti akusticheskikh izmereniy pri impul'snom zondirovanii materialov, izgotovlyаемых metodami poroshkovoy metallurgii [Features of acoustic measurements for pulsed sounding of materials manufactured by methods of powder metallurgy] // Sovremennye problemy fizicheskogo materialovedeniya: Sb. nauch. tr. Instituta problem materialovedeniya im. I. N. Frantsevicha NAN Ukrainy [Modern problems of physical materials science: Proc. of the Institute of Problems of Materials Science. I.N.F.]. Ser. "Fiziko-khimicheskie osnovy tekhnologii poroshkovykh materialov" Modern problems of physical materialovedeniya [Collection of scientific works Institute of problems of materialovedeniya the name of I.N.Frantsevicha of NAN of Ukraine. Ser. "Physical and chemical bases of technology of powder-like materials"] – Kiev. 2005. – pp. 190–201.
13. Bezmyannyy Yu. G. Vozmozhnosti akusticheskikh metodov pri kontrole struktury i fiziko-mekhanicheskikh svoystv poristykh materialov [Possibilities of acoustic methods at control of structure and физико-механических properties of porous materials]// Poroshkovaya metallurgiya. – 2001. – No 5/6.
14. A.S. N 1010551 SSSR Bezmyannyy Yu. G. Grishakov S. V. Ul'trazvukovoy iskatel s peremennym uglom vvoda. [Ultrasonic seeker with the variable corner of input] Zayavka N 3355952 ot 18.11.1981.

References (transliterated)

1. Viktorov I. A. Fizicheskie osnovy primeneniya ultrazvukovykh voln Releya i Lamba v tekhnike. [Physical bases of application of the ultrasonic Rayleigh and Lamb waves are in a technique]. – Moscow: Nauka, 1966. – 168 p.
2. Viktorov I. A. Zvukovykh poverkhnostnyye volny v tvYordyih telah. [Voice superficial waves in solids]– Moscow: Nauka, 1981. – 288 p/
3. Nerazrushayushchiy kontrol i diagnostika: Spravochnik. [Non-destructive control and diagnostics. Handbook] / Pod red. V. V. Klyueva. – Moscow: Mashinostroenie, 2003. – 656 p.

Надійшла (received) 05.09.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Безимьянный Юрий Георгиевич (Безимьянный Юрий Георгиевич, Bezimyanniy Yuriy Georgievych) – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу, Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, м. Київ; e-mail: bezimyni@i.com.ua.

Талько Оксана Вікторівна (Талько Оксана Вікторівна, Talko Oksana Viktorovna) – молодший науковий співробітник, Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, м. Київ; тел.: (044) 205-79-69; e-mail: dep57@materials.kiev.ua

Тесленко Людмила Олегівна (Тесленко Людмила Олександрівна, Teslenko Lyudmila Olegovna) – науковий співробітник, Інститут проблем матеріалознавства