

## НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА АДГЕЗИИ ПОКРЫТИЙ НА ЧУГУНЕ ПОВЕРХНОСТНЫМИ УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ ВОЛНАМИ

*А.И. Шевченко, к.т.н., вед. инженер*

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины (Киев, Украина)

**Аннотация.** Описано влияние критических углов распространения продольных и поперечных волн на достоверность измерений в неразрушающем методе контроля адгезии покрытий на чугуне. Рассмотрены поверхностные волны Лява и Релея, образующиеся при трансформации продольной волны в образце металла, на который нанесено твердое тонкое покрытие. Изложена модель распространения поверхностных волн для газотермического хромового покрытия толщиной 0,35 – 0,55 мм на чугуне. Достоверность изложенного подхода подтверждена стандартизованным методом механического отрыва на разрывной машине. Оценены погрешности определения адгезии покрытий.

**Ключевые слова:** адгезия, покрытия, поверхностные ультразвуковые волны, контроль качества.

E-MAIL: soi\_51@ukr.net

Одним из факторов, который определяет надежность покрытий, является величина адгезионного сцепления между покрытием и рабочим телом. При контроле покрытий могут использоваться ультразвуковые (УЗ) волны. Стандартизованных методик определения адгезии покрытий с использованием УЗ не существует. Стандартные (зеркальный и зеркально-теневой) методы облучения продольными УЗ волнами металла с покрытием при перпендикулярном падении луча УЗ на покрытия из-за низкой чувствительности не дают возможности найти корреляцию ослабления УЗ и качества адгезии. В работах [1 – 3] предложен метод контроля адгезии покрытий на основе хрома (основной металл – чугун) с помощью анализа спектра УЗ. Значение адгезии между покрытием и подкладкой может изменяться от десятых долей до 10 еВ [4]. Практически адгезию измеряют в других единицах, например с помощью работы или усилий, которые затрачиваются на отрыв покрытия. Единица измерения адгезии зависит от метода измерения [5]. Рассмотренная в работе модель разработана на базе применения теорий распространения УЗ [5 – 7].

Целью исследования является рассмотрение постановки эксперимента, при котором поверхностные волны проходят вдоль твердого тела с нанесенным на нем покрытием в схеме контроля, предполагающего боковое облучение образца с газотермическими тонкими покрытиями на чугуне, перспективными для применения в узлах трения.

В данной работе два одинаковых УЗ преобразователя прикладывались к боковым поверхностям цилиндрического образца со сточенными двумя фасками (рис. 1). На торец образца было нанесено покрытие. Излучающий и принимающий преобразователи подключались к спектроанализатору СК4-59.

Использовались два одинаковых преобразователя П113 № (0,2 – 2,0) с полосой частот 0,2 – 2,0 МГц и диаметром рабочей части пьезопластины 10 мм. СК4-59 относится к последовательным анализаторам, у которых есть следящий генератор (СГ), который перенастраивается одновременно с приемником в СК4-59 и используется для контроля амплитудно-частотной характеристики. Мгновенная частота колебаний на выходе СГ точно равняется частоте, настроенной полосовым фильтром СК4-59. На выходе генератора СГ излучается сигнал с широкой полосой частот, который приходит на преобразователь. Полоса частот СГ выбирается соответствующей полосе частот от 0,01 до 2 МГц или 5 МГц. На рис. 2 показана спектрограмма УЗ сигнала, по оси ординат (ось  $y$ ) откладывается значение сигнала преобразователя  $A_f$ , а по оси абсцисс – частоты  $f$ .

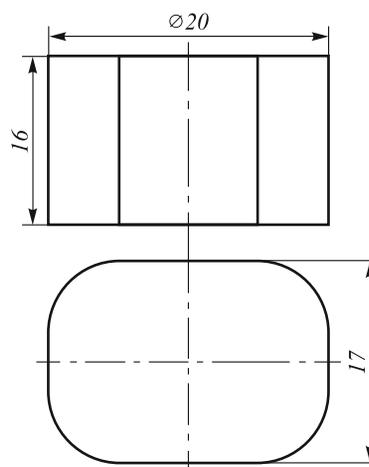


Рис. 1. Форма исследуемого образца чугуна

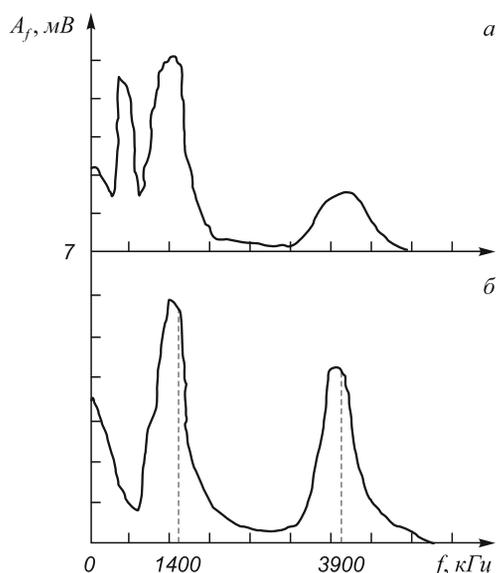


Рис. 2. Спектрограмма УЗ волны, прошедшей через образец чугуна: а – через образец с покрытием при низкой адгезионной прочности покрытия; б – через образец с покрытием при высокой адгезионной прочности покрытия [5, 7]

На спектрограмме (см. рис. 2) через максимумы амплитуд  $A_f$  сплошного спектра УЗ сигналов проводится огибающая – по амплитудам двух серий УЗ сигналов с большими (3900 кГц) и меньшими (1400 кГц) частотами (серии имеют колоколоподобный характер и разделены промежутком). На частоте 3900 кГц наблюдается существенная разница в амплитудах сигналов, прошедших сквозь образцы с хорошей и плохой адгезией. Характеристикой меры адгезионной прочности опытного образца является площадь  $S_f$  под огибающей участка спектра УЗ сигналов, который расположен в

$$\text{диапазоне с большими частотами } S_f = \int_{f_1}^{f_2} \varphi(\max A_f) df,$$

где  $\varphi(\max A_f)$  – функция огибающей спектрограммы;  $f_1, f_2$  – соответственно начало и конец диапазона частот для функции огибающей высокочастотного участка спектра поверхностных волн;  $S_f$  – измеряемая величина адгезии. Размерность частоты  $[f] = 1/\text{с}$ . Размерность единицы адгезии  $[A_f] = \text{мВ/с}$ . Приведенное выше соотношение для величины  $S_f$  лежит в основе метода определения адгезии с помощью УЗ.

Проводился анализ спектра УЗ сигналов на спектроанализаторе СК4-59 в диапазоне частот от 0 до 5500 кГц. Покрытия отличались по толщине и структуре поверхности.

На рис. 3 показаны направления распространения и отражения УЗ продольных и поперечных волн вдоль покрытия. В диаграмме направленности УЗ поля пьезопластины преобразователя УЗ угол расхождения  $\alpha$  зависит от длины волны  $\lambda$  и диаметра излучателя  $z$ :  $\alpha = 1,22\lambda/z$  [5, 7].

В работах [5 – 7] рассмотрены условия существования в покрытии и основном металле продольных и

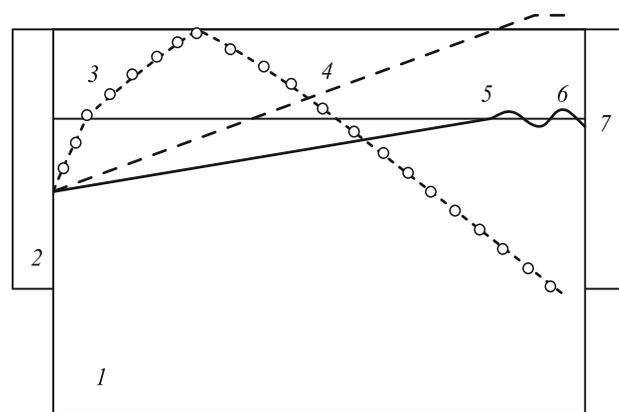


Рис. 3. Схема прохождения УЗ лучей: 1 – образец; 2 – преобразователь-излучатель; 3 (о-о-о), 4 (---), 5 (—) – лучи, которые трансформируются при падении на поверхности образца и покрытия под первым, вторым и третьим критическими углами соответственно; 6 – покрытие; 7 – преобразователь-приемник

поперечных волн, которые в зависимости от первого, второго и третьего критических углов (см. рис. 3) [5] трансформируются и распространяются вдоль поверхности раздела образца и покрытия. Первый критический угол – наименьший угол падения продольной волны, при котором луч продольной преломленной волны совпадает с границей раздела покрытия и основного металла. Такая волна начинает скользить вдоль границы раздела и не проникает во вторую среду (покрытие), где существует только поперечная волна. Вторым критическим углом – наименьшим углом падения продольной волны, при котором поперечная преломленная волна не проникает во вторую среду и происходит полное зеркальное отражение поперечной волны. Третьим критическим углом – наименьшим углом падения поперечной волны, при котором продольная волна скользит по поверхности. Между первым и вторым критическими углами в покрытии существуют поперечные волны [5 – 7].

Поверхностную волну Релея возбуждают обычно с помощью продольной волны, наклонно падающей из внешней среды (призмы) на ограниченный участок поверхности твердого тела [4]. Угол падения определяют из уравнения  $\sin \beta_S = C_{l\text{вн}}/C_S$ , где  $C_{l\text{вн}}$  – скорость продольной волны во внешней среде (она должна быть меньше, чем  $C_S$  – скорость поверхностной волны в подложке). Волна Релея является линейной комбинацией продольных и поперечных волн. Скорости распространения продольных и поперечных волн равны между собой, а волновое число  $k_S = \omega/C_S$ , где  $\omega$  – круговая частота. В результате такой комбинации получают неоднородные волны. Известная приближенная формула для подсчета скорости поверхностной волны имеет вид  $C_S = 0,93 - C_t$ , где  $C_t$  – скорость поперечной волны. Затухание поверхностной волны слабое и вызвано обычным затуханием объемных волн. Проникновение волны Релея под поверхность твердого тела мало: на глубине

длины волны  $\lambda_s$  интенсивность составляет около 5 % интенсивности на поверхности тела. Волна Релея локализована в слое, толщина которого  $\Delta = (1 \div 2)\lambda_s$  [6]. На спектрограмму и, следовательно, на величину адгезии влияют различные факторы: трещины и сколы рабочей части преобразователя, величина зерна и пористость. При плохой адгезии существуют дефекты и не выполняется условие трансформации продольной волны, которая падает под углом больше первого критического в поверхностную волну Релея. Поверхностная волна для бракованного образца с покрытием путем трансформации продольной волны не образуется. Медленные «слабо неоднородные» волны [6, 7] локализованы в очень тонкой области толщиной  $\lambda/2\pi$ .

Поперечные волны, которые распространяются вдоль границы двух сред и имеют горизонтальную поляризацию, являются волнами Лява [6]. При отсутствии покрытия волна Лява превращается в плоскую горизонтально поляризованную поперечную волну [6]. Самая простая волна этой системы описывается выражением  $U_y = A \exp[i(k_s x - \omega t)]$  [6], где  $A$  – амплитуда волны;  $t$  – время. Они возникают, когда на поверхности твердого тела имеется покрытие из твердого материала, скорость распространения в котором меньше, чем в теле. Волна Лява находит применение для контроля качества покрытий (плакировок), наносимых на поверхность объекта контроля. Волна Лява может образовываться не только из трансформируемых волн, которые падают на покрытие из тела металла, но и в результате трансформации продольной волны, которая распространяется параллельно плоскости образца и идет вдоль образца и покрытия. Тонкий поверхностный слой может изменить фазовую скорость поверхностной волны и существенно изменить ее затухание (в сравнении с затуханием релеевской волны с образцом без покрытия) [6]. Смещение фазы волн Лява, существующее на образце с покрытием, постоянно в покрытии и постепенно уменьшается в подложке [6]. Одним из видов поверхностных волн являются «слабо неоднородные» волны, локализованные в тонкой области толщиной  $\lambda/2\pi$  [6]. Эти волны являются волнами с почти горизонтальной поляризацией. Волны Лява являются примером «слабо неоднородных» волн, в которых основное смещение параллельно границе и перпендикулярно направлению распространения волны.

При преломлении продольной волны образуется волна Релея (поперечная + продольная) в двух случаях: когда эта волна выходит и когда не выходит в покрытие. Высокочастотная составляющая продольной волны затухает в подложке возможно из-за равенства размеров зерен и включений сравнительно с длиной продольной волны. При отсутствии покрытия как продольная основная, так и продольная и поперечная трансформируемые (отраженные) волны, которые проходят вдоль тела подложки, затухают в теле подложки. В то же время высокочастотная составляющая,

которая проходит вдоль границы подложки и покрытия (поперечная волна Лява), затухает меньше. Если слой между подложкой и покрытием однороден и адгезия хорошая, то энергия волн проходит лучше. При плохой адгезии поверхностная волна проходит хуже и быстро затухает. Энергия части продольной волны, прошедшей сквозь покрытие и распространяющейся вдоль поверхности покрытия, зависит от адгезии, поскольку при плохой адгезии плотность слоя между подложкой и покрытием мала и продольная волна не проходит в покрытие. Вдоль покрытия распространяются такие типы волн: Лява и продольная и поперечная волны Релея с вертикальной поляризацией. Адгезия определяется упругими характеристиками тонкого слоя, который расположен между покрытием и металлом. В зависимости от этих характеристик (пористости, толщины) происходит затухание поверхностных волн и отражение продольных волн. На достоверность контроля, т.е. на величину площади  $S_f$  под огибающей участка спектра УЗ сигналов с большими частотами влияют такие факторы: наличие или отсутствие поверхностных волн, проходящих вдоль покрытия; углы падения продольной волны, трансформирующейся в поверхностную волну; диаграмма направленности; соотношение энергий продольных и поверхностных волн, приходящих на пьезопластину преобразователя-приемника. Схема облучения УЗ и особенности распространения УЗ волн положены в основу способа контроля адгезии покрытий на металлах [8].

Практическая реализуемость предлагаемой схемы облучения УЗ, а именно появление рассмотренных выше поверхностных волн, поступающих на преобразователь-приемник при боковом облучении образца, подтверждена в эксперименте наличием полезного сигнала поверхностной волны, который напрямую связан с величиной адгезии. Измеренная величина  $S_f$  для образца с плохой адгезией равна 2,6 единицам (см. рис. 2, а), с хорошей адгезией равна 7 единицам (см. рис. 2, б) и близка к нулю при отсутствии покрытия. В работе [9] проведено испытание по определению усилий отрыва покрытия от основного металла на универсальной машине для механических испытаний типа 1231-У10. Получена линейная корреляция зависимости усилия отрыва покрытия  $\sigma$  от величины  $S_f$ . В работе [9] получена линейная зависимость  $\sigma$  от  $S_f$ :  $\sigma = 12 + k S_f$ , где  $k = \operatorname{tg} \alpha$  ( $\alpha$  – угол между прямой линией на графике зависимости и осью  $x$ ). Угол  $\alpha \approx 40^\circ$ . Следует подчеркнуть, что поверхностные волны используются для контроля по той причине, что они распространяются вдоль адгезионного слоя, лежащего между образцом и покрытием, что обеспечивает максимальную область взаимодействия (максимальный измеряемый сигнал). Результаты анализа, проведенного выше, позволяют выбрать условия эксперимента, при которых существуют именно поверхностные волны. В диапазоне углов падения бокового луча преобразо-

вателя на покрытие от 50 до 90° выполняется условие для распространения тех поверхностных волн, которые и используются для контроля.

Погрешность измерений определена поэлементным методом: на основе подсчетов влияния на результат класса точности приборов, методических погрешностей и случайных погрешностей экспериментов. Погрешность определения адгезии за счет неплотного прижатия преобразователя к опытному образцу составляет 2 %. Погрешность измерений частоты на спектроанализаторе составляет 3 %. Погрешность измерений амплитуды составляет 5 %. Предельная относительная погрешность измерений адгезии составляет 7 %.

**Выводы.** Рассмотрены принципы контроля покрытия образца металла с помощью ультразвуковых поверхностных волн, энергия которых напрямую связана с качеством адгезии покрытия и по величине достаточна для обнаружения ультразвуковым преобразователем. Проанализированы особенности практических измерений, подтверждающих перспективы использования ультразвука при контроле качества адгезии.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ракицкий А.Н., Писаренко В.А., Шевченко А.И., Зыкова Е.В. // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 1995. № 2. С. 27 – 30.
2. Шевченко А.И. // Вестник инженерной академии. 2009. № 1. С. 168 – 172.
3. Шевченко А.И., Ткачук И.В., Гридасов Н.П. // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 1996. № 2. С. 10 – 15.
4. Технология тонких пленок: Справ.: Пер. с англ. / Под ред. М.И. Елинсона, Г.Г. Смолко. Т. 2. – М.: Сов. Радио, 1977. – 768 с.
5. Ермолов И.Н., Алешин Н.П., Потапов А.И. Неразрушающий контроль. В 5 кн. Книга 2. Акустические методы контроля. – М.: Высшая школа, 1991. – 283 с.
6. Викторов И.А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. – М.: Наука, 1981. – 287 с.
7. Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов: Справ. – М.: Metallurgia, 1991. – 673 с.
8. Пат. u 2013 03786 Украины. Способ контроля адгезионной прочности покрытий на металлах / Шевченко А.И., Бродниковский М.П.; заявл. 27.03.2013; опубл. 25.09.2013, Бюл. № 18.
9. Бродниковский Н.П., Шевченко А.И., Писаренко В.А. и др. // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 1995. № 4. С. 50 – 53.

© 2014 г. А.И. Шевченко  
Поступила 23 января 2014 г.

## NON-DESTRUCTIVE CONTROL OF QUALITY OF ADHESION OF COVERAGE ON CAST-IRON BY SURFACE ULTRASONIC WAVES

*A.I. Shevchenko, Cand. Eng., senior scientific researcher, leading engineer*

Main astronomical observatory of National academy of sciences of Ukraine (Kiev, Ukraine)

E-MAIL: soi\_51@ukr.net

**Abstract.** The influence of critical corners of longitudinal and transversal waves propagation on reliability of measurements in the non-destructive method of adhesion control of cast-iron coverages is described. The article considers superficial Love and Rayleigh waves that are formed during the transformation of the longitudinal wave in the sample of metal on which applied a thin solid coating. The model of distribution of surface waves is expounded for gas-thermal chromic coverage in a 0,35 – 0,55 mm thick on cast-iron. The accuracy of the above approach is confirmed by a standardized method of mechanical separation on a tensile testing machine. The errors of determination of adhesion of coverage are appraised.

**Keywords:** adhesion, coverage, surface ultrasonic waves, control of quality.

### REFERENCES

1. Rakickij A.N., Pisarenko V.A., Shevchenko A.I., Zyкова E.V. *Tehnicheskaja diagnostika i nerazrushajushhij kontrol'*. 1995. № 2. Pp. 27 – 30.
2. Shevchenko A.I. *Vestnik inzhenernoj akademii*. 2009. № 1. Pp. 168 – 172.
3. Shevchenko A.I., Tkachuk I.V., Gridasov N.P. *Tehnicheskaja diagnostika i nerazrushajushhij kontrol'*. 1996. № 2. Pp. 10 – 15.
4. *Thin film technology (handbook)*. Vol. 2. Majsell L., Gljeng R.Ed.. New-Jork, 1970. (Russ.ed. *Tehnologija tonkih plenok (spravochnik)*). Elinson M.I., Smolko G.G. ed. Moscow: «Sov. Radio», 1977. 768 p.)
5. Ermolov I.N., Aleshin N.P. Potapov A.I. *Nerazrushajushhij kontrol'* (Nondestructive inspection). Vol. 2. Moscow: Vysshaja shkola, 1991. 283 p.
6. Viktorov I.A. *Zvukovye poverhnostnye volny v tverdyh telah* (Sound surface waves in solids). Moscow: Nauka, 1981. 287 p.
7. Krautkremer J, Krautkremer G. *Ul'trazvukovoj kontrol' materialov: Sprav.* (Ultrasonic testing of materials : Ref.). Moscow: «Metallurgija», 1991. 673 p.
8. Shevchenko A.I., Brodnikovskij M.P. *Sposob kontrolja adgezionnoj prochnosti pokrytij na metallah* (Method for controlling the adhesion strength of coatings on metals). Patent Ukraine № u 2013 03786, 2013.
9. Brodnikovskij N.P., Shevchenko A.I., Pisarenko V.A., Rakickij A.N., Gorban' V.F. *Tehnicheskaja diagnostika i nerazrushajushhij kontrol'*. 1995. № 4. Pp. 50 – 53.

Received January 23, 2014