

07;12

Фототермокапиллярный метод обнаружения отслоения лакокрасочного покрытия на металле

© Б.А. Безуглый, А.Ю. Зыков

Тюменский государственный университет

E-mail: bezuglyi@utmn.ru

Поступило в Редакцию 14 октября 2008 г.

Предложенный ранее фототермокапиллярный (ФТК) метод поиска приповерхностных неоднородностей [9] расширен на поиск дефектов лакокрасочного покрытия. Измерен ФТК-сигнал для отслоений, моделируемых зазорами шириной 1.4 mm с двумя ступеньками по длине 3 + 3 mm и высотой 10, 20 и 30 μm , а также отверстием в медной пластине и дюрале диаметром 1.4 mm и глубиной 0.5 и ~ 2 mm. Полученные результаты подтверждают возможность определения с хорошей точностью не только размеров отслоения, но и величину его воздушного зазора.

PACS: 47.55.dm, 81.80.Fy

Потребность в неразрушающем контроле лакокрасочных покрытий (ЛКП) и подповерхностных дефектов стимулировала разработку большого числа методов, основанных главным образом на фототермических (ФТ) эффектах [1–8]. Однако для их практического применения требуются дорогое оборудование и сложная обработка результатов. Например, один из ФТ-методом, предложенный еще в 1984 г., основан на возбуждении импульсом лазера Nd:YAG (длительность 15 ns, энергия 70 mJ) термоупругой деформации ЛКП [1]. Ее смещение наблюдают с помощью чувствительного (до 0.02 nm) лазерного интерферометра. При наличии отслоения термоупругое напряжение вызывает изгибовые колебания слоя ЛКП на резонансной частоте, которая зависит от радиуса и величины зазора этого отслоения.

После обнаружения эффектов, связанных с распространением тепловых волн (ТВ), и более глубокого освоения понятия T -волны [2–4] началась широкая разработка ТВ-методов поиска дефектов [5–8]. Применение пьезоэлектрического датчика из пленки PVDF толщиной 9 μm

позволило создать ТВ сканирующий микроскоп для визуализации подповерхностных дефектов [7]. Однако ни метод, ни прибор не стали проще ранее известных.

В данной работе предложенный ранее ФТК-метод [9,10] расширен на такой тип дефектов, как отслоение ЛКП на металле. Описание экспериментальной установки приведено в указанных выше работах [9,10].

Отслоение ЛКП представляло воздушный зазор в виде ступенчатого канала высотой 10 и 20 μm , шириной 1400 μm и длиной $\approx 3 + 3 \text{ mm}$. Такие зазоры готовили следующим образом. Из сложенной вдвое 10 μm тефлоновой пленки вырезали двойную полосу шириной 1400 μm и длиной до 3 mm. Верхнюю полосу смещали вдоль нижней на 3 mm. Обе полосы, смазав слегка силиконовым маслом, клали на дно медной кюветы и равномерно приглаживали. Ранее была изготовлена пленка ЛКП. В тефлоновую кювету диаметром 73 mm, установленную строго горизонтально, заливали около 3 ml черного цапонлака (Смоленский завод „ТехноХим“), после высыхания которого оставалась пленка толщиной $45 \pm 5 \mu\text{m}$. Эта пленка легко снимается с поверхности тефлона. Далее, пленку резали на кусочки $7 \times 7 \text{ mm}$. Кусочек смазывали тонким слоем жидкого цапонлака и накладывали на указанную выше двойную тефлоновую полосу, прижимая ее тампоном из бинта. Спустя час после приклеивания пленки ЛКП из-под нее аккуратно вынимали тефлоновую полосу. Оставшиеся два отверстия заклеивали тем же лаком. Изготовить трехступенчатый канал 10, 20 и 30 μm оказалось технически сложно. Чтобы получить точку с 30 μm , был изготовлен еще один ступенчатый канал той же ширины, высотой 20 и 30 μm . Результаты экспериментов с двумя каналами „сшивали“ в точке 20 μm .

В качестве термокапиллярной (ТК) жидкости использовали силиконовое масло PMS-5. Выбор его был обусловлен предварительным измерением зависимости стационарного ФТК-сигнала от вязкости по доступному нам набору силиконовых масел с вязкостью 1, 5, 10 и 20 cSt. Оказалось что при толщине слоя 430 μm в окрестности 10 cSt наблюдается слабый максимум (рис. 1), который с уменьшением мощности мало отличается от значения при 5 cSt.

ЛКП сканировали с шагом 50 μm сфокусированным пучком накачки ($2w^* = 500 \mu\text{m}$, $P = 4.6 \text{ mW}$) He–Ne-лазера поперек каждого участка канала (10, 20 и 30 μm) примерно по его середине за семь проходов (сканов) в полосе шириной около 1000 μm без специального контроля расстояния между сканами. Относительная точность измерения диаметра равна около 3% вдоль оси отслоения и падает до 13% на

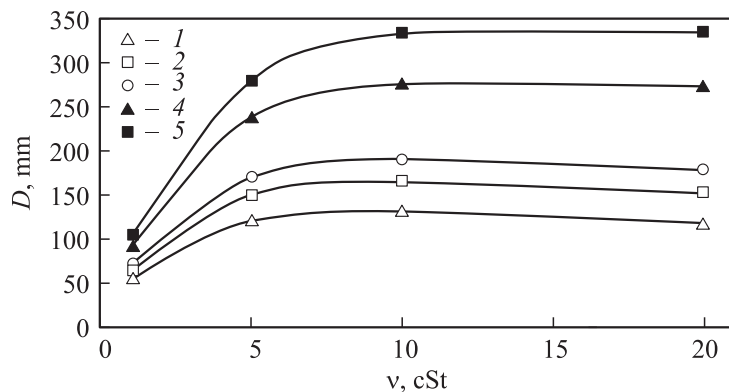


Рис. 1. Зависимость диаметра ТК-сигнала от вязкости силиконового масла в слое толщиной $430\ \mu\text{m}$ на эбонитовой подложке, толщиной $14\ \text{mm}$, при мощности пучка: 1 — $3.3\ \text{mW}$, 2 — $4.0\ \text{mW}$, 3 — $4.6\ \text{mW}$, 4 — $6.3\ \text{mW}$, 5 — $7.4\ \text{mW}$.

его границе. Время полного скана не превышало $15\ \text{min}$, т.е. $15\text{--}16\ \text{s}$ на одно измерение. Малую мощность пучка накачки выбрали из следующих соображений: 1. Как показано в [9], при толщине жидкого слоя $430\ \mu\text{m}$ динамическая характеристика $D = D(P)$ при малых мощностях является почти линейной, что важно для точных измерений. 2. При малой мощности накачки скорость выхода ФТК-сигнала на стационар, а также скорость релаксации термовозмущенной области после измерения выше, чем при большей мощности, что позволяет ускорить сканирование.

На рис. 2 показаны результаты сканирования отслоений с зазорами 10 , 20 и $30\ \mu\text{m}$. Из трех полученных сканов хорошо заметна тенденция кажущегося увеличения ширины отслоения с увеличением воздушного зазора. Этот эффект можно объяснить двумя взаимно дополняющими причинами: геометрической и термической. При приготовлении зазора из-за некоторой жесткости ЛКП канал образуется не прямоугольного сечения, а в виде трапеции с верхней стороной, равной ширине тефлоновой полоски. Причем с увеличением высоты зазора при том же угле изгиба ширина нижнего основания каждый раз немного увеличивается. Если же пренебречь отклонением сечения канала от прямоугольности, то остается термическое объяснение, суть которого в том, что с

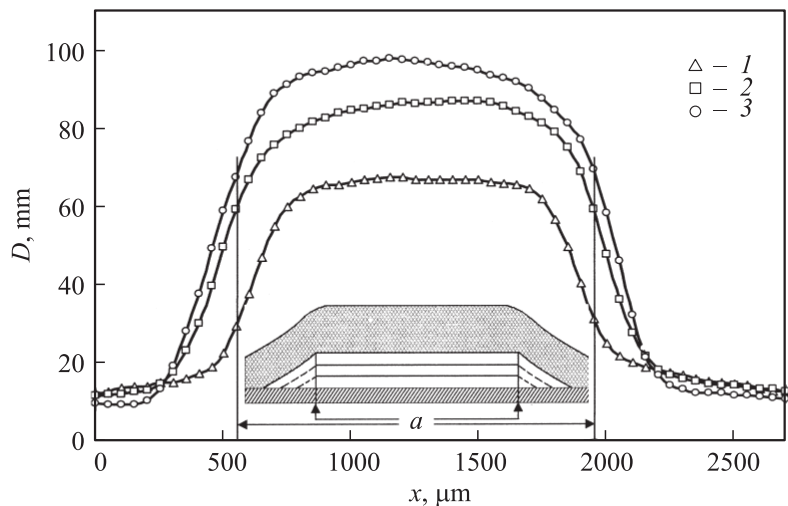


Рис. 2. Сканы отслоения ЛКП на металле: 1 — $10\ \mu\text{m}$, 2 — $20\ \mu\text{m}$, 3 — $30\ \mu\text{m}$, x — ось сканирования, перпендикулярная продольной оси канала, a — ширина канала, имитирующего отслоение. На вставке показано поперечное сечение искусственного отслоения ЛКП с предполагаемой его деформацией у границы в процессе приготовления.

увеличением зазора поток тепла из области, примыкающей к границе отслоения (со стороны цельного ЛКП), испытывает большее сопротивление при большем зазоре из-за удлинения пути до металла. На рис. 3 показана зависимость $D = D(h_{air})$, построенная по полученным трем точкам, соответствующим значению сигнала вдоль оси канала. Из этого графика видно, что с ростом h_{air} наблюдается „насыщение“. Очевидно, при некоторой толщине h_{∞} , дальнейшее увеличение h_{air} не будет влиять на D , т.е. $D(h_{air} \geq h_{\infty}) = \text{const}$. Чтобы иметь представление о предельном значении $D_{\infty} = D(h_{\infty})$, мы измерили сигнал над отверстием глубиной $2\ \text{mm}$ и диаметром $1.4\ \text{mm}$ в дюрале под ЛКП. Здесь мы приняли на веру, что значение $h_{air} = 2\ \text{mm}$ заведомо удовлетворяет условию $h_{air} \geq h_{\infty}$. Еще один опыт с отверстием такого же размера в медной пластине толщиной $500\ \mu\text{m}$ под слоем лака той же толщины дал совпадающий результат, $D(h_{air} = 500\ \mu\text{m}) = 135\ \text{mm}$. С другой стороны, мы приняли для подгонки данных функцию, приведенную на вставке

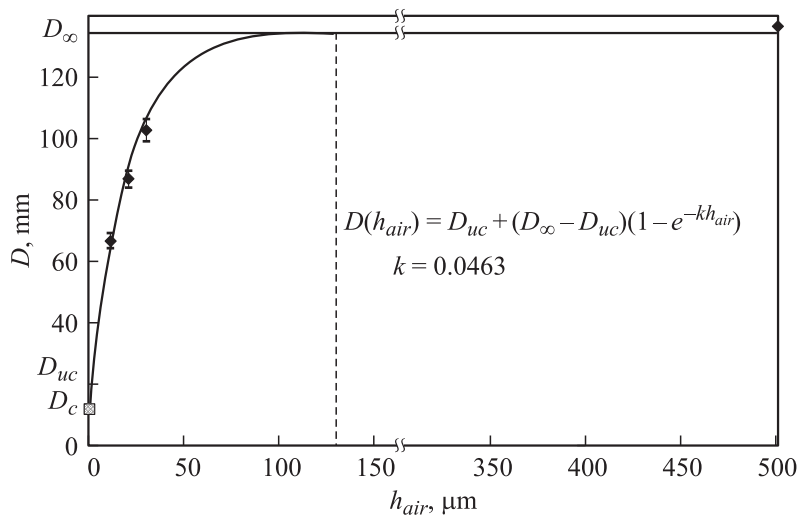


Рис. 3. Зависимость диаметра ТК-сигнала D от толщины воздушного зазора h_{air} . Штрихвертикаль отмечена точка $D(h_{air} = 130 \mu m) = 0.97D_\infty$.

рис. 3, где взяли за начальную точку D_{uc} , которую получили линейной экстраполяцией влево до пересечения с осью D . Полученную разницу $D_{uc} - D_c$ можно приписать тепловому сопротивлению несвязанного с подложкой ЛКП (unbonded covering) [1]. Оценка величины этого сопротивления представляет особый интерес, так как точное значение D_{uc} ФТК-сигнала при отсутствии связи ЛКП с подложкой является точкой отсчета величины воздушного зазора при отслоении. К сожалению, решение такой задачи усложняется приготовлением воздушных зазоров толщиной меньше $10 \mu m$. Зависимость $D = D(h_{air})$ аналогична полученной ранее зависимости диаметра ТК-сигнала от толщины слоя ЛКП на металле, где мы столкнулись с проблемой получения поглощающих слоев ЛКП $h_c < 30 \mu m$ [11].

Заметим, что реальное „насыщение“ по уровню $0.97D_\infty$ (с учетом погрешности эксперимента 3%), оцененное по кривой подгонки (рис. 3), происходит при $h_{air} \geq h_\infty = 130 \mu m$.

Предложенный ФТК-метод можно сравнить с усовершенствованным „мираж“-методом [12], где для повышения чувствительности

и воспроизводимости результатов используют слой 1 см связующей жидкости CCl_4 , имеющей высокую температуропроводность, очень высокий термооптический коэффициент ($dn/dT = 6.12 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$) и низкую теплопроводность. Недостатком „мираж“-метода является сложная юстировка тонких (100 и 700 μm) пучков накачки и пробного и необходимость приготовления образца с горизонтальной поверхностью, над которой, на высоте около 90 μm , проходит пробный пучок.

В ФТК-методе используется силиконовое масло PMS-5, имеющее очень низкое поверхностное натяжение и высокий ТК-коэффициент $\partial \ln \sigma / \partial T = 4.06 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. Одним из достоинств ФТК-метода является то, что здесь не требуется трудоемкая юстировка узких пучков. Кроме того, метод, по своей природе, осуществляется в конфигурации *in-plane* и допускает его применение *in situ* при условии, что исследуемый объект имеет участок горизонтальной поверхности диаметром не менее 5–6 см, на котором можно закрепить органичительное кольцо для ванны ТК-жидкости глубиной менее 1 мм. Метод обеспечивает также удобный оптический доступ к исследуемому объекту: пучок накачки может быть направлен сверху под прямым углом к поверхности образца, а пробный — под углом, близким к прямому. Если не требуется высокое пространственное разрешение, а только поиск самого дефекта, то можно использовать однолучевую схему без фокусировки пучка.

Авторы благодарят И.М. Рупинского за помощь в подготовке образцов, а также А.А. Кудрявцева и С.И. Чемоданова за интерес к работе и полезные советы.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, грант РНП.2.1.1.2109.

Список литературы

- [1] *Rousset G. et al. // Can. J. Phys. 1986. V. 64. P. 1293–1296.*
- [2] *Bennett C.A., Patty R.R. // Appl. Opt. 1982. V. 21 (1). P. 49–54.*
- [3] *Li Voti R. et al. // J. Advanced Materials. 2001. V. 3 (4). P. 779–816.*
- [4] *Patel P.M., Almond D.P., Reiter H. // Appl. Phys. B. 1987. V. 43. P. 9–15.*
- [5] *Wu Z.S., Chen F., Sun X.T. // Chin. J. Phys. 1999. V. 37 (3). P. 333–340.*
- [6] *McDonald K.R. et al. // J. Heat Transfer. 2000. V. 122. P. 10–14.*
- [7] *Van den Brand J. et al. // J. Appl. Phys. 2003. V. 93 (4). P. 2019–2027.*

- [8] *Salazar A.* et al. // *J. Appl. Phys.* 2005. V. 98. P. 013513-1–013513-7.
- [9] *Безуглый Б.А.* и др. // *Письма в ЖТФ.* 2008. Т. 34. В. 17. С. 38–44.
- [10] *Безуглый Б.А.* и др. // *Дефектоскопия.* 2008. В. 6. С. 26–30.
- [11] *Безуглый Б.А., Зыков А.Ю.* // *Труды VI Минского Международного форума по тепломассообмену.* 19–23 мая, 2008. CD ISBN 978–985-6456-60-5. Минск, Беларусь.
- [12] *George S.D.* et al. // *Phys. Rev. B.* 2003. V. 68. P. 165319-1–165319-6.