



УДК 536.2

А.Ю. Зыков¹, Н.А. Иванова²

¹ Тюменский Индустриальный университет, Россия,
625000, Тюмень, Володарского ул., 38, E-mail: aleksandr.zykov@inbox.ru

² Тюменский Государственный университет, Россия,
625003, Тюмень, Володарского ул., 6, E-mail: n.ivanova@utmn.ru

ФОТОТЕРМОКАПИЛЛЯРНЫЙ МЕТОД ДИАГНОСТИКИ РАЗМЕРОВ ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ТЕПЛОПРОВОДНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В НЕТЕПЛОПРОВОДНОМ МАТЕРИАЛЕ

АННОТАЦИЯ

В работе фототермокапиллярный (ФТК) эффект использован для диагностики размеров подповерхностных инородных теплопроводных включений в нетеплопроводной подложке. Модельной системой служил эбонит с вмонтированными заподлицо вертикальными и горизонтальными медными втулками диаметром 2,2 мм. Максимальная длина вертикальной втулки $l_{\text{вм}} = 14$ мм, а горизонтальной – $l_{\text{вм}} = 52$ мм. Рабочая поверхность подложки покрыта пленкой из высохшего слоя черного цапонлака, поглощающей излучение пучка накачки (максимальная мощность пучка накачки $P_{\text{нак}} = 10,4$ мВт, диаметр несфокусированного и сфокусированного пучка равны 2,5 и 0,5 мм), а сверху нанесен тонкий слой силиконового масла ПМС-5 ($h = 300$ мкм), в котором возбуждали ФТК эффект. Используя маломощный зондирующий расфокусированный пучок лазера ($P_{\text{нр}} = 0,3$ мВт), измеряли диаметр $D_{\text{см}}$ стационарного ФТК сигнала в зависимости от $l_{\text{вм}}$. Установлено, что на начальном участке зависимости $D_{\text{см}}(l_{\text{вм}})$ для вертикальных втулок метод имеет максимальную чувствительность $\Delta D_{\text{см}}/\Delta l_{\text{вм}} = -120$ для $l_{\text{вм}} \leq 1,6$ мм, а для горизонтальных – максимальная чувствительность $\Delta D_{\text{см}}/\Delta l_{\text{вм}} = -79$ достигается для $l_{\text{вм}} \leq 3$ мм. Дальнейшее увеличение $l_{\text{вм}}$ втулки не приводило к заметному изменению $D_{\text{см}}$, что очевидно связано с достижением предельной $l_{\text{вм}}$ характерной для термически полубесконечной втулки. В случае горизонтальных втулок повышение $P_{\text{нак}}$ с 3,9 до 10,4 мВт увеличивает крутизну зависимости $\Delta D_{\text{см}}/\Delta x$ на границах втулки в 9 раз.

ФОТОТЕРМИЧЕСКИЙ МЕТОД, ФОТОТЕРМОКАПИЛЛЯРНЫЙ МЕТОД,
НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ, ДЕФЕКТ, ТВЕРДОЕ ТЕЛО

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существует потребность в диагностике скрытых неоднородностей в твердых телах широкого класса материалов, в частности, определение локализации и размеров дефектов [1]. Среди традиционных методов неразрушающего контроля (НРК) особую популярность получили вихретоковые, магнитно-индукционные, ультразвуковые и радиационные методы и созданные на их основе компактные дефектоскопы [2]. Однако, первые два метода непригодны для выявления дефектов в токонепроводящих материалах. Ультразвуковой метод требует наличие контактирующей жидкости для его осуществления, и этим методом сложно детектировать подповерхностные дефекты из-за наличия “мертвой

зоны”. Более того, на результат может повлиять малейшее изменение расстояния между измерительным зондом и поверхностью исследуемого образца. Радиационный метод подразумевает наличие вредного для персонала ионизирующего излучения. Изобретение лазера привело к разработке группы методов, основанных на импульсном или модулированном тепловом воздействии от лазера или лампы на исследуемый образец, названных фототермическими (ФТ) [3]. ФТ методы нашли широкое применение в НРК скрытых дефектов [4-16], а также для получения карт дефектов созданы микроскопы [15]. Наиболее популярным в последнее время стал метод, названный ФТ радиометрией [17], в котором о наличии дефекта в однородном твердом теле судят по измененной интенсивности ИК излучения, а, значит, и поверхностной температуры, используя законы теплового излучения абсолютно черного тела. Так как теплофизические (ТФ) свойства дефекта и однородного твердого тела (подложки) различны, то наличие дефекта приведет к накоплению избыточного тепла на границе “тело-подложка”, которое можно обнаружить на экране ИК камеры в виде теплового контраста на термограмме [1]. ФТ радиометрия находит широкое применение в НРК подповерхностных дефектов [9-11]. В НРК дефектов также применяют метод активной термографии (ТГ) [1, 18], основанный на том, что при нагреве большого участка поверхности образца тепловая волна [19, 20], прошедшая вглубь, отражается от дефекта и по размеру области с отличным тепловым контрастом узнают о размере дефекта, а по времени прохождения этой волны – о глубине его локализации. Вышеуказанные методы сложны в плане их технической реализации из-за дороговизны и сложности оборудования (ИК камера, позиционный детектор и синхронный усилитель), а также сложная методика обработки результатов (Фурье-преобразование). Для решения проблемы диагностики твердых тел нами был предложен основанный на фототермокапиллярном (ФТК) эффекте [21] метод, ранее применимый для НРК пустот [22], одиночных дефектов [23] и отслоения покрытия [24]. ФТК эффект – это термокапиллярное течение в тонком слое жидкости на подложке, вызванное неоднородным локальным нагревом от лазера или лампы.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРЕМЕНТА

Экспериментальная установка

Исследуемые образцы представляли собой подложки из нетеплопроводного эбонита с вклеенными заподлицо медными включениями симметричной относительно пучка лазера формы. Использовали следующие типы включений равного диаметра 2,2 мм: (i) вертикально ориентированные втулки $l_{вм} = 1,6; 3,3; 5,6; 8,2$ и 14 мм и (ii) горизонтально ориентированные втулки $l_{вм} = 3; 6,5; 13; 26$ и 52 мм.

Образцы с вмонтированными втулками были покрыты слоем черного цапонлака толщиной ~ 30 мкм, который хорошо поглощает излучение лазера накачки. На рис. 1 приведены карты расположения втулок.

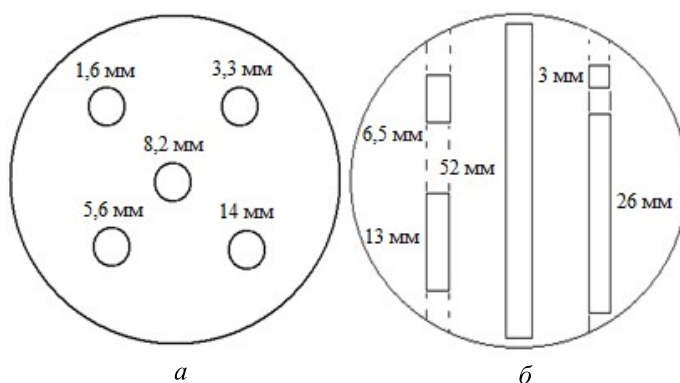


Рис. 1. Карты местоположения модельных дефектов: вертикальные (а) и горизонтальные (б) втулки.

В качестве среды-преобразователя энергии пучка накачки использовали силиконовое масло ПМС-5 вязкостью 5 сСт, которое тонким ($h = 300$ мкм) слоем наносили на поверхность образца. Образец помещали на столик, оснащенный микрометрическим винтом для горизонтального перемещения образца. Экспериментальная установка показана на рис. 2 (а). Пучок лазера накачки 1 ($P_{нак} = 21,3$ мВт, $\lambda = 632,8$ нм, $2w_{нак} = 2,5$ мм) проходит через светофильтр 2 и открытый затвор 3, и, отражаясь от зеркала 4, под небольшим углом к нормали попадает на слой масла (поверхностное натяжение (ПН) $\sigma = 19,7 - 20,4$ мН/м, температурный коэффициент ПН $d\sigma/dT = -0,08$ мН/м·К, теплопроводность $0,13 - 0,17$ Вт/м·К), находящийся в кювете, толщину h которого выставляли методом калиброванной проволочки 6 [21]. Кювета представляет собой плоскопараллельный диск 7 из образца, на который эпоксидным клеем фиксировали ограничительное кольцо 8 с диаметром 50 – 60 мм. Слой жидкости от попадания пыли защищали прозрачной крышкой 9. Для эффективного поглощения излучения лазера 1 образцами на их рабочих поверхностях создавали поглощающий слой 10, полученный при высыхании налитого в кювету слоя черного цапонлака (“ТехноХим”, Смоленск). Горизонтальное положение кюветы обеспечивали системой: предметный столик из массивного основания 11, на котором находилась тефлоновая кювета 12 с затвердевшим слоем сплава Вуда 13. Сверху на этот слой вогнутой поверхностью вниз клали плоско-вогнутую линзу 14 с диаметром 80 мм. Пробный пучок лазера 15 ($P_{пр} = 0.3$ мВт, $\lambda = 632,8$ нм, $2w_{пр} = 5$ мм), расширенный сферическим зеркалом 16, зеркалом 17 направляется на ТК ямку в слое масла 5 и, отражаясь от его поверхности, зеркалом 18 направляется на экран 19 (расстояние от слоя до экрана – 3 м), на котором формируется сигнал. Пучок накачки фокусировали линзой 20 (фокусное расстояние 30 мм), закрепленной на том же штативе, на котором закреплены зеркала для двух пучков, так что его диаметр составлял $2w_{нак}^* = 0,5$ мм. Торцом измерительного вала микрометрического винта 21 горизонтально перемещали кюветы для сканирования дефектов, а диаметр ФТК сигнала $D_{см}$ измеряли линейкой 22 по границе внешнего кольца. Во всех экспериментах мощность $P_{нак}$ выбирали такой, чтобы выполнялись два требования: (i) отсутствие разрыва слоя жидкости на эбоните и (ii) наличие четкого внешнего широкого кольца ФТК сигнала, который с достаточной точностью можно измерить для втулки с максимальным $l_{см}$.

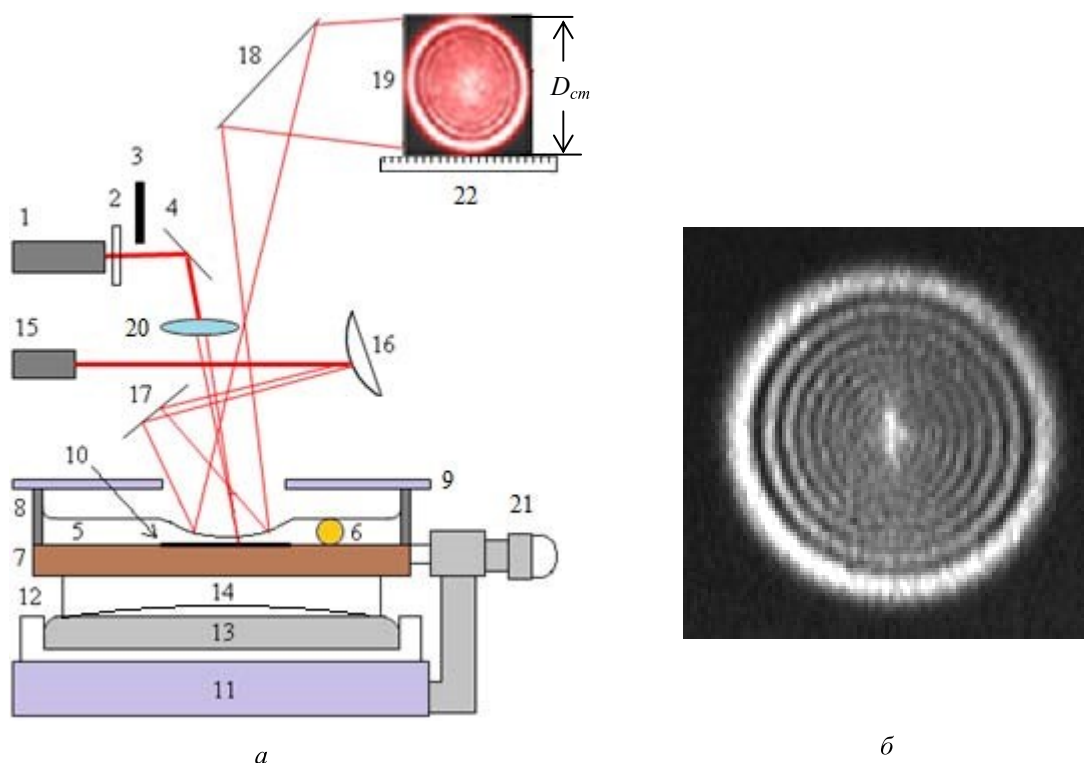


Рис. 2. Схема экспериментальной установки (а); фотография ФТК сигнала (б).

ФТК сигнал представляет собой картину в виде интерференционных колец на дальнем экране, полученную в результате проекции каустики пробного пучка, отраженного от деформированной поверхности слоя жидкости, рис. 2 (б).

Методика изготовления образцов с втулками

Вертикальные втулки

Для исследования зависимости диаметра D_{cm} от l_{em} втулки изготовили кювету с дном из эбонитовой подложки в виде диска с наклеенными 5 медными втулками с $l_{em} = 1,6; 3,3; 5,6; 8,2$ и 14 мм. Максимальное приближение условий эксперимента к идеальным достигалось применением втулок, торцы которых были перпендикулярны к их осям. Торцы самой короткой втулки подравнивали с помощью куска текстолитовой пластины с высверленным отверстием диаметром 2,4 мм. Процедура торцевания такой втулки состояла в том, что на стеклянную пластину (4 мм) клали наждачную бумагу средней зернистости, а на нее – текстолитовую пластину с отверстием, вставляя в нее до упора втулку с длиной ~ 2 мм. Прижимая верхний торец, пластину с втулкой водили по бумаге. Торцевание более длинных втулок проводили по следующему способу. Например, в случае втулки с $l_{em} = 14$ мм, отрезанный кусок медной проволоочки длиной 15 мм зажимали в пассатижах. Торцы проволоочки с небольшими выступами (0,5 мм) подравнивали напильником до их касания с боковой поверхностью головки пассатижей, контролируя l_{em} . Методика вклеивания втулок состояла в следующем. На наклеенную скотчем стеклянную пластину толщиной 4 мм клали диск и их между собой плотно прижимали двумя струбцинами, в результате чего получили цилиндрическую ямку, которую заполняли клеем с помощью тонкой проволоочки. Втулки вставляли в ямку до упора с пластиной, а выдавленный клей с тыльной поверхности подложки убирали шпателем. После затвердевания клея обе поверхности диска подравнивали наждачной бумагой. К подложкам фиксировали ограничительное кольцо, а рабочую поверхность покрывали поглощающим слоем 30 мкм (см. выше). Такую толщину покрытия выбрали, исходя из компромисса “максимальное поглощение излучения лазера накачки – максимальная чувствительность D_{cm} сигнала к l_{em} втулки”. Чем больше поглощение, тем выше будет температура в области локального нагрева, а, значит, и диаметр D_{cm} сигнала. Для удобства исследования втулок была составлена специальная карта, где каждому их местоположению соответствует определенная l_{em} , рис. 1 (а). Было замечено, что на поверхности высохшего покрытия были видны границы втулок, что облегчало их поиск. Методика эксперимента состояла в нагреве пучком накачки поверхности образца в зоне над втулкой. Результат эксперимента – получение семейства динамических характеристик $D_{cm}(l_{em})$ для каждой l_{em} .

Горизонтальные втулки

На рабочей поверхности эбонитовой подложки (толщина и диаметр равны 14 и 70 мм) вертикальной дисковой фрезой (толщина диска 4 мм) вырезали 3 параллельные между собой канавки глубиной 2,2 мм, расстояние между которыми было 1,5 см. В заполненные клеем канавки до упора вставляли отторцованные медные втулки. Выдавленные излишки клея убирали шпателем в направлении вдоль втулок, а после высыхания поверхность подравнивали мелкой наждачной бумагой. В целях предотвращения влияния соседних втулок на результат эксперимента их размещали на некотором расстоянии друг от друга. Для удобства поиска дефекта нужной длины приготовили специальную карту, рис. 1 (б). Методика эксперимента заключалась в сканировании широким пучком накачки втулок вдоль линии, перпендикулярно проходящей через их середину и получении скан-профилей для разных l_{em} и мощностей $P_{нак}$ (шаг сканирования – 100 мкм). Каждый скан-профиль получали путем совмещения нескольких скан-профилей по минимальному D_{cm} ФТК сигнала в точке над центром втулки таким образом, чтобы погрешность измерения диаметра D_{cm} на двух границах втулки не превосходила погрешности измерения (5 мм).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Вертикальные втулки

На рис. 3 показано семейство динамических характеристик для вертикальных втулок. Видно, что с ростом $l_{вт}$ крутизна характеристик $\Delta D_{ст}/\Delta P_{нак}$ уменьшается в 4,5 раза (с 63 до 14 мм/мВт). Такое поведение связано с тем, что при увеличении массы теплопроводного включения в нетеплопроводной подложке происходит усиление кондуктивного отвода тепла от нагреваемого пучком накачки участка поверхности. Влияние диаметра пучка накачки на крутизну кривой $D_{ст}$ от $l_{вт}$ становится значительным для больших втулок, и величина $\Delta D_{ст}/\Delta P_{нак}$ при фиксированной $l_{вт}$ уменьшается при использовании широкого пучка.

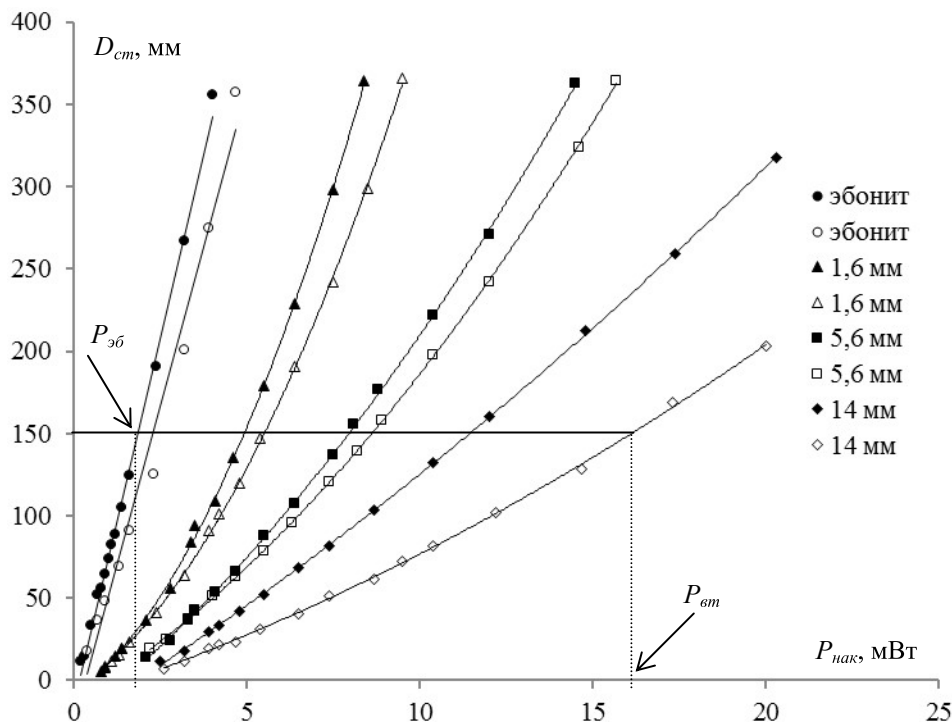


Рис. 3. Динамические характеристики слоя силиконового масла на эбоните и втулках с $l_{вт} = 1,6; 5,6$ и 14 мм для сфокусированного ($2w^*$, темные маркеры) и широкого ($2w$, светлые маркеры) пучка накачки.

Результаты опыта также показывают, что получение одного и того же значения $D_{ст}$ для втулок разной $l_{вт}$ требует повышения или понижения мощности $P_{нак}$ (т.е. компенсации мощности). Для анализа полученных зависимостей (рис. 3) ввели величину, называемую потерей мощности $\Delta P_{нак} = P_{вт} - P_{эб}$ для фиксированного $D_{ст}$, где $P_{вт}$ и $P_{эб}$ — мощности пучка, нагревающего втулку и эбонит, соответственно.

На рис. 4 показана зависимость величины потери мощности пучка накачки $\Delta P_{нак}$ от $l_{вт}$. Видно, что компенсация мощности $\Delta P_{нак}$ при увеличении $l_{вт}$ для случая сфокусированного пучка меньше, чем для широкого. Для сфокусированного пучка в широком интервале заданного $D_{ст}$ наблюдается тенденция к насыщению зависимости $\Delta P_{нак}(l_{вт})$. Это позволяет сделать вывод о том, что втулки можно считать термически “полубесконечными”. Данный факт ограничивает применимость сфокусированного пучка для диагностики втулок в широком диапазоне $l_{вт}$.

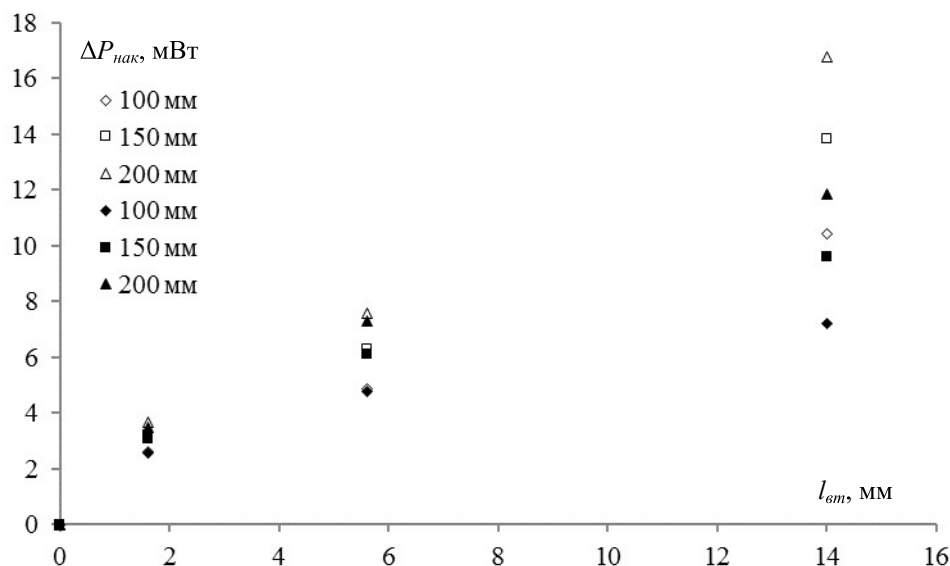


Рис. 4. Зависимость величины потери мощности на втулке относительно эбонита ΔP_{nak} от l_{om} при $D_{cm} = 100, 150$ и 200 мм для сфокусированного (темные маркеры) и широкого (светлые маркеры) пучка накачки.

Горизонтальные втулки

На рис. 5 показаны скан-профили горизонтальных втулок, D_{cm} от координаты сканирования x , для широкого пучка накачки с разной мощностью. С ростом l_{om} крутизна $\Delta D_{cm}/\Delta x$ и амплитуда скан-профиля, то есть, разность диаметров ФТК сигнала на эбоните $D_{эб}$ и над втулкой $D_{вт}$, уменьшается, что вызвано усилением влияния теплоотвода. Стоит указать, что с изменением l_{om} для данной P_{nak} существенно изменяется амплитуда скан-профиля, а вариация крутизны на границе включения практически постоянна. Повышая P_{nak} , можно увеличить чувствительность слоя жидкости (ФТК метода), как датчика температуры, к тепловым возмущениям, зависящим от массы включения. Обнаружено, что при $P_{nak} > 7,4$ мВт просканировать втулку, захватив ее границы, представляется сложным, однако использование больших мощностей эффективно в плане получения высокой чувствительности ФТК метода к l_{om} . Кроме того, на примере втулки с $l_{om} = 52$ мм, повышение мощности P_{nak} с 3,9 до 10,4 мВт увеличивает крутизну скан-профиля на границе втулки в 9 раз, а величину D_{cm} над центром втулки – в 3 раза. Основываясь на вышесказанном, можно сделать вывод о выборе оптимального значения мощности для детектирования данных моделей образца. Более всего для детектирования при данной толщине слоя жидкости может подходить мощность из промежутка $P_{nak} = 3,9 - 7,4$ мВт.

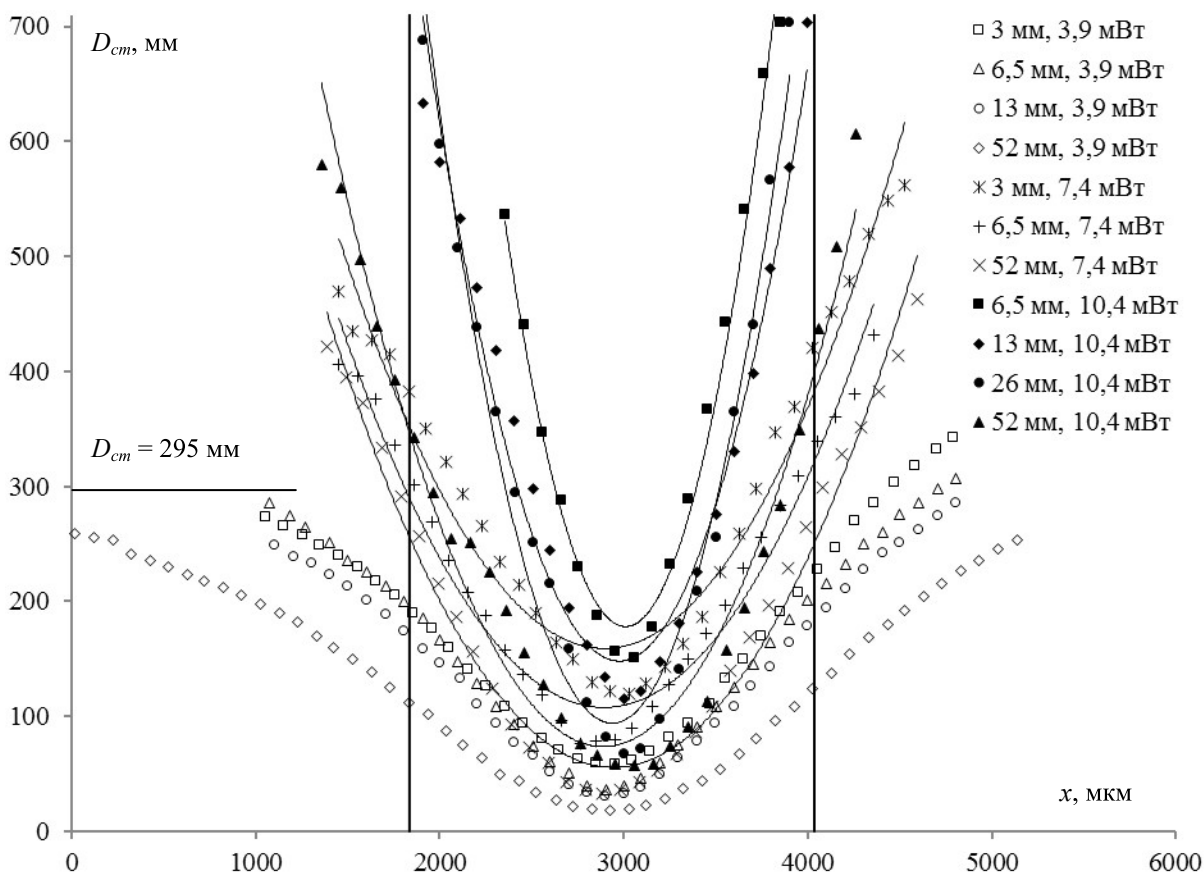


Рис. 5. Скан-профили горизонтальных втулок разной $l_{fm} = 3; 6,5; 13; 26$ и 52 мм и при разных мощностях $P_{нак}$ пучка накачки (вертикальные линии – границы втулок).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продемонстрирована возможность использования ФТК эффекта в слое прозрачной жидкости для обнаружения не только дефекта, но и оценки его l_{fm} , что показывает принципиально новый подход в области дефектоскопии и дефектотрии. Установка для реализации данного метода не сложена в изготовлении, а He-Ne лазер можно заменить на полупроводниковый.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

Δ – изменение, мм или мкм;
 λ – длина волны излучения лазера, нм;
 σ – поверхностное натяжение, мН/м;
 h – толщина слоя жидкости, мкм;
 k – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);
 l – длина втулки, мм;
 D – диаметр ФТК сигнала, мм;
 P – мощность, мВт;
 w – радиус широкого пучка, мм;
 w^* – радиус сфокусированного пучка, мм.
Индексы:
вт – втулка;
нак – накачки;
пр – пробный;
ст – стационарный;
эб – эбонит.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Wysocka-Fotek O., Maj M., Oliferuk W.** Use of pulsed IR thermography for determination of size and depth of subsurface defect taking into account the shape of its cross-section area // *Archives of Metallurgy and Materials*. 2015. 60 (2). P. 615 – 620.
2. **Клюев В.В.** Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / Под ред. В.В. Клюева. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2005.
3. **Terazima M., Hirota N., Braslavsky S.E.,** Quantities, terminology, and symbols in photothermal and related spectroscopies // *Pure Appl. Chem*. 2004. 76 (6). P. 1083 – 1118.
4. **Busse G.** Thermal wave nondestructive depth profiling with stereoscopic photothermal detection // *Journal de Physique*. 1983. 44 (10). P. C6-471 – C6-474.
5. **Sodnik Z., Tiziani H.J.** Photothermal interferometry for nondestructive subsurface defect detection // *Optics Communications*. 1986. 58 (5). P. 295 – 299.
6. **Yarai A., Sakamoto K., Nakanishi T.** High-fidelity tomographic imaging reconstruction for photopyroelectric thermal wave detection equipment // *Journal de Physique IV*. 4. 1994. P. C7-67 – C7-70.
7. **Reichling M., Welsch E., Duparré A., Matthias E.** Photothermal absorption microscopy of defects in ZrO₂ and MgF₂ single-layer films // *Optical Engineering*. 1994. 33 (4). P. 1334 – 1342.
8. **Batista J. A., Mansanares A. M., Da Silva E. C., Vaz C. C., Miranda L. C. M.** Contrast enhancement in the detection of defects in transparent layered structures: the use of optothermal interference technique in solar cell investigation // *Journal of Applied Physics*. 2000. 88 (9). P. 5079 – 5086.
9. **Rodríguez M.E., Garcia J.A., Mandelis A.** Infrared photothermal radiometry of deep subsurface defects in semiconductor materials // *Review of Scientific Instruments*. 2003. 74 (1). P. 839 – 841.
10. **Garrido F., Salazar A., Alonso F., Sáez-Ocáriz I.** Characterization of buried cylinders and spheres by pulsed infrared thermography // *Journal of Applied Physics*. 2005. 98. P. 103502-1 – 103502-5.
11. **Szczepanik M., Stabik J., Wróbel G., Wierzbicki Ł.** Detecting of defects in polymeric materials using pulsed infrared thermography // *Archives of Materials Science and Engineering*. 2008. 30 (1). P. 29 – 32.
12. **Batagiannis A., Wübbenhorst M., Hulliger J.** Piezo- and pyroelectric microscopy // *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. 2010. 14, P. 107 – 115.
13. **Dhouib A., Hamdi A., Yacoubi N.** Study of surface and subsurface defects in materials by photothermal deflection technique: theory and experience // *Journal of Modern Physics*. 2013. 4. P. 380 – 384.
14. **Hoshimiya T., Hatake-Yama M.** Photoacoustic imaging with a line-focus laser beam for rapid inspection and tomographic characterization of simulated surface and undersurface defects // *Open Journal of Acoustics*. 2013. 3 (2A). P. 8 – 15.
15. **Dudzik S.** Approximation of thermal background applied to defect detection using the methods of active thermography // *Metrology Measurement Systems*. 2010. XVII (4). P. 621 – 636.
16. **Liu B., Hai Z., Fernandes H., Maldague X.** Quantitative evaluation of pulsed thermography, lock-in thermography and vibrothermography on foreign object defect (FOD) in CFRP // *Sensors*. 2016. 16. 743. P. 1 – 14.
17. **Nordal P. E., Kanstad S. O.** New developments in photothermal radiometry // *Infrared Physics*. 1985. 25 (1). P. 295 – 304.
18. **Usamentiaga R., Venegas P., Guerediaga J., Vega L., Molleda J., Bulnes F.G.** Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing // *Sensors*. 2014. 14. P. 12305 – 12348.
19. **Marín E.** Thermal wave physics: principles and applications to the characterization of liquids // *Revista Ciências Exatas e Naturais*. 2004. 6 (2). P. 145 – 169.

20. **Salazar A.** Energy propagation of thermal waves // European Journal of Physics. 2006. **27**. P. 1349 – 1355.
21. **Безуглый Б.А.** Капиллярная конвекция, управляемая тепловым действием света и ее применение в способах регистрации информации: дис. ...канд. ф.- м. н. М., 1983. 270 с.
22. **Безуглый Б.А., Зыков А.Ю., Семенов С.В.** Фототермокапиллярная диагностика приповерхностных дефектов в твердом теле под лакокрасочным покрытием // Дефектоскопия. 2008. № 6. С. 26 – 30.
23. **Безуглый Б.А., Зыков А.Ю., Семенов С.В.** Фототермокапиллярный метод обнаружения инородных включений в твердом теле под лакокрасочным покрытием // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34, Вып. 17. С. 38 – 44.
24. **Безуглый Б.А., Зыков А.Ю.** Фототермокапиллярный метод обнаружения отслоения лакокрасочного покрытия на металле // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35, Вып. 14. С. 25 – 31.

A.Yu. Zykov¹, N.A. Ivanova²

¹ Tyumen Industrial University, Russia,
625000, Tyumen, Volodarskogo st., 38, E-mail: aleksandr.zykov@inbox.ru

² Tyumen State University, Russia,
625003, Tyumen, Volodarskogo st., 6, E-mail: n.ivanova@utmn.ru

PHOTOTHERMOCAPILLARY DIAGNOSTICS METHOD OF SIZES OF THE HIGH CONDUCTING SUBSURFACE INCLUSIONS IN THE LOW CONDUCTING MATERIAL

In this paper photothermocapillary (PTC) effect has been used for the diagnostics of the dimensions of the foreign subsurface high-conductive inclusions in a low conductive substrate. A modeling system was an ebonite disc with built-in flush vertical and horizontal copper plugs with diameter 2,2 mm. Maximum length of the vertical plug is $l_{pl} = 14$ mm and horizontal – $l_{pl} = 52$ mm. The working surface of the substrate was covered with a film of the dried black zapon lacquer absorbing the radiation of the pump laser beam (maximum $P_e = 10,4$ mW). A thin layer of silicone oil PMS-5 ($h = 300$ μ m) was deposited on the working surface of the ebonite disc to generate of the PTC effect. Using a low-power probing unfocused laser beam we measured the diameter D_{st} of the stationary PTC signal in dependence on l_{pl} . It was found that for the vertical plugs the method has a high sensitivity $\Delta D_{st}/\Delta l_{pl} = -120$ for $l_{pl} \leq 1,6$ mm, and for horizontal - maximum sensitivity $\Delta D_{st}/\Delta l_{pl} = -79$ is achieved for $l_{pl} \leq 3$ mm. Further increase in l_{pl} does not lead to a noticeable change in D_{st} that is obviously associated with reaching a maximum of l_{pl} that corresponds to a thermally semi-infinite plug. For case of the horizontal plugs an increase in P_e from 3,9 to 10,4 mW increases the slope $\Delta D_{st}/\Delta x$ at the boundary in between ebonite and plugs for 9 times.

PHOTOTHERMAL METHOD, PHOTOTHERMOCAPILLARY METHOD, NONDESTRUCTIVE CONTROL, DEFECT, SOLID