

- [1] *Бейлон Дж.* Масс-спектрометрия и ее применение в органической химии. М.: Мир, 1964. С. 325—328. 702 с.
- [2] *Сысов А. А., Чупахин М. С.* Введение в масс-спектрометрию. М.: Атомиздат, 1977. С. 176—241.
- [3] *Орлов В. Ю., Тараненко Л. А., Гурьев М. В.* // Химия высоких энергий. 1969. Т. 3. № 3. С. 195—200.
- [4] *Тараненко Л. А.* А. С. 951475. БИ. 1984. № 24.
- [5] *Тараненко Л. А., Кобелянский П. В.* // Тез. докл. III Всесоюз. конф. по масс-спектрометрии. Л., 1981. С. 175.
- [6] *Taranenko L. A., Kobelaynsky R. V., Beskova G. S.* // Proc. of the 11th Intern. Mass Spectrometry Conference. Bordeaux (France), 1988. P. 45.
- [7] Mass spectral data. American Petroleum Institute Research. Project 44. 1958. P. 1561.
- [8] *Munson M. S., Field F. U.* // J. Am. Chem. Soc. 1966. Vol. 88. P. 2621—2630.

Государственный научно-исследовательский
и проектный институт азотной промышленности
и продуктов органического синтеза
Москва

Поступило в Редакцию
21 сентября 1988 г.

07; 11; 12

Журнал технической физики, т. 59, в. 10, 1989

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕНЕВОГО МЕТОДА ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ДИНАМИКОЙ ПОВЕРХНОСТНОГО РЕЛЬЕФА ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАГРЕВЕ

Р. А. Лиуконен, А. М. Трофименко

Наиболее распространенный метод наблюдения за изменениями рельефа поверхности металлов — интерференционный. Однако в том виде, в котором он обычно применяется, его чувствительность часто оказывается недостаточной. Для двухлучевых интерферометров она составляет $\lambda/20$ — $\lambda/50$ (λ — длина волны излучения). Основными достоинствами теневых методов являются высокая чувствительность и простота схемной реализации. Расчетная и подтвержденная экспериментально чувствительность метода ножа Фуко (разновидность теневого метода) составляет $\lambda/600$ [1], что уже сравнимо с чувствительностью многолучевых интерферометров с осциллирующим зеркалом и электронной анализирующей системой ($\lambda/500$ — $\lambda/1000$). Это относится к продольному направлению, в поперечном направлении вследствие дифракции в обоих случаях чувствительность ограничена длиной волны излучения. Основным недостаток теневых методов — это сложность количественной интерпретации результатов, их калибровка. В данной статье показано, как, используя один из возможных приемов, удалось сравнительно просто обойти эти трудности при измерениях рельефа поверхности в момент деформирования.

Схемная реализация метода весьма проста. Коллимированный пучок от точечного источника (импульсная лампа ИСП-100-2 с диафрагмой, длительность импульса 1.65 мкс) направляется на контролируемую поверхность образца. После отражения лучи проходят через оптическую систему, в фокальную область которой вводится нож Фуко, и проецируются на экран (фотопленку). Вследствие «неидеальности» источника и оптической системы формирования пучка в плоскости ножа имеется определенное распределение интенсивности. Это, с одной стороны, приводит к уменьшению чувствительности, а с другой стороны, увеличивает рабочий диапазон, что дает возможность подобрать необходимые параметры для предполагаемых диапазонов измерений. Располагая нож вдоль оси X , можно построить функцию светопропускания $\varphi(Y)$, которая изменяется от 0 до 1 при изменении угла наклона волнового фронта $(\partial V/\partial Y)$ в пределах чувствительности. В общем случае светопропускание будет

$$T\left(\frac{\partial V}{\partial Y}\right) = \begin{cases} 1, & \text{если } \frac{\partial V}{\partial Y} > \frac{r_0}{f}, \\ \varphi(Y), & \text{если } \left| \frac{\partial V}{\partial Y} \right| \leq \frac{r_0}{f}, \\ 0, & \text{если } \frac{\partial V}{\partial Y} < -\frac{r_0}{f} \end{cases} \quad (1)$$

при условии, что для неискаженного пучка не проходит через центр пятна фокусировки, а f — фокус проецирующей системы.

При регистрации на фотопленку, используя характеристическую кривую, можно найти распределение волнового фронта. Наклон волнового фронта будет

$$\frac{\partial V}{\partial Y} = F(\varphi(Y), D(Y), D(I)), \quad (2)$$

где $D(Y)$ — плотность почернения изображения, $D(I)$ — характеристическая функция фотослоя.

Тогда после численного интегрирования найдем

$$V(Y) = \int_a^b \frac{\partial V}{\partial Y} dY, \quad (3)$$

т. е. определим состояние отражающей поверхности в момент регистрации.

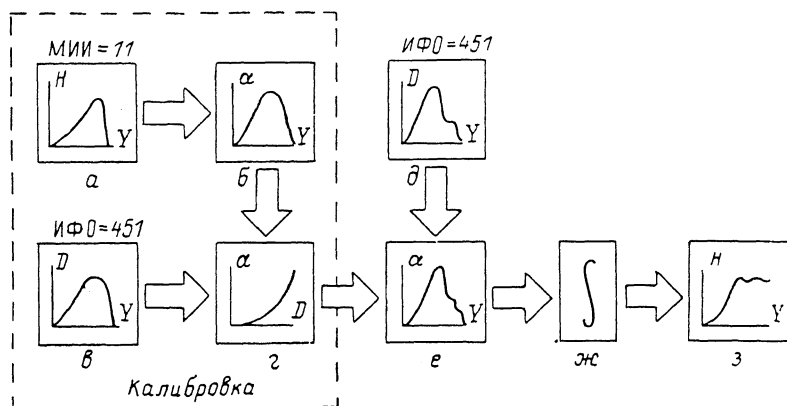


Рис. 1. Блок-схема расчета поверхностного рельефа в месте локального импульсного нагрева. H — высота неровности, Y — линейная координата, α — угол наклона отдельного элемента относительно всей невозмущенной поверхности, D — плотность почернения фотопленки.

Решая проблему калибровки, на отражающей поверхности в области наблюдения, но вне зоны взаимодействия излучения с поверхностью (импульсный нагрев осуществлялся излучением CO_2 лазера) предварительно наносился репер — дефект поверхности, по которому можно построить для каждого случая градуировочную кривую $\alpha = \Psi(D)$ (α — угол наклона участка отражающей плоскости). Эта функция одновременно решает проблему калибровки светопропускания ножа Фуко и градуировочной функции фотослоя. На рис. 1 показана схема реализации методики. Репер на зеркальном образце наносился стальным шариком диаметром 4 мм. Построение кривой высоты рельефа (H) проводилось при помощи интерферометра МИИ-11 (а), по которой строилась кривая распределения угла наклона (б). Фотометрирование репера осуществлялось на микрофотометре ИФО-451 (д), после чего строилась градуировочная кривая $\alpha = \Psi(D)$ (з). Затем, используя результат фотометрирования объекта измерения (д) и градуировочную кривую, строился график распределения угла наклона поверхности (е), проводилось численное интегрирование (ж), в результате которого находились величина отклонения и форма поверхности в момент регистрации (з).

В качестве примера можно привести результаты измерения деформирования поверхности вследствие локального импульсного нагрева. Метод позволил оценить не только «уход» нагреваемой области относительно всей плоскости, но и размеры возникающих микронеровностей высотой в несколько нанометров.

Нагрев поверхности осуществлялся излучением CO_2 лазера с длительностью импульса 20—25 мкс. Поверхность медных образцов обрабатывалась по оптическому классу. Диаметр области взаимодействия 2.5 мм. Первый перегиб и «полочка» на графике H ($W_{\text{ЭП}}$) (рис. 2, а) согласуются с началом развития низкотемпературной пластической деформации, аналогично описанной нами в [2, 3]. Прямая H_T на этом же рисунке показывает изменение высоты рельефа, обусловленное температурным расширением χ поверхностного слоя, рассчитанное

как $H_T = \beta \cdot W_{\text{ЭП}} / (c \cdot \rho)$, где β — температурный коэффициент линейного расширения, c — удельная теплоемкость и ρ — плотность меди. Разница между величинами H и H_T показывает вклад упругой деформации растяжения поверхностного слоя (ортогонально поверхности) в формирование рельефа при импульсном нагреве. Оценка точности метода, проведенная на уровне неровностей более $\lambda/20$, дала погрешность менее 20 % ($\lambda = 10.6$ мкм).

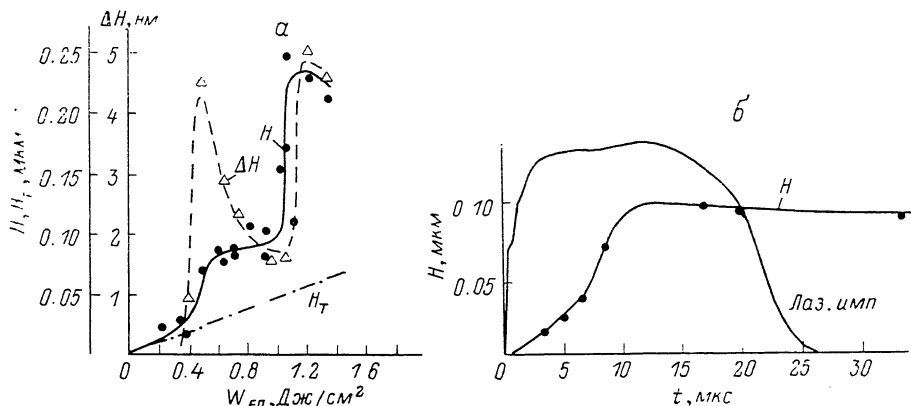


Рис. 2. Использование метода ножа Фуко для регистрации общей высоты подъема поверхности (H) в ходе импульсного нагрева на 20-й микросекунде (a) и в течение всего импульса взаимодействия (b) в зависимости от плотности энергии, поглощенной поверхностью за импульс ($W_{\text{ЭП}}$).

ΔH — высота микронеровностей, образовавшихся вследствие пластической деформации; H_T — общая высота рельефа, обусловленная только температурным расширением ортогонально поверхности (расчет).

В заключение отметим, что использованный метод позволил измерить в реальном масштабе времени среднюю высоту рельефа нагреваемой поверхности металла (рис. 2, б); оценить динамику микрорельефа поверхности в ходе упругопластического деформирования; подтвердить описанный в [3] характер изменения поглощательной способности металлической поверхности и особенности, связанные с появлением пластической деформации.

Список литературы

- [1] Оптический производственный контроль / Под ред. Д. Малакары. М.: Машиностроение, 1985. 400 с.
- [2] Лиуконен Р. А., Трофименко А. М. // Тез. докл. VII Всесоюз. конф. по взаимодействию оптического излучения с веществом. Л., 1988. С. 69.
- [3] Лиуконен Р. А., Трофименко А. М. // ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 8. С. 1602—1604.

Поступило в Редакцию
1 сентября 1988 г.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ СЦЕПЛЕНИЯ НЕМАТИЧЕСКОГО ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА ДУМЯ НЕЗАВИСИМЫМИ ТЕСТИРУЮЩИМИ МЕТОДАМИ

О. Д. Лаврентович, Т. Я. Марусий, Ю. А. Резников, В. В. Серган

Важной характеристикой анизотропного взаимодействия слоя нематического жидкого кристалла (НЖК) с граничащей средой является энергия сцепления W , которая определяется работой, требуемой для выведения директора п НЖК из задаваемого поверхностью равновесного положения. В настоящее время накоплен обширный материал по измерению W , однако разброс значений даже для одних пар НЖК поверхность достигает нескольких по-