

УДК 535.8 : 621.378

Г. В. Бакакин, П. Я. Белоусов, Ю. Н. Дубнищев,
В. Г. Меледин, Ю. А. Похальчук

(Новосибирск)

ФОТОМЕТРИЧЕСКИЙ СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ

Обсуждается способ измерения линейных размеров, заключающийся в сравнении световых потоков от пары перекрывающихся участков самосветящейся или освещенной поверхности объекта. Функциональная зависимость отношения площадей этих участков от искомого размера считается известной. При измерении световых потоков выполняется скользящее интегрирование в заданных пространственном и временном окнах за счет относительного движения поверхности и фотоприемного устройства. Усредненные энергетические светимости приравниваются, и размер определяется из решения полученного уравнения. Способ успешно опробован в промышленных условиях при измерениях в реальном времени поперечного размера горячего металлургического проката.

Введение. Проблема бесконтактных измерений линейных размеров обычно решается оптическими методами. В настоящее время для этого используются в основном проекционные и сканирующие оптические устройства [1]. В проекционных измерителях изображение краевых зон объекта формируют на матричном или линейном ПЗС-фотоэлементнике и измеряют искомым размер. Недостатком является значительная погрешность, возникающая вследствие изменений коэффициента передачи проекционной оптической системы при колебаниях объекта по оптической оси. Лазерные сканирующие устройства основаны на селекции и измерении импульсов затенения. Высокая стоимость и сравнительно малая надежность лазерных сканаторов в условиях длительной непрерывной эксплуатации ограничивают сферу их применения.

В [1] сообщается об оптическом способе, основанном на фотокомпенсационном сравнении двух световых потоков, один из которых частично перекрывается объектом, а другой — подвижной заслонкой, по положению которой при равенстве потоков определяется размер. Здесь предъявляются очень высокие требования к однородности и стабильности световых потоков. К общим недостаткам перечисленных способов следует отнести большие погрешности вследствие оптического влияния тепловых градиентов в воздухе, возникающих при измерении горячих объектов.

В настоящей работе обсуждается возможность фотометрических измерений линейных размеров, основанная на использовании самосвечения объекта или внешней подсветки без каких-либо специальных требований к стабильности и однородности светового потока от поверхности [2].

Описание метода. На рис. 1 приведена упрощенная функциональная схема, реализующая предлагаемый способ. На схеме показаны движущийся протяженный вдоль оси x объект 1 и измерительное устройство, содержащее объектив 2, расщепитель светового потока 3, полевые диафрагмы 4 и 5, фотоприемные устройства 6 и 7, к которым подключены соответственно измерители 8 и 9 фотометрических сигналов, и интегрированных в заданном временном окне. Выходы измерителей подсоединены к измерителю отношения сигналов 10, выход которого подключен ко входу измерителя 11, определяющего размер объекта по оси y .

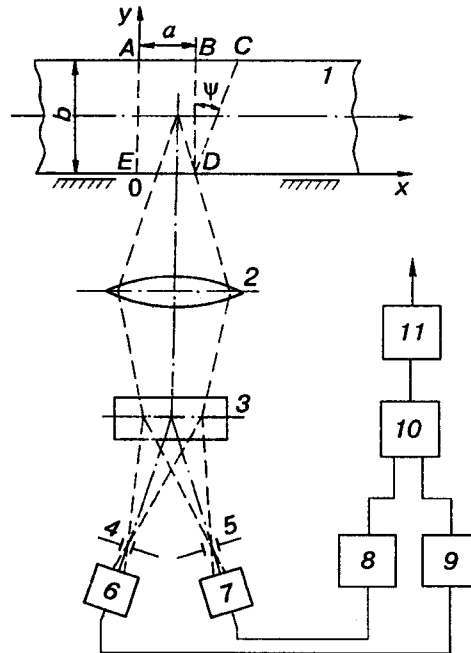


Рис. 1. Функциональная схема фотометрического измерителя линейных размеров

Устройство действует следующим образом. Изображение заданной области движущейся поверхности объекта 1 формируется объективом 2 через расщепитель светового потока 3 в плоскости полевых диафрагм 4 и 5. Световой поток, формирующий изображение, образуется за счет самосвечения поверхности либо за счет стороннего освещения когерентным или некогерентным излучением. Полевая диафрагма 4 селектирует в плоскости изображения площадку, оптически сопряженную с участком поверхности, ограниченным контуром $ABDE$. Соответственно полевая диафрагма 5 оптически сопряжена с контуром $ACDE$.

Контур $ABDE$ и $ACDE$ выбираются таким образом, чтобы отношение площадей, ограничиваемых ими, определялось известной функцией f текущего поперечного размера изделия:

$$\frac{S_1}{S_2} = f(b). \quad (1)$$

Здесь S_1 — площадь фигуры, ограниченной контуром $ACDE$; S_2 — площадь фигуры, ограниченной контуром $ABDE$; b — текущий размер объекта по оси y . Световой поток I_1 от площадки S_1 определяется пространственно-временным распределением энергетической светимости, интегрированной по пространственному окну S_2 и заданному временному окну τ :

$$I_1 = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^N \int_{s_1} \int_{t_i}^{t_i+\tau} \varphi[x - vt, y] dx dy dt. \quad (2)$$

Здесь $\varphi[x - vt, y]$ — энергетическая светимость поверхности площадки S_1 как функция пространственных координат x , y и времени t ; v — скорость движения поверхности вдоль оси x ; i — индекс, обозначающий порядковый номер временного интервала, в пределах которого осуществляется отсчет i -го измерения; N — общее число отсчетов в выборке.

По аналогии для светового потока I_2 от площадки S_2 , ограниченной контуром $ABDE$, имеем

$$I_2 = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^N \int_{S_2} \int_{t_i}^{t_i+\tau} g[x - vt, y] dx dy dt. \quad (3)$$

Здесь $g[x - vt, y]$ — энергетическая светимость поверхности в пределах площадки S_2 как функция пространственных координат x, y и времени t .

Выбор формы и расположения площадок S_1, S_2 , а также выбор временного окна τ исходит из требования, чтобы энергетические светимости, усредненные по пространственным окнам S_1, S_2 и временному окну τ , были одинаковы. Это условие реализуется, если площадки S_1 и S_2 выбраны так, чтобы при движении они пересекались одними и теми же элементами пространственной структуры поверхности. Усреднение по временному окну τ и пространственным окнам S_1 и S_2 сглаживает влияние различий в форме и расположении выделенных участков. Отсюда следует соотношение

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{I_{1i}}{I_{2i}}, \quad (4)$$

где I_{1i} и I_{2i} — световые потоки от площадок S_1 и S_2 , интегрированные во временном окне $(t_i; t_i + \tau)$. Поскольку S_1/S_2 есть известная функция от размера b_i , можно записать:

$$\frac{S_1}{S_2} = f(b_i), \quad (5)$$

где b_i — i -й отсчет линейного размера, соответствующий временному интервалу $(t_i; t_i + \tau)$ и определенный по длине vt .

Из (4) и (5) имеем

$$f(b) = \eta_i. \quad (6)$$

Здесь $\eta_i = \frac{I_{1i}}{I_{2i}}$.

Решая уравнение (6) относительно b_i , получаем искомый отсчет поперечного размера по оси y .

При колебаниях объекта вдоль оптической оси меняется коэффициент передачи оптической системы. Однако флуктуации коэффициента передачи в достаточно широком диапазоне не оказывают влияния на отношение как площадей пространственных окон S_1 и S_2 , проецируемых на поверхность измеряемого объекта, так и соответствующих световых потоков I_{1i} и I_{2i} .

В режиме допускового контроля площадка S_2 формируется фиксированным окном, задаваемым эталонным размером b_0 . Тогда уравнение (6) можно записать в виде

$$f(b_0 + \epsilon_i) = \eta_i, \quad (7)$$

где ϵ_i — отклонение размера от заданного значения в i -м сечении. Величина ϵ_i получается из решения уравнения (7). Если $\epsilon_i/b_0 \ll 1$, выражение (7) можно упростить, используя разложение функции f по малому параметру ϵ_i . В линейном приближении имеем

$$f(b_0) + \epsilon f'(b_0) = \eta_i,$$

отсюда

$$\epsilon_i = \frac{\eta_i - f(b_0)}{f'(b_0)}.$$

Основное требование, которому должен удовлетворять выбор контуров, ограничивающих площадки S_1 и S_2 , заключается в обеспечении однозначной функциональной зависимости отношения S_1/S_2 от искомого размера b . В частном случае, когда одна из площадок определяется фиксированным размером b_0 , эта зависимость с точностью до известного постоянного множителя описывается пространственным окном, соответствующим другой площадке.

На функциональной схеме, показанной в качестве примера на рис. 1, площадка S_1 выбрана в виде трапеции, высота которой $AE = b$, малое основание $ED = a$ и угол между высотой и стороной DC равен ψ . Для площадки S_1 имеем

$$S_1 = \frac{1}{2} (2a + b \operatorname{tg} \psi) b. \quad (8)$$

Соответственно площадка S_2 выбрана в виде прямоугольника $ABDE$ со сторонами $AE = BD = b$, $AB = DE = a$:

$$S_2 = ab. \quad (9)$$

Рассмотрим обычный на практике случай, когда нижняя кромка объекта колеблется по оси Oy и перемещается только по оси Ox на фиксированном уровне $y = 0$. На рис. 1 эта ситуация обозначена с помощью заштрихованных опор.

Из выражений (8) и (9) получаем для отношения площадей

$$\frac{S_1}{S_2} = 1 + \frac{b}{2a} \operatorname{tg} \psi. \quad (10)$$

Подставляя (10) в (5), получаем для i -го отсчета

$$1 + \frac{b_i}{2a} \operatorname{tg} \psi = \eta_i. \quad (11)$$

Решая уравнение (11) относительно b_i , находим

$$b_i = 2a(\eta_i - 1) \operatorname{ctg} \psi. \quad (12)$$

Например, для $\psi = 30^\circ$

$$b_i = 2\sqrt{3}a(\eta_i - 1).$$

Дифференциальная оценка влияния параметров a и ψ на относительную погрешность измерения следует из (12):

$$\frac{\delta b_i}{b_i} = \frac{\delta a}{a} + \frac{2\delta \psi}{\sin 2\psi}.$$

Таким образом, мы определили отсчет поперечного размера на i -м интервале длины.

Рассмотрим ситуацию, когда объект подвержен колебаниям по оси Oy . В этом случае предлагаемый способ реализуется посредством двух описанных выше измерительных каналов.

На рис. 2 показана функциональная схема, реализующая способ в случае поперечных колебаний объекта. Схема содержит движущийся по оси x протяженный объект 1, измерительные каналы 2 и 3, идентичные измерительному устройству, приведенному на рис. 1. К выходам измерителей 2 и 3 подключена суммирующая схема 4. Измерительное устройство 2 сравнивает световые потоки от площадок, ограниченные контурами $ACDE$ и $ABDE$, и измеряет величину b_{i1} , представляющую часть искомого поперечного размера b_i . Измеритель 3 сравнивает световые потоки от площадок, ограниченных соответ-

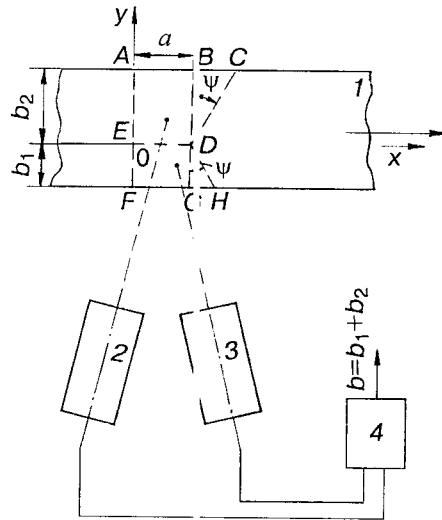


Рис. 2. Функциональная схема двухканального измерителя линейных размеров с компенсацией влияния колебаний объекта

ственно контурами $EDHF$ и $EDGF$, определяя часть b_{2i} искомого размера b_i . Сумма величин b_{1i} и b_{2i} дает значение измеряемого поперечного размера b_i :

$$b_i = b_{1i} + b_{2i}. \quad (13)$$

При этом вклад колебаний по оси y для величин b_{1i} и b_{2i} противоположен по знаку и при суммировании взаимно компенсируется.

Пусть, как и в случае, показанном на рис. 1, в каждом измерительном канале сравниваются световые потоки от площадок, ограниченных прямоугольником и трапецией. В первом измерительном канале это соответственно $ABDE$ и $ACDE$. Во втором измерительном канале имеем измерительную площадку в контуре $EDGF$ и трапецию в контуре $EDHF$. Отсюда на выходе измерителя 2, соответствующего первому каналу, согласно выражению (12), имеем

$$b_{1i} = 2a(\eta_i - 1)\text{ctg}\psi. \quad (14)$$

На выходе измерителя 3, соответствующего другому каналу, имеем по аналогии

$$b_{2i} = 2a(\tilde{\eta}_i - 1)\text{ctg}\psi. \quad (15)$$

Здесь $\tilde{\eta}_i = \frac{\tilde{I}_{1i}}{I_{2i}}$, \tilde{I}_{1i} и \tilde{I}_{2i} — световые потоки соответственно от трапециевидальной и прямоугольной площадок во втором измерительном канале.

Из (14) и (15) получаем для полного поперечного размера

$$b_i = b_{1i} + b_{2i} = 2a[\eta_i + \tilde{\eta}_i - 2]\text{ctg}\psi. \quad (16)$$

Например, для $\psi = 30^\circ$

$$b_i \cong 2\sqrt{3}a[\eta_i + \tilde{\eta}_i - 2].$$

Предлагаемый фотометрический способ реализован в виде действующего макета измерительного устройства с обработкой сигналов на персональном компьютере. На рис. 3 представлены результаты опытно-промышленного

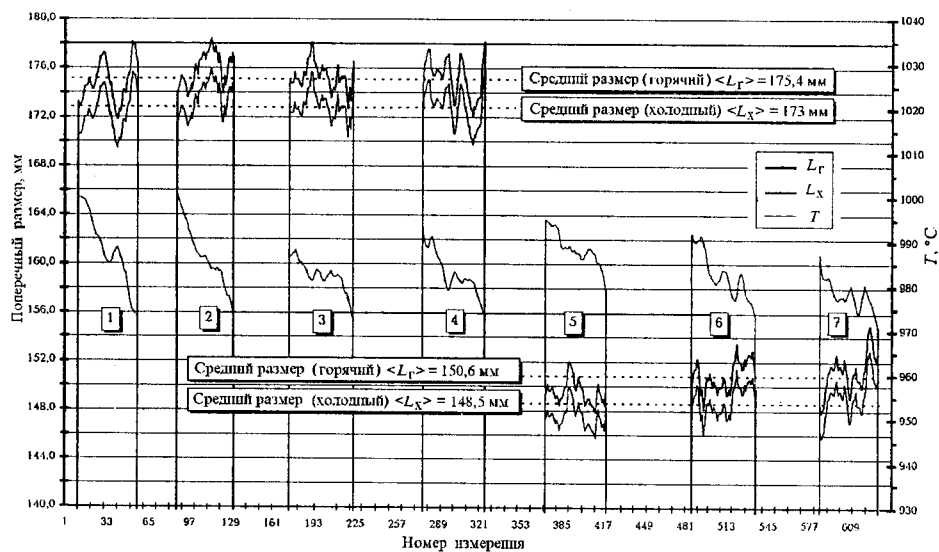


Рис. 3. Распределение поперечного размера металлургического проката в горячем и холодном состояниях (квадратный профиль)

опробования фотометрического измерителя поперечного размера горячего проката на одном из отечественных металлургических заводов. Измерения проводились на непрерывно-заготовительном прокатном стане. Показаны графики распределений результатов измерений поперечных размеров по длине раскатов горячих заготовок. На этом же рисунке приведено пересчитанное с учетом температуры распределение поперечных размеров в холодном состоянии. Длина раскатов 60 м. Номера раскатов 1—4 соответствуют серии с поперечным размером, приблизительно равным 175 мм, номера раскатов 5—7 относятся к серии с поперечным размером, приблизительно равным 150 мм. Шкала температур располагается справа, шкала размеров — слева. Результаты сравнивались с прямыми механическими измерениями поперечного размера движущегося раската, выполненными персоналом, эксплуатирующим прокатный стан. Относительная погрешность измерений не превышала 0,6 %.

Достоинства описанного фотометрического метода измерений линейных размеров — простота в реализации и надежность в работе. В случае горячих самосветящихся объектов это обеспечивается отсутствием необходимости во внешней подсветке и повышенной устойчивостью к оптическому влиянию тепловых градиентов в воздухе на процесс измерений. Последнее объясняется тем, что размер определяется посредством измерения отношения интегральных энергетических характеристик световых потоков, а фазовые возмущения от тепловых градиентов подавляются за счет скользящего интегрирования оптического сигнала в выбранных пространственных и временных окнах. Комбинированная схема, приведенная на рис. 2, повышает устойчивость к влиянию градиентов полей оптических неоднородностей в направлении оси u . Анализ статистических моделей, описывающих процесс измерений, будет приведен в последующих работах.

Заклучение. Предложен фотометрический метод измерения линейных размеров, заключающийся в том, что измеряют световые потоки от пары перекрывающихся участков самосветящейся или освещенной поверхности движущегося объекта с известной функциональной зависимостью отношения площадей этих участков от измеряемого размера, приравнивают усредненные энергетические светимости этих участков, измеренные в заданном временном окне, и находят искомый размер из решения полученного уравнения. Способ реализован в виде действующего макета и успешно опробован в промышлен-

ных условиях при измерении поперечных размеров горячего металлургического проката.

Область применения — научные исследования и промышленные технологии, связанные с необходимостью бесконтактного контроля линейных размеров.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ободан В. Я. Автоматический контроль размеров сечения сортового проката и труб. М.: Металлургия, 1985. С. 36.
2. Положительное решение на заявку № 15118044/28 (031666). Способ оптического измерения поперечного размера металлургического проката /Г. В. Бакакин, П. Я. Белоусов, Ю. Н. Дубнищев и др. Принято 21.03.97

Поступила в редакцию 25 июля 1996 г.
