

## КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ НАГРЕТОЙ ПРОВОЛОКИ В ПРОЦЕССЕ ВОЛОЧЕНИЯ

В. А. ПОРЕВ, А. С. ТОМАШУК

НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского». 03056, г. Киев-56, пр-т Победы, 37.

E-mail: a.tomashuk-2018@kpi.ua

В процессе волочения наиболее важным фактором, который отвечает за качество изготавливаемой продукции, является температурный режим изделия в момент его деформации. При горячем волочении проволоки используют предварительный ее нагрев в печи плавления. Такой подход необходим для получения изделий из тех металлов и сплавов, которые не поддаются холодному волочению. Нынешние методы и устройства контроля качества таких изделий в процессе их изготовления не предусматривают одновременный контроль более одного параметра. Нами предложен метод контроля одновременно двух параметров нагретой проволоки – диаметра и температуры в зоне ее предварительного нагрева. В качестве инструмента было предложено использовать телевизионную информационно-измерительную систему на КМОП-матрице. Такой подход обусловлен широким пространственным разрешением и большими возможностями этих систем. Кратко рассмотрены работы авторов предшествующего уровня техники. В соответствии с предложенным методом и поставленными задачами было разработано программное обеспечение для проведения измерений в режиме реального времени, также был разработан и собран экспериментальный стенд. Представлены результаты эксперимента, сделаны выводы. Библиогр. 11, табл. 1, рис. 2.

*Ключевые слова:* неразрушающий контроль, телевизионные информационно-измерительные системы, волочение, проволока, температурное поле, диаметр, теневой метод

Телевизионные информационно-измерительные системы (ТИИС) на основе приборов с зарядовой связью и приборов, изготовленных по технологии комплементарной структуры металл-оксид полупроводник (матриц ПЗС и КМОП), широко используются в научных исследованиях и промышленности. Такие системы способны измерять энергетические, динамические и геометрические характеристики объектов.

Контроль двух параметров – температурной карты и линейных размеров, приводит к более детальной информации, поступающей от объекта, что делает, к примеру, технологический процесс изготовления изделий в режиме реального времени (РРВ) более устойчивым и предполагает меньшее количество брака.

Важно отметить тот факт, что при несоблюдении технологического процесса изделие может содержать внутренние дефекты, хотя проконтролированные линейные размеры были в зоне допуска [1].

**Анализ литературных данных и постановка проблемы.** Известны работы, целью которых был одновременный контроль диаметра и температуры таких протяженных объектов, как проволока и труба [2, 3].

В основе измерений линейных размеров положен подсчет отдельных пиксел по заданному порогу яркости на профиле изображения по ширине кадра (измерительный контур). Такой метод, при котором за линейный размер объекта принимается сумма пиксел его изображенной тени, называется

ся теневым. Данный метод достаточно прост и не требует дополнительных операций с изображением, что значительно уменьшает время выполнения процесса измерения.

В вышеуказанных работах [2, 3] применялась предобработка изображения по методу Кэнни, и велся подсчет отдельных пиксел в бинарном изображении, на котором выделены контуры объекта.

В работе [3] условная температура определялась на основе яркости отдельных пиксел и сопоставлялась со значениями термодпары. При этом оптическая система (ОС) измерительного прибора имела в своей конструкции широкополосный светофильтр, пропускающий короткие длины волн инфракрасной области.

Следует заметить, что в большинстве работ, посвященных измерению поперечных сечений объектов, применяется предобработка изображения для выделения их контуров [4–6].

На данное время не существует метода контроля параметров протяженных изделий, при котором одновременно ведется контроль температурной карты и линейных размеров объекта с минимальной задержкой на выполнение алгоритма измерения в РРВ.

**Цель и задачи исследования.** Целью данного исследования являлось усовершенствование метода контроля параметров проволоки в процессе изготовления в режиме реального времени.

Для достижения поставленной цели требовалось решить следующие задачи:

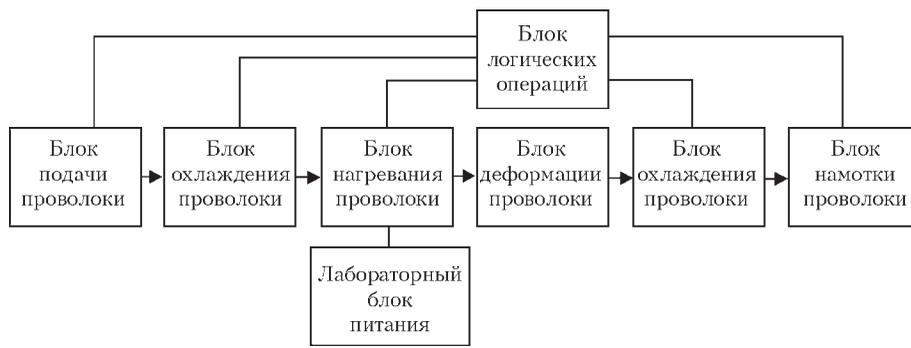


Рис. 1. Схема экспериментального стенда

- разработка метода для одновременного изменения двух параметров объекта;
- разработка программного обеспечения;
- разработка экспериментального стенда и проведение исследований.

**Исследуемые материалы и оборудование, которое использовалось в эксперименте.** Нами разработан и собран стенд, в котором нагрев участка проволоки (NiCr) диаметром 2,5 мм осуществлялся электроконтактным способом с помощью лабораторного блока питания. На рис. 1 показана схема экспериментального стенда, а на рис. 2 – его общий вид.

Конструкция ТИИС включала следующие компоненты:

- объектив с оптической схемой типа «Планар»;
- узкополосный интерференционный светофильтр, выделяющий длину волны 622,8 нм;
- модуль камеры с КМОП-матрицей (максимальное разрешение матрицы составляет 1280×960 пиксел, однако в эксперименте для большей частоты измерений использовалось 640×480);
- систему охлаждения КМОП-матрицы на основе элемента Пельтье.

Для измерения действительной температуры проволоки использовался промышленный радиационный пирометр.

Разработанное программное обеспечение выводило на экран всю необходимую информацию: уровни сигналов, распределение яркости на измерительном контуре (профиле изображения), диаметр проволоки.

**Метод измерения диаметра и условной температуры.** Пирометрия объекта должна вестись исходя из возможностей ТИИС, и зависит она в большей степени от линейного участка светосигнальной характеристики приемника излучения [7, 8]. Как и в работе [9] для измерений мы использовали информацию только с красного канала.

Формула вероятности появления на изображении пиксела со значением яркости (гистограмма изображения) выражается [10]:

$$p_r(r_k) = \frac{n_k}{MN}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, L-1, \quad (1)$$

где  $MN$  – общее количество пикселей изображения;  $n_k$  – количество пикселей с яркостью  $r_k$ ;  $L$  – максимальное допустимое число градаций яркости (г. я.) на изображении (256 г. я. для 8-битового изображения).

На построенной гистограмме изображения имеется самый высокий пик, соответствующий освещению, испускаемому нагретым объектом, которое проявляется в фоновой части изображения. Однако такой пик имеет достаточно низкий уровень сигнала (выражается в г. я.), поэтому целесообразно использовать пороговое значение для исключения области, в которой он находится. И так как такой сигнал меньше полезного сигнала (на линейном участке светосигнальной характеристики приемника) и находится в участке низкочастотных шумов, пороговое значение будет лежать на их границе.

Сигнал  $A_{\text{hist max}}$ , характеризующийся высоким пиком на гистограмме изображения, и его близкие яркостные значения можно считать условной температурой объекта, которую в дальнейшем за законами яркостной пирометрии можно пересчитать в действительную температуру.

Яркость пиксела (области пикселей) выше фиксированного значения на изображении объекта может представлять собой завышенную температуру, для яркости пиксела ниже фиксированно-

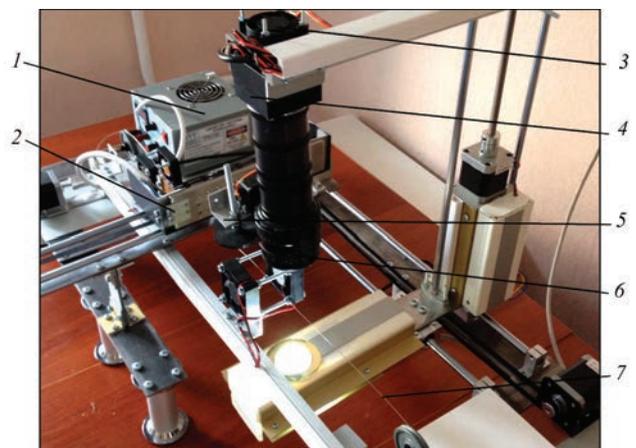


Рис. 2. Экспериментальный стенд: 1 – лабораторный блок питания; 2 – печь; 3 – система охлаждения КМОП-матрицы; 4 – корпус камеры; 5 – сервопривод для изменения диаметра зрачка диафрагмы; 6 – объектив; 7 – проволока

го значения – заниженную. Таким образом, можно определить распределение температуры по поверхности объекта (температурную карту).

Для измерения диаметра проволоки обычно используют только суммирование пикселей, которые отвечают изображению объекта. Фактически любое незначительное изменение яркости на граничном пикселе, который отвечает за кривую перехода изображения объекта в фон, может нарушить погрешность измерения на один физический размер пикселя (элемента матрицы). В том случае, если речь идет об элементах матрицы с малыми размерами (менее 4 мкм), то на практике можно получить результат погрешности, явно превышающий суммы нескольких физических размеров таких элементов.

В связи с этим нами было предложено использовать следующий метод, который уменьшает погрешность измерений диаметра при длительном наблюдении.

На выбранном измерительном контуре, взятом по центру ширины изображения, определялись наибольший и наименьший уровни присутствующих сигналов  $A_{\max}$  (объект) и  $A_{\min}$  (фон). Эти сигналы представляют соответствующие высокие пики на гистограмме изображения, которая построена для выбранного измерительного контура. Во всех случаях наименьший уровень сигнала  $A_{\min} = 0$ .

Порог уровня сигнала, на котором происходило измерение диаметра, определялся половиной значения  $A_{\max}$ .

Вместо традиционного суммирования пиксел, соответствующих изображению объекта, мы выходим за грани дискретности изображения и тем самым производим процесс измерения в участке, где уровень сигнала следующего пикселя выше заданного порогового значения. Формула, описывающая данный способ для предварительно отсортированных пиксел по значению яркости, выглядит следующим образом [11]:

$$D = \sum N(T) + \frac{(A_n - T)b}{A_n - A_{n-1}}, \quad (2)$$

где  $N(T)$  – пиксел со значением яркости, который не превышает соответствующий порог уровня сигнала  $T$ ;  $n$  и  $n-1$  – соседние пиксели по обе стороны от пересеченной пограничной кривой измерительной линией на соответствующем пороге

**Результаты эксперимента**

Данные эксперимента	$A_{\text{hist max}}$ , г. я.	$A_{\text{max}}$ , г. я.	$D$ , мм	$T$ , °C
$X_{\text{mid}}$	172	181	2,51	629,5
$X_{\text{max}}$	192	202	2,52	637
$X_{\text{min}}$	152	161	2,51	622
$\sigma$	6,84	7,68	0,01	2,3
$\Delta X$	40	41	0,01	15

уровня сигнала  $T$ , которые в свою очередь создают сторону  $b$  треугольника, равную константе 1;  $A_n$  и  $A_{n-1}$  – значения уровней сигналов конкретных пиксел.

В программной реализации выход за грани квантования изображения отдельных градаций яркости также произведен и для порогового значения.

Линейный размер со значений в пикселях переводился в метрическую систему, исходя из физического линейного размера пикселя и заранее прокалиброванного масштаба изображения.

**Описание хода эксперимента.** В ходе эксперимента при каждой итерации в соответствии с предложенным методом получали результаты диаметра, максимальных значений яркости, высокого пика на гистограмме изображения – яркости условной температуры. Интервал между итерациями был задан в 20 мс. С интервалом в 250 итераций записывался результат измеренной температуры проволоки, снятый радиационным пирометром.

Время эксперимента составляло 30 мин.

Результатами стали рассчитанные среднее значение  $X_{\text{mid}}$ , среднеквадратическое отклонение  $\sigma$  и разница  $\Delta X$  между наибольшим  $X_{\text{max}}$  и наименьшим  $X_{\text{min}}$  измеренными значениями.

**Результаты эксперимента.** Действительный интервал между итерациями был больше за счет выполнения программных алгоритмов, и по нашим подсчетам, исходя из данных эксперимента, составил  $t_{\text{итерации}} \approx 31,5$  мс. Остальные данные проведенного эксперимента: время эксперимента  $t$ , мин – 31; количество итераций  $i$  – 59117.

Результаты эксперимента приведены в таблице.

Действительная температура нагретой проволоки при статической нагрузке лабораторного блока питания была изменчива во времени. Разница температур за время эксперимента была 15 °C, что также отразилось и на значениях  $A_{\text{max}}$  и  $A_{\text{hist max}}$ , разница которых ограничивалась 40 г. я. Среднеквадратическое отклонение в случае  $A_{\text{hist max}}$  явно меньше по сравнению с  $A_{\text{max}}$ , что говорит об устойчивом распределении значений измеренной температуры.

Разница наибольшего и наименьшего значений измеренного диаметра составила  $\Delta X = 0,01$  мм.

**Выводы**

Усовершенствован метод контроля параметров проволоки в процессе волочения в режиме реального времени.

Результаты лабораторного эксперимента показали пригодность предложенного метода для одновременного измерения диаметра и температуры нагретой проволоки и, следовательно, данный метод может быть использован для контроля проволоки в процессе волочения.

## Список литературы

1. Перлин И. Л., Ерманок М. З. (1971) *Теория волочения*. Москва, Металлургия.
2. He Y., Liu X. et al. (2012) Rectifying control of wire diameter during dieless drawing by a deformation measuring method of interframe displacement *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 19 (7), 615–621.
3. Supriadi S., Furushima T., Manabe K. (2012) Real-time process control system of dieless tube drawing with an image processing approach. *Materials Transactions*, 53 (5), 862–869.
4. Kumar D. K., Aliahmad B. et al. (2013) A method for visualization of fine retinal vascular pulsation using nonmydriatic fundus camera synchronized with electrocardiogram. *ISRN Ophthalmology*, 2013, 1–9.
5. Ziabari M., Mottaghitalab V. et al. (2007) A new image analysis based method for measuring electrospun nanofiber diameter *Nanoscale Res Lett. Nano perspectives*, 2 (12), 597–600.
6. Oznergiz E., Kiyak Y. E. et al. (2014) Automated nanofiber diameter measurement in SEM images using a robust image analysis method. *Journal of Nanomaterials*, 2014, 1–6.
7. Порев В. А. (2015) *Телевізійні інформаційно-вимірвальні системи*. Київ, НТУУ «КПІ».
8. Шреддер Г., Трайнер Х. (2006) *Техническая оптика*. Москва, Техносфера.
9. Славков В. М., Давиденко О. П. (2015) Тепловий неруйнівний контроль та спосіб формування теплових полів на металевих пластинах. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 3, 39–45.
10. Гонсалес Р. С., Вудс Р. С. (2012) *Цифровая обработка изображений*: изд. 3-е. Москва, Техносфера.
11. Томашук О. С., Федоренко А. В. та ін. (2017) Вдосконалення методики вимірювання та контролю дроту системами технічного зору. *Всеукраїнська наукова Інтернет-конференція «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення»*, вип 20. Тернопіль, Тайп, 95–98.

## References

1. Perlin, I.L., Ermanyuk, M.Z. (1971) *Drawing theory*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
2. Hew, Y., Liu, X. et al. (2012) Rectifying control of wire diameter during dieless drawing by a deformation measuring method of interframe displacement. *Int. J. of Minerals, Metallurgy and Materials*, 19(7), 615–621.
3. Supriadi, S., Furushima, T., Manabe, K. (2012) Real-time process control system of dieless tube drawing with an image processing approach. *Mater. Transact.*, 53(5), 862–869.
4. Kumar, D.K., Aliaahmad, B. et al. (2013) A method for visualization of fine retinal vascular pulsation using nonmydriatic fundus camera synchronized with electrocardiogram. *ISRN Ophthalmology*, 2013, 1–9.
5. Ziabari, M., Mottaghitalab, V. et al. (2007) A new image analysis based method for measuring electrospun nanofiber diameter. *Nanoscale Res. Lett.* 2(12), 597–600.
6. Oznergiz, E., Kiyak, Y.E. et al. (2014) Automated nanofiber diameter measurement in SEM images using a robust image analysis method. *J. of Nanomaterials*, 2014, 1–6.
7. Porev, V.A. (2015) *Television information and measuring systems*. Kyiv, NTUU KPI [in Ukrainian].
8. Shredder, G., Trainer, H. (2006) *Optical engineering*. Moscow, Tekhnosfera [in Russian].
9. Slaykov, V.M., Davidenko, O.P. (2015) Thermal non-destructive testing and method of formation of thermal fields on metal plates. *Tekhn. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 3, 39–45 [in Russian].
10. Gonzalez, R.S., Woods, R.S. (2012) *Digital image processing*. 3rd ed. Moscow, Tekhnosfera [in Russian].
11. Tomashuk, O.S., Fedorenko, A.V. et al. (2017) Improvement of method for measurement and control of wire by machine vision systems. *In: All-Ukrainian Internet-Conf. on Information Society: Technological, economical and technical aspects of formation*, 20, Ternopil, Tajp, 95–98.

В. А. ПОРЕВ, А. С. ТОМАШУК

НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ-56, пр-т Перемоги, 37. E-mail: a.tomashuk-2018@kpi.ua

## КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРІВ НАГРІТОГО ДРОТУ В ПРОЦЕСІ ВОЛОЧІННЯ

В процесі волочіння найбільш важливим фактором, який відповідає за якість продукції, що виготовляється, є температурний режим виробу в момент його деформації. При гарячому волочінні дроту використовують попереднє його нагрівання в печі плавлення. Такий підхід необхідний для отримання виробів з тих металів і сплавів, які не піддаються холодному волочінню. Нинішні методи і пристрої контролю якості таких виробів в процесі їх виготовлення не передбачають одночасний контроль більше одного параметра. Нами запропонований метод контролю одночасно двох параметрів нагрітого дроту – діаметра і температури в зоні його попереднього нагрівання. Як інструмент було запропоновано використовувати телевізійну інформаційно-вимірвальну систему на КМОП-матриці. Такий підхід обумовлений широкою просторовою здатністю та багатьма можливостями цих систем. Коротко розглянуті роботи авторів попереднього рівня техніки. Відповідно до запропонованого методу і поставлених завдань, було розроблено програмне забезпечення для проведення вимірювань в режимі реального часу, також був розроблений і зібраний експериментальний стенд. Представлено результати експерименту, зроблено висновки. Бібліогр. 11, табл. 1, рис. 2.

Ключові слова: неруйнівний контроль, телевізійні інформаційно-вимірвальні системи, волочіння, дріт, температурне поле, діаметр, тіньовий метод

## CONTROL OF PARAMETERS OF HEATED WIRE IN PROCESS OF DRAWING

V. A. POREV, A. S. TOMASHUK

NTUU "Igor Sikorsky KPI". 37 Pobedy ave., Kiev-56, 03056. E-mail: a.tomashuk-2018@kpi.ua

The most important factor for drawing process, which is responsible for quality of manufactured products, is a temperature mode in the moment of its deformation. The wire is pre-heated in a melt furnace during hot drawing. Such an approach is necessary for manufacturing the products of the metals and alloys, which can not be subjected to cold drawing. Current methods and quality control devices for such products do not provide control of more than one parameter in process of their manufacture. Our control method allows controlling simultaneously two parameters of the heated wire, namely diameter and temperature in zone of its pre-heating. TV information-measurement system based on CMOS-matrix was proposed as an instrument. Such an approach is caused by wide spatial resolution and large possibilities of these systems. Prior art works of different authors were considered in short. Software for real-time measurements as well as experimental bench were developed and assembled in accordance with the proposed method and stated problems. The results were presented and the conclusions were made. 11 Ref., 1 Tabl., 2 Fig.

Keywords: non-destructive testing, TV information-measurement systems, drawing, wire, temperature field, diameter, shadow method

Поступила в редакцію  
06.10.2016