ISSN: 0368–0797. Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2016. Том 59. № 5. С. 318 – 321.
© 2016. *Бородин А.А., Кабулова Е.Г., Положенцев К.А.*

УДК 621.31

АНАЛИЗ ПОЛУЧАЕМОГО ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОТКЛОНЕНИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРИ ПЕРЕПЛАВЕ РАСХОДУЕМЫХ ЭЛЕКТРОДОВ В ВАКУУМНОЙ ДУГОВОЙ ПЕЧИ

Бородин А.А.[1], *магистрант*
Кабулова Е.Г.[2], *к.т.н., доцент, зав. кафедрой высшей математики*
Положенцев К.А.[2, 3], *старший мастер по ремонту цеха КИПиА, аспирант* (kirill.polozhentsev@gmail.com)

[1] **Московский государственный машиностроительный университет**
(107023, Россия, Москва, ул. Б. Семеновская, 38)
[2] **Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова, филиал НИТУ МИСиС**
(309516, Россия, Белгородская обл., Старый Оскол, микрорайон Макаренко, 42)
[3] **ОАО «Металлургический завод «Электросталь»**
(144002, Россия, Электросталь, Московская обл., ул. Железнодорожная, 1)

Аннотация. Предложены способы определения отклонений технологического процесса вакуумного дугового переплава. На вакуумной дуговой печи устанавливаются видеокамеры для контроля процессом переплава. Системы автоматизированного управления переплавом обычно измеряют только нужные для непосредственного управления величины, по которым в ряде случаев невозможно определить возникновение специфических неноминальных режимов плавки. Однако сталевар по изображению с видеокамер способен определить и устранить их. Получаемое изображение разбивается на кадры. Каждый кадр – это матрица, состоящая из пикселей. Используя сумму пикселей получаемого изображения, можно определить неноминальные режимы переплава. В работе предлагаются алгоритмы обработки видеоизображений для обнаружения неноминальных режимов плавки.

Ключевые слова: вакуумная дуговая печь, видеокамера, ионизация, короткая дуга, яркость изображения, матрица пикселей, скорость изменения яркости изображения, сумма пикселей, вектор-строка, видеоизображение, слиток, расходуемый электрод.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-5-318-321

Вакуумная дуговая печь – электрическая печь для плавки металлов в вакууме энергией электрической дуги. Печь применяется для переплава металла в вакууме для улучшения свойств и чистоты получаемого в процессе переплава слитка (рис. 1).

С другой стороны вакуумная дуговая печь – газоразрядная система, где электрическая дуга существует на поверхности переплавляемого металла и получаемого слитка *2*. Переплавляемый электрической дугой металл называют электродом *1*. Он крепится к подвижному механическому штоку *4*. Для вертикального перемещения штока с зажатым электродом печь имеет электродвигатель постоянного тока *3*. При подаче постоянного тока между электродом (катод) и кристаллизатором (анод) возникает электрическая дуга. Выделяющееся тепло расплавляет электрод, жидкий металл стекает в кристаллизатор *5*, образуя слиток.

В соответствии с существующей технологией электрод при переплаве должен поддерживаться на высоте 10 – 20 мм над расплавом.

На вакуумной дуговой печи для наблюдения за процессом переплава установлены видеокамеры в соответствии с рис. 2.

Вакуумная камера состоит из верхней части *1* и нижней части (кристаллизатор) *2*. Во время наведения «жидкой» ванны происходит начало наплавления слитка *3*. При переплаве расходуемого электрода *4* увеличивается уровень наплавляемого слитка. Перемещая шток *5* с расходуемым электродом, производится регулирование межэлектродного расстояния. С помощью видеокамер *6* снимается видеоизображение процесса переплава и передается обработчику изображений.

Опытный сталевар по видеоизображению, получаемому с видеокамер, может определить, что происходит с процессом переплава в данный момент внутри печи. В видеоизображении содержится необходимая информация для того, чтобы производить переплав в вакуумных дуговых печах.

В данной работе рассмотрен способ определения ионизации короткой дуги и затягивание шлаком «жидкой» ванны металла с помощью получаемого изображения с видеокамер.

Способ построен на определении яркости получаемого изображения. Как известно, каждое изображение состоит из пикселей разного цвета. Пиксель по своей структуре представляет совокупность трех цветов:

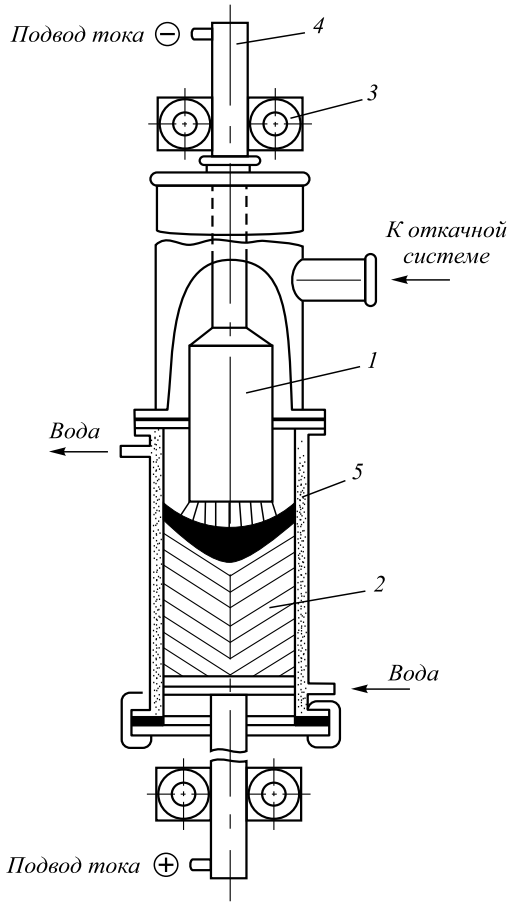

Рис. 1. Схема дуговой вакуумной электропечи с кристаллизатором

Fig. 1. Scheme of the vacuum arc furnace

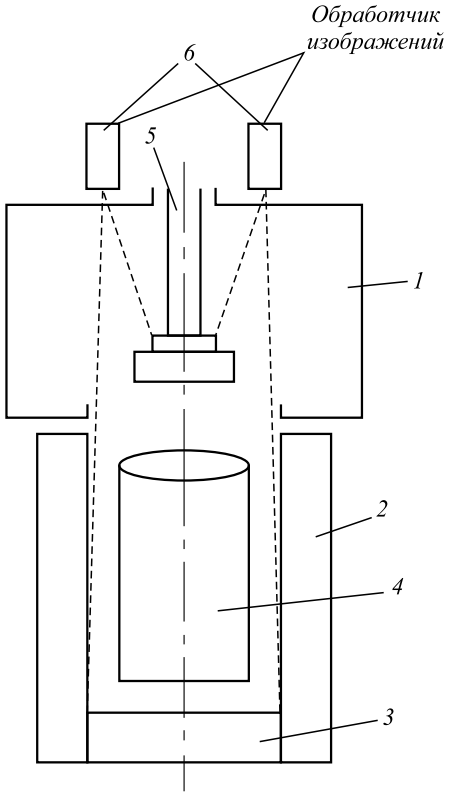

Рис. 2. Схема расположения видеокамер на вакуумной дуговой печи

Fig. 2. Scheme of the video cameras location on the vacuum arc furnace

красного, синего и зеленого, а так же значение яркости, итого четыре переменные. С другой стороны, пиксель является вектор-строкой, состоящей из четырех чисел, следовательно сумма четырех чисел дает значение, которое и определяет пиксель. Цветовой диапазон строится следующим образом: пиксель черного цвета имеет наименьшую сумму четырех чисел, которая стремится к нулю, и наоборот, сумма чисел будет максимальной, если пиксель имеет белый цвет.

Каждое получаемое видеоизображение состоит из 24 кадров, а кадр представляет собою матрицу пикселей, равную размерам получаемого изображения. В свою очередь матрица пикселей представляет матрицу чисел, где каждое число – это сумма всех значений каждого вектора сроки.

Сумму всех пикселей кадра запишем в следующем виде:

$$Z(t) = \sum_{q=0}^{n} \sum_{w=0}^{m} M_{q,w}(t), \qquad (1)$$

где $Z(t)$ – сумма всех пикселей кадра в текущий момент времени; n, m – размеры получаемого кадра согласно разрешению матрицы видеокамеры; $M_{q,w}$ – матрица пикселей кадра.

Скорость изменения суммы всех пикселей кадра:

$$v_{\text{изо}}(t) = \frac{Z(t) - Z(t - \Delta t_{\text{изо}})}{\Delta t_{\text{изо}}}, \qquad (2)$$

где $Z(t - \Delta t_{\text{изо}})$ – сумма всех пикселей за прошедший момент времени; $\Delta t_{\text{изо}}$ – время приращения, с.

Фильтрованное значение скорости изменения суммы всех пикселей кадра $v_{\text{изоф}}(t)$:

$$T\dot{v}_{\text{изоф}} + v_{\text{изоф}}(t) = v_{\text{изо}}(t). \qquad (3)$$

Производная $\dot{v}_{\text{изоф}}$ рассчитывается неявным способом.

Ускорение изменения суммы всех пикселей кадра:

$$a_{\text{изо}}(t) = \frac{v_{\text{изоф}}(t) - v_{\text{изоф}}(t - \Delta t_{\text{изоф}})}{\Delta t_{\text{изоф}}}, \qquad (4)$$

где $v_{\text{изоф}}(t - \Delta t_{\text{изоф}})$ – фильтрованное значение скорости изменения суммы всех пикселей кадра за прошедший момент времени; $\Delta t_{\text{изоф}}$ – время приращения, с.

Исследуя кадры, получаемые с видеокамер, можно сделать следующие выводы:

– если переплав идет на короткой дуге, то изображение на кадре начинает затухать согласно изображению, представленному в соответствии с рис. 3, 4;
– появление такого негативного явления как ионизация сопровождается кратковременными вспыш-

ками света, которые осветляют кристаллизатор, слиток и расходуемый электрод, а затем начинают гаснуть в соответствии с изображением, представленном на рис. 4.

Если значение переменной $v_{изо}(t)$ начинает удовлетворять условию $v_{изоф}(t) < v_{крит}$ дольше 3 с, где $v_{крит}$ – критическая скорость изменения суммы всех пикселей кадра, вычисленная опытным путем, то это свидетельствует о том, что имеет место короткая дуга. В этом случае сигнал с обработчика изображения поступает на регулятор печи, который начинает медленно растягивать дугу, пока значение $v_{изоф}(t)$ не будет удовлетворять условию $v_{изоф}(t) > 0$, а затем продолжает переплав по заданной программе.

Если же переменная $a_{изо}(t)$ скачкообразно увеличивается, удовлетворяя условию $a_{изо}(t) > a_{крит}$, где $a_{крит}$ – критическое ускорение изменения суммы всех пикселей кадра, вычисленное опытным путем, то это свидетельствует о наличие ионизации. Обработчик изображения подает сигнал об ионизации и регулятор печи начинает процесс по устранению данного явления.

Выводы. Разработанная система:

– снижает производственный брак от ионизации и переплава на короткой дуге;
– повышает качество получаемого слитка, делая его конкурентноспособным на рынке металлопродукции;
– дает возможность устаревшему оборудованию производить продукцию наравне с современными сталеплавильными установками.

Полученные результаты дадут возможность в дальнейшем быстро исправлять отклонения от технологического процесса, что позволит определять возможные случаи образования брака.

Рис. 3. Короткая электрическая дуга

Fig. 3. Short electric arc

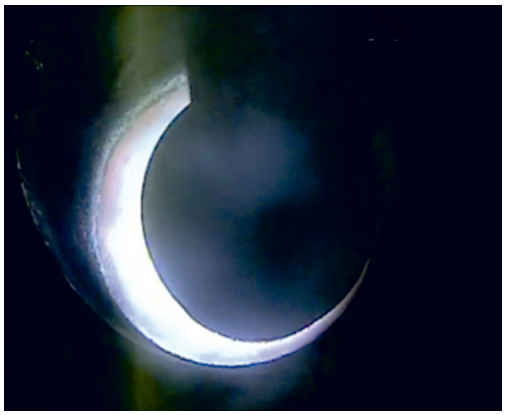

Рис. 4. Короткая электрическая дуга, сильная ионизация

Fig. 4. Short electric arc and the strong ionization

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Dednev A.A., Kisselman M.A., Nekhamin S.M. etc. Modernization of the control system and the electrical equipment of DSV vacuum arc furnaces // Russian Metallurgy (Metally). 2010. Vol. 2010. No. 6. P. 517 – 521.
2. C. Rigel Woodside, Paul E. King, Chris Nordlund. Arc Distribution During the Vacuum Arc Remelting of Ti-6Al-4V // Metallurgical and Materials Transactions B. 2013. Vol. 44. No. 1. P. 154 – 165.
3. Gerasimov A. V., Dednev A. A., Elizarov V. A. etc. Vacuum arc furnace for the production of composite ingots // Russian Metallurgy (Metally). 2014. Vol. 2014. No. 12. P. 940 – 944.
4. Shevchenko D. M., Ward R. M. The Role of Side Arcing in the Global Energy Partition during Vacuum Arc Remelting of INCONEL 718 // Metallurgical and Materials Transactions B. 2009. Vol. 40. No. 3. P. 248 – 253.
5. Ling Liu, M. Tamer Özsu. Data Types: Image, Video, Pixel, Voxel, Frame. Springer US, 2009. – 647 p.
6. Uwe Meyer-Baese. Image and video processing. In: Digital signal processing with field programmable gate arrays. P. 739 – 794.
7. Shengping Zhang, Huiyu Zhou, Baochang Zhang etc. Semantic representations for social behavior analysis in video surveillance systems // Signal, Image and Video Processing. 2014. December. Vol. 8. No. 1. Supplement. P. 73 – 74.
8. Seiichi Gohshi. A new signal processing method for video image-reproduce the frequency spectrum exceeding the nyquist frequency using a single frame of the video image // The Era of Interactive Media. 2013. P. 593 – 604.
9. Tao Mei, Bo Yang, Shi-Qiang Yang, Xian-Sheng Hua. Video collage: presenting a video sequence using a single image // The Visual Computer. 2009. Vol. 25. Issue 1. P. 39 – 51.
10. Romildo José da Silva, Jonas Gomes, Luiz Velho. Segmentation of video sequences using volumetric image processing. Multimedia ’99. Eurographics, 2000. P. 13 – 22.
11. Pekka Paalanen, Joni-Kristian Kämäräinen, Heikki Kälviäinen. Image based quantitative mosaic evaluation with artificial video. Image Analysis // Lecture Notes in Computer Science. 2009. Vol. 5575. P. 470 – 479.
12. Glaz A.B., Smolyaninov V.V. A method of video image enhancement // Automatic Control and Computer Sciences. 2009. Vol. 43. No. 1. P. 51 – 56.
13. King Ngi Ngan, Qian Zhang. Multiview image segmentation and video tracking // Video Segmentation and Its Applications. 2011. P. 117 – 143.
14. Che-Chun Su, Anush Krishna Moorthy, Alan Conrad Bovik. Visual quality assessment of stereoscopic image and video: challenges, advances, and future trends // Visual Signal Quality Assessment. 2015. P. 185 – 212.
15. Michael S. Lew, Nicu Sebe, John P. Eakins. Challenges of image and video retrieval. Image and video retrieval // Lecture Notes in Computer Science. 2002. Vol. 2383. P. 1 – 6.

Поступила 14 мая 2015 г.

Izvestiya VUZov. Chernaya Metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 2016. Vol. 59. No. 5, pp. 318–321.

METHOD FOR DETERMINING THE DEVIATIONS OF TECHNOLOGICAL PROCESS FOR REMELTING THE CONSUMABLE ELECTRODES IN A VACUUM ARC FURNACE BY THE VIDEO IMAGE

A.A. Borodin [1]***, E.G. Kabulova*** [2]***, K.A. Polozhentsev*** [2, 3]

[1] Moscow State University of Mechanical Engineering, Moscow, Russia
[2] Stary Oskol Technological Institute of National University of Science and Technology "MISIS", Stary Oskol, Russia
[3] JSC "Metallurgical Plant "Electrostal", Elektrostal, Russia

Abstract. The paper suggests ways to determine the deviations of technological process of vacuum arc remelting. Video cameras were installed in the vacuum arc furnace to monitor the refining process. Typically, the automated control system of remelting measure only the desired quantities for direct control, by which in some cases it is impossible to determine the occurrence of specific abnormal conditions of melting. The steelmaker can detect and eliminate them with the usage of the images from the camera. The resulting image is divided into shots. Each shot is a matrix composed of pixels. Using the amount of pixels of the image the specific abnormal remelting modes can be determined. The authors have proposed video processing algorithms to detect the abnormal melting modes.

Keywords: vacuum arc furnace, video camera, ionization, short arc, image brightness, pixel matrix, rate of change of the image brightness, sum of pixels, row-vector, video image, ingot, consumable electrode.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-5-318-321

REFERENCES

1. Dednev A.A., Kisselman M.A., Nekhamin S.M., Kalinin V.I., Koshelev Yu.N. Modernization of the control system and the electrical equipment of DSV vacuum arc furnaces. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2010, vol. 2010, no. 6, pp. 517–521.
2. C. Rigel Woodside, Paul E. King, Chris Nordlund. Arc distribution during the vacuum arc remelting of Ti-6Al-4V. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2013, vol. 44, no. 1, pp. 154–165.
3. Gerasimov A.V., Dednev A.A., Elizarov V.A., Kisselman M.A., Nekhamin S.M. Vacuum arc furnace for the production of composite ingots. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2014, vol. 2014, no. 12, pp. 940–944.
4. Shevchenko D.M., Ward R.M. The Role of Side Arcing in the Global Energy Partition during Vacuum Arc Remelting of INCONEL 718. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2009, vol. 40, no. 3, pp. 248–253.
5. Ling Liu, M. Tamer Özsu. *Data types: image, video, pixel, voxel, frame*. Springer US. 2009, p. 647.
6. Uwe Meyer-Baese. Image and video processing. In: *Digital signal processing with field programmable gate arrays*. 2014, pp. 739–794.
7. Shengping Zhang, Huiyu Zhou, Baochang Zhang, Zhenjun Han, Yuliang Guo. Semantic representations for social behavior analysis in video surveillance systems. *Signal, Image and Video Processing*. December 2014, vol. 8, no. 1 supplement, pp. 73–74.
8. Seiichi Gohshi. A new signal processing method for video image-reproduce the frequency spectrum exceeding the nyquist frequency using a single frame of the video image. *The Era of Interactive Media*. 2013, pp. 593–604.
9. Tao Mei, Bo Yang, Shi-Qiang Yang, Xian-Sheng Hua. Video collage: presenting a video sequence using a single image. *The Visual Computer*. 2009, vol. 25, Issue 1, pp. 39–51.
10. Romildo José da Silva, Jonas Gomes, Luiz Velho. Segmentation of video sequences using volumetric image processing. *Multimedia '99*. Eurographics 2000, pp. 13–22.
11. Pekka Paalanen, Joni-Kristian Kämäräinen, Heikki Kälviäinen. Image based quantitative mosaic evaluation with artificial video. Image Analysis. *Lecture Notes in Computer Science*. 2009, vol. 5575, pp. 470–479.
12. Glaz A.B., Smolyaninov V.V. A method of video image enhancement. *Automatic Control and Computer Sciences*. 2009, vol. 43, no. 1, pp. 51–56.
13. King Ngi Ngan, Qian Zhang. Multiview image segmentation and video tracking. *Video Segmentation and Its Applications*. 2011, pp. 117–143.
14. Che-Chun Su, Anush Krishna Moorthy, Alan Conrad Bovik. Visual quality assessment of stereoscopic image and video: challenges, advances, and future trends. *Visual Signal Quality Assessment*. 2015, pp. 185–212.
15. Michael S. Lew, Nicu Sebe, John P. Eakins. Challenges of image and video retrieval. Image and video retrieval. *Lecture Notes in Computer Science*. 2002, vol. 2383, pp. 1–6.

Information about the authors:

A.A. Borodin, *MA Student*
E.G. Kabulova, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Head of the Chair of Advanced Mathematics*
K.A. Polozhentsev, *Leading Master of Shop Repairing, Postgraduate* (kirill.polozhentsev@gmail.com)

Received May 14, 2015