

КОМПЬЮТЕРНЫЙ МЕТОД ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ МИКРОСТРУКТУР ДЕФОРМИРОВАННОЙ СТАЛЬНОЙ ПРОВОЛОКИ ДЛЯ АНАЛИЗА ЕЕ СВОЙСТВ

*А. Н. ЧИЧКО¹, д-р физ.-мат. наук, профессор, научный сотрудник, chichko_a_n@mail.ru;
А. В. ВЕДЕНЕЕВ², канд. техн. наук, ведущий инженер-технолог лаборатории метизного производства
исследовательского центра – отраслевой лаборатории технологий металлургического и сталепроволочного
производства; О. А. САЧЕК³, канд. техн. наук, инженер-программист
(¹ Институт тепло- и массообмена Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь, г. Минск;
² ОАО «Белорусский металлургический завод – управляющая компания холдинга
«Белорусская металлургическая компания», Республика Беларусь, г. Жлобин;
³ ООО «Росчерк», Республика Беларусь, г. Минск)*

Аннотация. Механические свойства бортовой бронзированной проволоки зависят, с одной стороны, от микроструктуры катанки, из которой она производится, а с другой — определяются особенностями микроструктуры самой проволоки. В настоящее время не существует общепринятых методов анализа микроструктуры деформированных проволок, позволяющих устанавливать взаимосвязи между характеристиками деформации проволоки и характеристиками микроструктуры. Осуществлена попытка компьютерного анализа микроструктур бортовой бронзированной проволоки после деформационного волочения. Разработан математический аппарат и алгоритм исследования микроструктуры проволоки из перлитной стали после волочения, основанный на обработке изображения микроструктуры и ее параметризации, позволяющий вычислять функцию плотности распределения числа волокон от их длин и количественно характеризовать изображение микроструктуры. Данная функция может использоваться для сравнительного количественного анализа микроструктур сплавов, подвергнутых деформационному волочению. С использованием данных, полученных в ходе экспериментов в ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «Белорусская металлургическая компания», построено корреляционное поле между числом скручиваний и величиной расслоя для проволок диам. 1,6 и 1,55 мм из стали 80БВ. На основе статистической функции плотности распределения числа волокон от их длин, вычисленных по микроструктурам проволоки, предложен критерий, позволяющий прогнозировать степень расслоения и величину скручивания проволоки по изображению ее микроструктуры. Установлена корреляционная взаимосвязь между степенью расслоения, числом скручиваний проволоки и характеристиками ее микроструктуры, определенных на основе функции распределения волокнистой структуры проволоки с ярко выраженной текстурой в поперечном сечении.

Ключевые слова: производство проволоки, бортовая бронзированная проволока, механические свойства деформированной проволоки, микроструктура проволоки, изображение деформированной микроструктуры.

Ссылка для цитирования: Чичко А.Н., Веденеев А.В., Сачек О.А. Компьютерный метод обработки изображений микроструктур деформированной стальной проволоки для анализа ее свойств // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2019. Т. 75. № 7. С. 844–853.

Doi: 10.32339/0135-5910-2019-7-844-853

COMPUTER METHOD OF PROCESSING OF DEFORMED STEEL WIRE MICROSTRUCTURES IMAGES FOR ITS PROPERTIES ANALYSIS

*A. N. CHICHKO¹, HD (Phys.-Math.), Prof., Res. Ass., chichko_a_n@mail.ru; A. V. VEDENEEV², PhD (Tech),
Leading engineer-technologist, Lab. of Hardware production, Res. Center-industry lab. of
technologies of metallurgical and steel wire; O. A. SACHEK³, PhD (Tech), engineer-programmer
(¹ Institute of heat and mass exchange, National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus, Minsk;
² OJSC «Belorussky steel-works – managing company of holding «Belorusskay metallurgical company»,
Republic of Belarus, Zhlobin; ³ OJSC «Roscherk», Republic of Belarus, Minsk)*

Abstract. Mechanical properties of board-bronzed wire depend from one side on the wire rod microstructure from which it is produced and from the other side – determines by peculiarities by the microstructure of the wire itself. At present, there are no generally accepted methods of deformed wire microstructure analysis allowing establishing relationship between characteristics of wire deformation and microstructure characteristics. A mathematical apparatus and new algorithm for processing of microstructure of

pearlite steel wire after drawing elaborated based on microstructure image processing and its parameterization. As the main parameter of microstructure, the density function of statistical distribution of fiber lengths used, which allows characterizing quantitatively image of microstructure. Based on the experimental data of OJSC “BMZ – management company of “Byelorussian metallurgical company” holding” correlation demonstrated between degree of wire twisting and degree of delamination. On the basis of samples of perlite steel and their images obtained for bronzed bead wire manufactured at OJSC “BMZ – management company of “Byelorussian metallurgical company” holding” density functions of statistical distribution of perlite microstructure fiber length for the group of samples calculated. Criteria for wire microstructure analysis, based on density distribution function along length of fibers, as well as reduced distribution function proposed. Correlation between degree of delamination, number of wire twists and characteristics of its microstructure determined, calculated using the distribution function of wire fibrous structure with pronounced texture in the cross section.

Key words: mathematical processing, images of deformed microstructure, wire microstructure, steel wire, drawing, perlite microstructure, wire rod.

For citation: Chichko A.N., Vedenev A.V., Sachek O.A. Computer method of processing of deformed steel wire microstructures images for its properties analysis. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnikheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2019, vol. 75, no. 7, pp. 844–853. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2019-7-844-853

Известно, что механические свойства бортовой бронзированной проволоки, получаемой из катанки, с одной стороны, зависят от микроstructures катанки, а с другой — определяются особенностями микроstructures проволоки [1, 2]. Причем микроstructure проволоки в значительной степени наследует микроstructure катанки, что и определяет механические свойства стальной проволоки [3, 4]. Технологический процесс получения бортовой проволоки характеризуется целым набором технологических факторов, таких как скорость РКБ, скорость Моргана, температура прокатки, скорость протекания эвтектидного превращения и др., которые влияют на характер микроstructures бортовой проволоки. Опыт работы ОАО “БМЗ – управляющая компания холдинга “Белорусская металлургическая компания” свидетельствует, что в процессе изготовления проволоки при определенных сочетаниях технологических факторов наблюдается снижение пластических свойств, которое сопровождается образованием дефекта типа “расслой”, что приводит к снижению качества продукции, а часто и к обрыву проволоки [5, 6].

В ряде работ [7–9] установлено, что при изменении деформационно-напряженного состояния проволок в определенных случаях может появляться дефект “расслой”, что является следствием некогерентности матрицы. Статистический анализ технологических данных, а также данных микроstructures проволоки показывает, что снижение пластических свойств бортовой проволоки и образование дефекта “расслой” может быть связано с выходом технологических характеристик за определенные пределы. При одних режимах технологии дефект типа “расслой” образуется в проволоке, а при других — он не образуется. Следует отметить, что величина напряженно-деформированного состояния проволоки связана с величиной расслоя проволоки. Чем больше склонность к развитию напряжений проволоки, тем больше склонность к образова-

нию очагов расслоения, которые влияют на свойства проволоки в целом.

В работе развивается идея о том, что напряженно-деформированное состояние проволоки определяется на основе изображения микроstructures, несмотря на сложный характер распределения структурных составляющих. Причем причины снижения пластических свойств проволоки находятся в особенностях распределения волокон в микроstructure сплава. Однако выявление этих причин на основе анализа волокнистых микроstructures проволоки является сложнейшей задачей, так как микроstructure проволоки после проката однообразна и не содержит каких-либо видимых для специалиста металловода особенностей, что не поддается традиционному металлографическому анализу.

Автоматизация обработки микроstructures активно развивается [10–16] и имеет большие перспективы в части ее применения для решения металлургических задач. Однако вопросы математического описания микроstructures остаются сложнейшими и находятся на стыке нескольких наук. Нужны новые подходы к вопросам математического описания, которые могут позволить выявлять новые взаимосвязи между свойствами проволок и характеристиками микроstructures. В работах [17–20] описаны новые подходы и алгоритмы для цифровой обработки микроstructures перлита катанки, позволяющие повысить информативность исследований между свойствами катанки и межпластиночными феррито-цементитными расстояниями. Данная работа является развитием этих работ для микроstructures, подвергнутых волочению.

Цель работы — разработка компьютерного метода анализа изображения микроstructures бортовой бронзированной проволоки, полученной после волочения, для выявления взаимосвязей между показателем расслоя в проволоке (параметром скручивания проволоки) и характеристиками волокон микроstructures

Исходные данные

В основу работы положены экспериментальные данные (сталь 80БВ) по проволокам и их микроструктурам, полученные в ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «Белорусская металлургическая компания». На их основе построено корреляционное поле между числом скручиваний и величиной расслоя для проволок диам. 1,6 мм (рис. 1) и 1,55 мм (рис. 2). Как видно из рис. 1 и 2, для обеих проволок наблюдается тенденция к увеличению степени расслоя при снижении числа скручиваний проволоки. Причем вычисленные коэффициенты корреляции равны: $-0,77$ для диам. 1,6 мм и $-0,89$ для диам. 1,55 мм проволоки. Следует отметить, что дефект «расслой» наблюдается для проволоки как диам. 1,55 мм, так и диам. 1,6 мм.

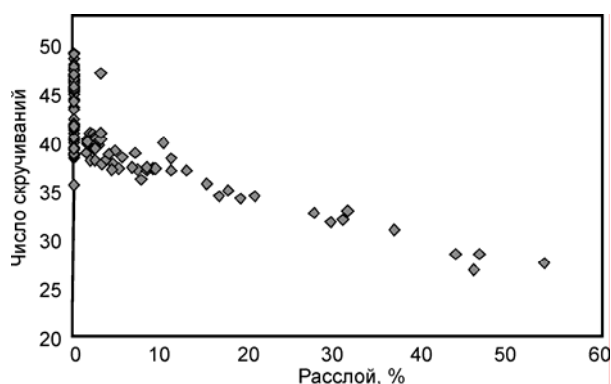


Рис. 1. Корреляционное поле числа скручиваний от величины расслоя в проволоке для диам. 1,6 мм

Fig. 1. Correlation field of the number of twisting on the delaminating degree in the 1.6 mm diameter wire

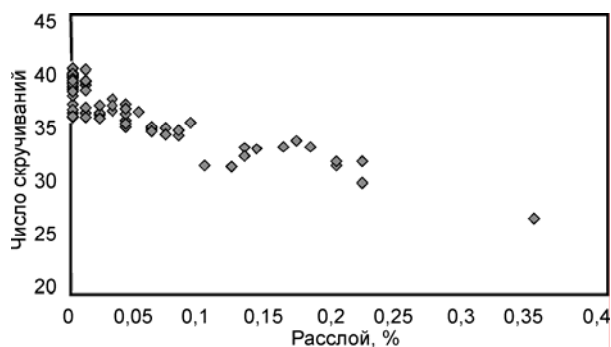


Рис. 2. Корреляционное поле числа скручиваний от величины расслоя в проволоке для диам. 1,55 мм

Fig. 2. Correlation field of the number of twisting on the delaminating degree in the 1.55 mm diameter wire

В производстве ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «Белорусская металлургическая компания» показателем расслоя является величина

$$r = \frac{N_r}{N} 100 \%,$$

где N_r — число испытаний образцов проволоки, для которых имеет место дефект «расслой»; N — число всех испытаний образцов.

В качестве исходных данных исследования использовали 12 образцов бортовой бронзированной проволоки. В частности, использовали образцы двух диаметров, а именно 8 образцов соответствовали проволоке диам. 1,55 мм и 4 образца — проволоке диам. 1,6 мм. Для каждого образца были сделаны 16 фото микроструктур с различных участков проволоки.

На рис. 3 представлена схема взаимосвязей свойств проволоки и ее микроструктуры, которые были изучены в ходе обработки микроструктур проволоки после волочения. Исследование состояло из нескольких этапов. На первом этапе для всех микроструктур деформированной проволоки, полученной из катанки, определялась функция плотности распределения $N(L_B)$ волокон микроструктуры, затем функция преобразовывалась в функцию $NL^2(L_B)$, по которой было определено значение критерия расслоя K_p и по которому можно оценить количественно степень вероятности дефекта «расслой» в проволоке.

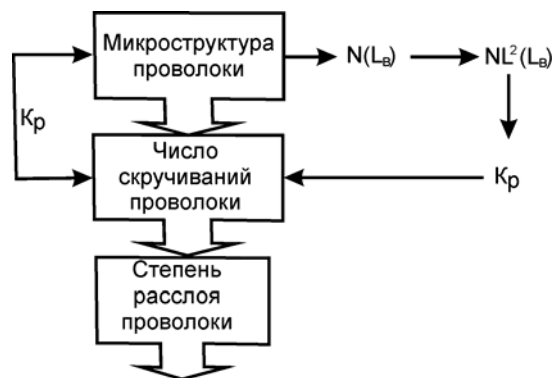


Рис. 3. Схема взаимосвязи свойств проволоки и ее микроструктуры

Fig. 3. Diagram of interaction between wire properties and its microstructure

На рис. 4 и 5 представлены фотографии микроструктур для проволоки диам. 1,55 и 1,6 мм соответственно. Фотографии микроструктур сделаны с использованием микроскопа с увеличением $\times 7000$.

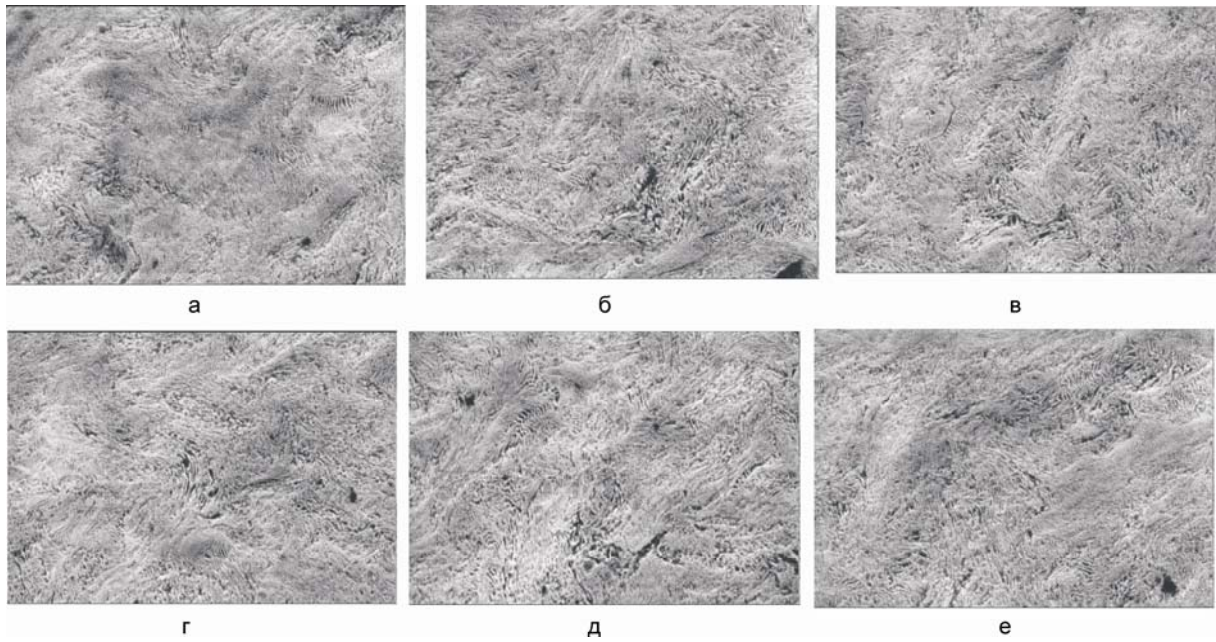


Рис. 4. Микроструктуры проволоки (сталь 80БВ) диам. 1,55 мм для различных участков испытания № 1 ($r = 0,27\%$; $M = 39,65$)

Fig. 4. Wire microstructure (steel 80БВ) of 1.55 mm diameter for various areas of test No. 1 ($r = 0.27\%$; $M = 39.65$)

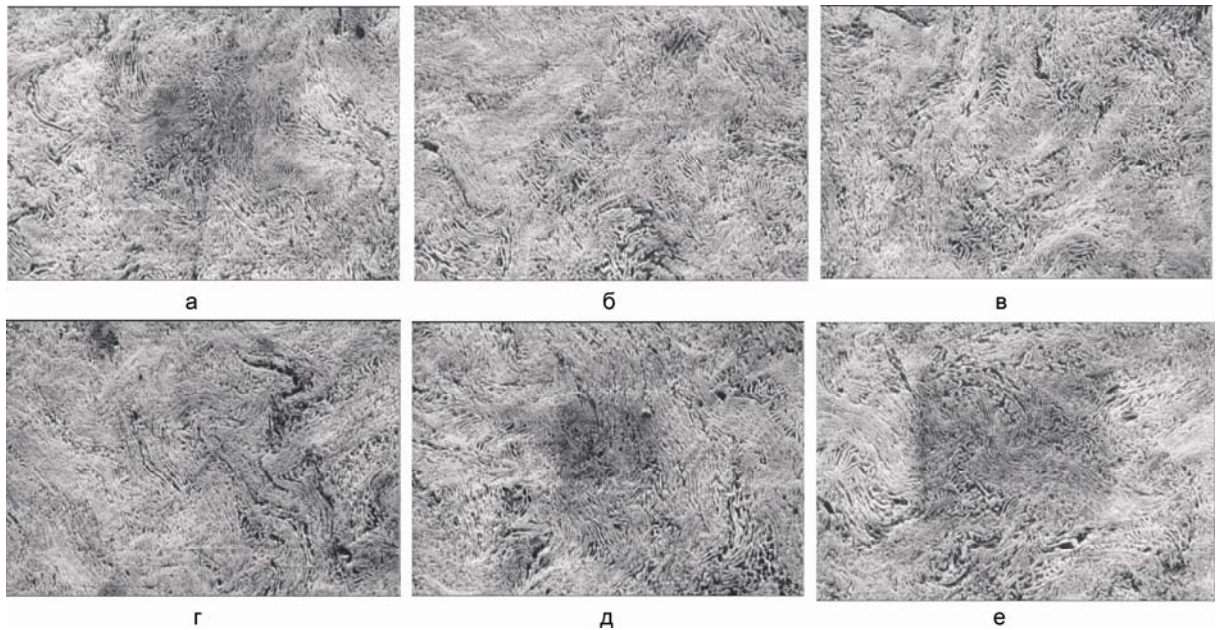


Рис. 5. Микроструктуры проволоки (сталь 80БВ) диам. 1,6 мм для различных участков испытания № 7 ($r = 1,33\%$; $M = 35,95$)

Fig. 5. Wire microstructure (steel 80БВ) of 1.6 mm diameter for various areas of test No. 7 ($r = 1.33\%$; $M = 35.95$)

Исходные данные по характеристикам свойств проволоки представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. ОПЫТНЫЕ ДАННЫЕ ОАО “БМЗ – УПРАВЛЯЮЩАЯ КОМПАНИЯ ХОЛДИНГА “БЕЛОРУССКАЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКАЯ КОМПАНИЯ” ПО ПРОВОЛОКАМ

TABLE 1. TEST DATA OF “BMZ – MANAGING COMPANY OF HOLDING “BELORUSSKAYA METALLURGICAL COMPANY” BY WIRES

Показатель	Номер испытания											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Число скручиваний М	39,65	39,65	40,1	40,1	39,63	39,63	35,95	35,95	31,91	31,91	32,53	32,53
Расстой, %	0,27	0,27	0	0	0,28	0,28	1,33	1,33	19,80	19,80	15,34	15,34

Алгоритм решения задачи

Алгоритм обработки микроструктур проволоки состоит из следующих шагов: задание порога бинаризации микроструктуры, применение алгоритма определения длины темных “волокон”, построение функции распределения “волокон” по длинам $N(L_B)$, преобразование ее в функцию $NL^2(L_B)$, вычисление критерия K_{ij} для j -й фотографии i -го образца микроструктуры, вычисление сводного критерия $K_{обр}$ образца и затем вычисление сводного критерия K_p для всех образцов плавки. Математический аппарат алгоритма определения длин темных “волокон” представлен ниже.

Шаг 1. Формирование исходного множества Ω^0 на основе изображения микроструктуры проволоки

$$\Omega^0 = \{N_{ij}^0 \in N\},$$

где N_{ij}^0 — значение яркости цветного изображения в точке с координатами (i, j) ; i и j — индексы двумерного пространства в интервалах $1 \leq i \leq L_x$, $1 \leq j \leq L_y$; L_x, L_y — размеры изображения в пикселях по осям координат X и Y соответственно.

Шаг 2. Создание полутонового изображения микроструктуры (множество $\Omega^1 = \{N_{ij}^1 \in R \mid 0 \leq N_{ij}^1 \leq 1\}$) с использованием формулы

$$N_{ij}^1 = \frac{N_{ij}^0}{\max\{N_{ij}^0\}}.$$

Шаг 3. Преобразование изображения в вектор длиной m бинаризованных изображений $\Omega^2 = \{\Omega_1^2, \Omega_2^2, \dots, \Omega_m^2\}$, где $\Omega_k^2 = \{N_{ijk}^2\}$, $k = 1, m$, по правилу

$$N_{ijk}^2 = \begin{cases} -1, & \text{если } N_{ij}^1 \leq \beta_k \\ 1, & \text{если } N_{ij}^1 > \beta_k \end{cases},$$

где $\beta_k \in \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m\}$ — порог бинаризации.

Шаг 4. Выбор бинаризованного изображения микроструктуры из полученного вектора $\Omega^3 = \{N_{ij}^3 \mid N_{ij}^3 = 0 \text{ или } N_{ij}^3 = 1\} = \Omega_l^2$, где l — индекс вектора параметров α , для которого выполняется условие

$$\mu - \frac{\varepsilon}{2} < \alpha_l < \mu + \frac{\varepsilon}{2},$$

$$\text{где } \alpha_k = \frac{\sum_{i=1}^{L_x} \sum_{j=1}^{L_y} t_{ij}^k}{L_x L_y - \sum_{i=1}^{L_x} \sum_{j=1}^{L_y} t_{ij}^k}, \quad t_{ij}^k = \begin{cases} 1, & \text{если } N_{ijk}^2 = -1; \\ 0, & \text{если } N_{ijk}^2 = 1, \end{cases}$$

$k = 1, m$; μ — заданное значение порога бинаризации; ε — отклонение μ .

Шаг 5. Формирование множества $\Omega^4 = \{N_{ij}^4 \in N\}$ маркированных пятен (волокон микроструктуры), где N_{ij}^4 — номер пятна, которому принадлежит пиксель p_{ij} . В процессе формирования множества Ω^4 производится распознавание несвязных структур путем создания множества $Q = \{q_i \mid i = 1, k\}$, где k — число структур, которое увеличивается в процессе распознавания изображения.

Формирование множества Ω^4 происходит последовательно для каждого пикселя p_{ij} следующим образом: в случае если $N_{ij}^3 = 0$, то $N_{ij}^4 = 0$, иначе N_{ij}^4 вычисляется по формуле

$$N_{ij}^4 = \begin{cases} \min\{q_a, q_b\}, & \text{если } N_{i-1,j}^4 = q_a \cap N_{i,j-1}^4 = q_b; \\ q_a, & \text{если } \begin{cases} N_{i-1,j}^4 = q_a \cup \begin{cases} N_{i-1,j}^4 = 0; \\ N_{i,j-1}^4 = q_a; \end{cases} \\ q_{k+1}, & \text{если } N_{i-1,j}^4 = 0 \cap N_{i,j-1}^4 = 0; \end{cases}$$

где $q_a, q_b \in Q$, $a, b \in [1, k]$.

Шаг 6. Определение вектора $L = \{l_1, l_2, \dots, l_k\}$ длин темных “волокон” путем последовательного выполнения операции $s_{N_{ij}^4} = s_{N_{ij}^4} + 1$ для всех пикселей изображения p_{ij} .

Шаг 7. Построение функции распределения значений длин “волокон” изображения микроструктуры $N(L_B)$.

Шаг 8. Преобразование функции $N(L_B)$ распределения значений длин “волокон” в функцию $NL^2(L_B)$ по формуле

$$NL^2(L_B) = N(L_B) \cdot (L_B)^2.$$

Шаг 9. Вычисление критерия K оценки длины “хвоста” функции распределения $NL^2(L_B)$ по формуле

$$K = \int_{L_B^b}^{L_B^{\max}} NL^2(L_B) dL_B,$$

где L_B^b — длина “волокна”, принятая за базовую; L_B^{\max} — максимальная длина “волокна” изображения.

Шаг 10. Вычисление сводного критерия $K_{\text{обр}}$ образца по формуле

$$K_{\text{обр}} = \frac{\sum_{i=1}^n K_i}{n},$$

где n — число изображений микроструктур образца; K_i — критерий оценки длины “хвоста” функции распределения $NL^2(L_B)$ для i -го изображения микроструктуры.

Шаг 11. Вычисление сводного критерия K_p образцов плавки по формуле

$$K_p = \frac{\sum_{i=1}^m K_i^{\text{обр}}}{m},$$

где m — число изображений микроструктур образцов плавки; $K_i^{\text{обр}}$ — сводный критерий оценки длины “хвоста” функции распределения $NL^2(L_B)$ для i -го образца плавки.

На рис. 6 и 7 представлены функции плотности распределения длин “волокон”, рассчитанные по микроструктурам, представленным на рис. 4 и 5. На каждом рисунке находится по три функции распределения, соответствующие микроструктурам в верхней и нижней частях рис. 4, и 5. Легко видеть, что сравнительный количественный анализ микроструктур, например, рис. 4 невозможен, а качественный является сложнейшей задачей, в то же время математическое преобразование микроструктуры в виде функции статистического распределения позволяет предложить количественный метод сравнительного анализа микроструктур.

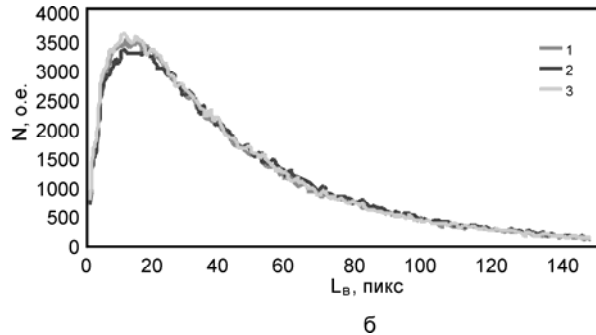
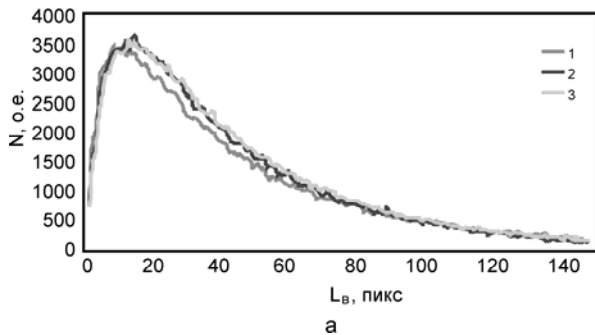


Рис. 6. Функции плотности распределения $N(L_b)$ длин “волокон” для шести микроструктур проволоки для испытания № 1 (см. табл. 1): а — для микроструктур, приведенных на рис. 4, а–в; б — для микроструктур, приведенных на рис. 4, г–е

Fig. 6. Functions of “fiber” lengths distribution density $N(L_b)$ for six wire microstructures for test No. 1 (see Table 1): а — for microstructures, presented at Fig. 4, а–в; б — for microstructures, presented at Fig. 4, г–е

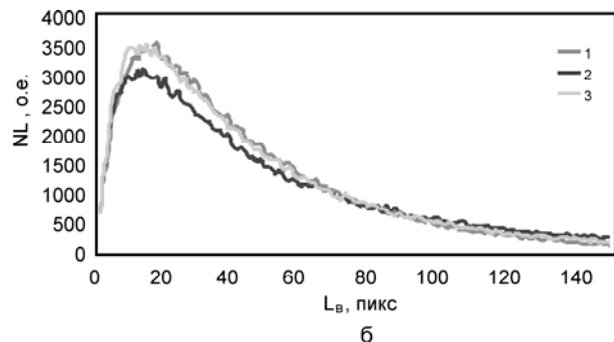
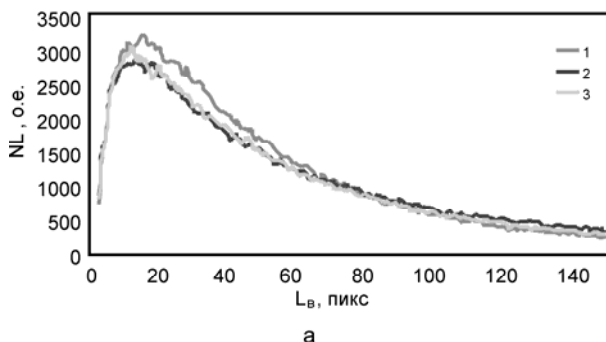


Рис. 7. Функции распределения $N(L_b)$ длин “волокон” для шести микроструктур проволоки для испытания № 7 (см. табл. 1): а — для микроструктур, приведенных на рис. 5, а–в; б — для микроструктур, приведенных на рис. 5, г–е

Fig. 7. Functions of “fiber” lengths distribution $N(L_b)$ for six wire microstructures for test No. 7 (see Table 1): а — for microstructures, presented at Fig. 5, а–в; б — for microstructures, presented at Fig. 5, г–е

На следующем этапе исследования на основе рассчитанных функций распределения $N(L_B)$ были вычислены приведенные функции плотности распределения $NL^2(L_B)$ (рис. 8, 9). На каждом

рисунке находится по три функции распределения, соответствующие микроструктурам в верхней и нижней частях рис. 4 и 5.

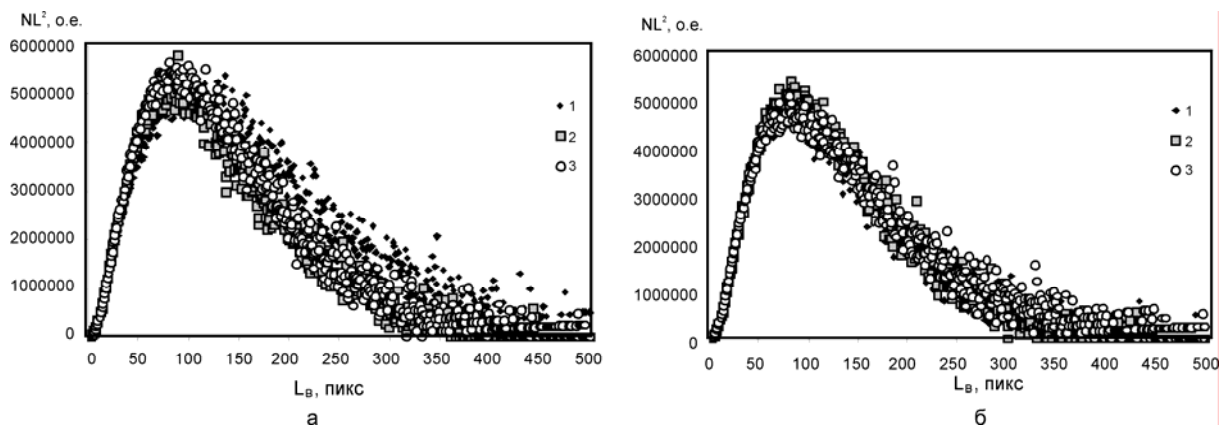


Рис. 8. Функции распределения $NL^2(L_B)$ для шести микроструктур проволоки для испытания № 1: а — для микроструктур, приведенных на рис. 4, а–в; б — для микроструктур, приведенных на рис. 4, г–е

Fig. 8. Functions of $NL^2(L_B)$ distribution for six wire microstructures for test No. 1: а — for microstructures, presented at Fig. 4, а–в; б — for microstructures, presented at Fig. 4, г–е

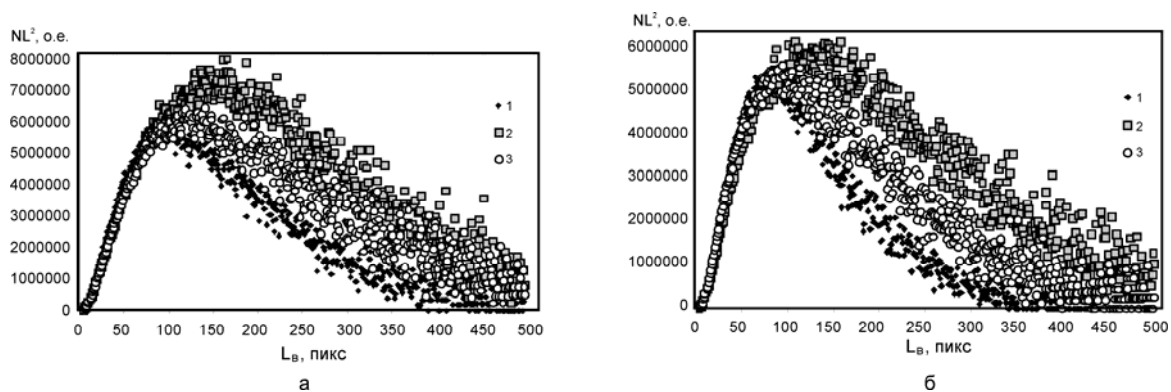


Рис. 9. Функции распределения $NL^2(L_B)$ для шести микроструктур проволоки для испытания № 7 а — для микроструктур, приведенных на рис. 5, а–в; б — для микроструктур, приведенных на рис. 5, г–е

Fig. 9. Functions of $NL^2(L_B)$ for six wire microstructures for test No. 7: а — for microstructures, presented at Fig. 5, а–в; б — for microstructures, presented at Fig. 5, г–е

В результате обработки микроструктур были рассчитаны характеристики (критерии) изображения микроструктур для различных плавок

(304803–300360), выплавленных в ОАО “БМЗ – управляющая компания холдинга “Белорусская металлургическая компания” (табл. 2).

ТАБЛИЦА 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ МИКРОСТРУКТУР ПРОВОЛОКИ И ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ

TABLE 2. RESULTS OF WIRE MICROSTRUCTURES PROCESSING AND PARAMETERS VALUE

Номер фото	Значения критерия K											
	плавка 304803		плавка 304804		плавка 304805		плавка 304817		плавка 300242		плавка 300360	
	образец 1	образец 2	образец 1	образец 2	образец 1	образец 2	образец 1	образец 2	образец 18	образец 19	образец 9	образец 12
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1,09	1,21	0,91	0,97	1,39	1,17	1,20	1,14	1,30	1,34	1,56	1,65
2	0,86	0,84	0,67	0,76	0,74	1,08	2,12	1,29	1,08	1,16	1,57	1,48
3	0,94	1,08	1,06	0,69	0,77	0,93	1,69	1,20	0,95	1,30	1,22	1,20
4	0,82	0,68	0,95	1,47	1,00	1,12	0,82	1,07	1,07	1,26	1,22	1,15
5	0,83	0,80	0,93	0,99	1,33	1,17	1,63	2,03	1,26	1,38	1,99	1,30
6	0,87	1,25	0,63	1,01	1,37	0,83	1,15	1,14	2,24	1,37	1,56	0,88
7	1,14	0,85	1,01	0,82	1,19	1,13	1,05	1,18	1,20	1,31	1,07	1,43
8	1,01	0,66	1,07	1,90	1,10	1,08	0,85	1,13	1,72	1,16	1,89	1,43
9	0,67	0,84	1,50	0,75	0,81	0,87	0,88	1,75	1,59	1,80	1,46	1,79
10	0,75	0,92	0,91	0,67	0,81	0,88	1,04	0,85	1,82	1,08	1,49	1,78
11	0,56	0,91	1,61	0,76	1,23	0,84	0,94	1,39	1,35	1,83	1,60	1,27
12	0,85	1,68	0,91	0,77	1,43	1,21	1,39	1,13	1,74	1,43	1,83	1,12
13	0,82	0,69	0,80	0,78	0,99	1,00	1,44	1,10	1,28	1,20	1,64	0,91
14	0,80	1,07	1,04	1,09	0,92	1,06	1,29	1,63	1,81	1,65	1,22	1,65
15	1,18	0,75	0,89	0,71	1,16	1,10	1,28	1,37	1,34	1,60	1,02	0,94
K _{обр}	0,88	0,95	0,99	0,94	1,08	1,03	1,25	1,29	1,45	1,39	1,49	1,33
K _p	0,91		0,97		1,06		1,27		1,42		1,41	

На рис. 10 приведены значения критерия K_p для всех фотографий микроструктур образцов. Как видно из рис. 10, значения критерия для микроструктур проволок без расслоя меньше, чем аналогичные значения для проволок, у которых наблюдался расслой.

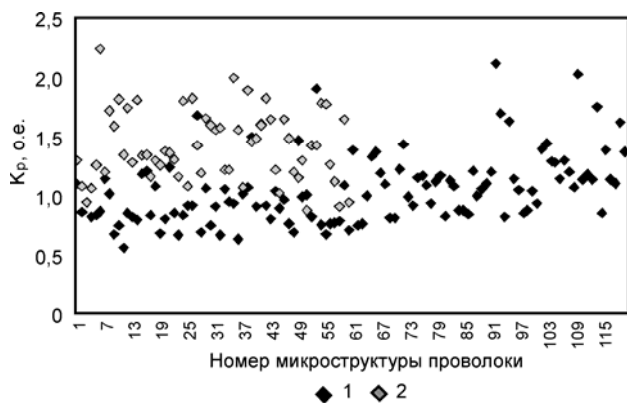


Рис. 10. Значения критерия K_p для различных микроструктур проволок:

1 — микроструктуры проволоки без расслоя;
2 — микроструктуры проволоки с расслоем

Fig. 10. K_p criteria values for various wire microstructures:
1 — microstructure of a wire without delamination;
2 — microstructure of a wire with delamination

В результате сравнительного анализа значений критерия K_p и числа скручиваний анализируемые плавки можно разбить (проранжировать) на три группы, представленные в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. СВЯЗЬ ПАРАМЕТРОВ ПРОВОЛОКИ И ЗНАЧЕНИЯ КРИТЕРИЯ K_p МИКРОСТРУКТУРЫ

TABLE 3. RELATION BETWEEN WIRE PARAMETERS AND K_p CRITERIA OF MICROSTRUCTURE

Значение критерия K _p	Число скручиваний проволоки	Вероятность расслоя
≤1,15	37 и выше	Низкая
1,35 < K _p ≤ 1,35	Промежуточное состояние	
>1,35	33 и ниже	Высокая

На рис. 11 представлено сравнительное соотношение полученных в результате компьютерной обработки микроструктур значений критерия K_p для проволоки с расслоем и без расслоя. Как видно из рис. 11, для микроструктур проволоки с расслоем число микроструктур со значением K_p ≤1,15 составляет 14,49 %, тогда как для микроструктур со значением K_p >1,35 — 63,27 %.

Основные результаты

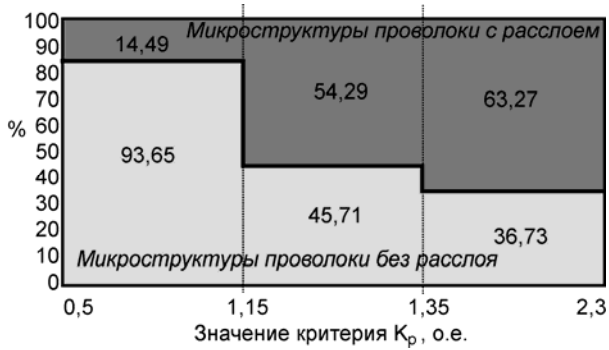


Рис. 11. Сравнительное соотношение значения критерия K_p для различных микроструктур проволоки

Fig. 11. Comparative relation between K_p criteria value for various wire microstructures

1. Предложен алгоритм по обработке микроструктур деформированной проволоки, позволяющий вычислять функцию плотности распределения числа волокон от их длин, которая может использоваться для сравнительного количественного анализа микроструктур сплавов, подвергнутых деформационному волочению.

2. На основе статистической функции плотности распределения числа волокон от их длин, вычисленных по микроструктурам проволоки, предложен критерий, позволяющий прогнозировать степень расслоения и величину скручивания проволоки по изображению ее микроструктуры.

3. Установлена взаимосвязь между степенью расслоения проволоки и характеристиками ее микроструктуры, определяемыми через функцию распределения волокнистой структуры проволоки с ярко выраженной текстурой в поперечном сечении.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Gershteyn G., Numberger F., Cianciosi F. etc. A Study of Structure Evolution in Pearlitic Steel Wire at Increasing Plastic Deformation // *Steel Research Int.* 2011. V. 82 № 12. P. 1368–1374.
- Фетисов В.П. Деформационное упрочнение углеродистой стали. — М.: Мир, 2005. — 200 с.
- Парусов Э.В., Губенко С.И., Луценко В.И. и др. Взаимосвязь предельной деформируемости бунтового проката при волочении с параметрами его микроструктуры // *Литье и металлургия.* 2016. № 3. С. 74–81.
- Перчаткин А.В. Формирование структуры и свойств катанки для повышения ее пластичности при производстве сварочной проволоки: дис. ... канд. техн. наук. — Магнитогорск, 2012. — 128 с.
- Волосевич П.Ю., Гаврилюк В.Г., Сердитова В.Н. и др. Изменение структуры и механических свойств стальной проволоки при больших суммарных обжатиях // *Сталь.* 1979. № 3. С. 211–213.
- Грачев С.В., Анашкин А.В., Кожевникова В.Л. и др. Исследование причин расслоения струнной проволоки // *Изв. вузов. Черная металлургия.* 1987. № 6. С. 57–60.
- Shimizu K., Kawabe N. Fracture mechanics aspects of delamination occurrence in high-carbon steel wire // *Wire Journal International.* 2002. March. P. 88–97.
- Durgaprasad A., Giri S., Lenka S. etc. Delamination of Pearlitic Steel Wires: The Defining Role of Prior-Drawing Microstructure // *Metallurgical and Materials Transactions.* 2018. V. 49. P. 2037–2047.
- Демидов А.В. Влияние дополнительной деформации на механические свойства холоднодеформированной проволоки в условиях сложнапряженного состояния // *Литье и металлургия.* 2008. № 3. С. 92–98.
- Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. В.А. Сойфера. — М.: Физматлит, 2003. — 784 с.
- Яковлев А.В., Сидоренко Е.Н. Результаты экспериментов по автоматическому анализу структуры микрошлифов металлов. — Муром: Муром. ин-т Владимир. гос. ун-та, 2001. — 20 с.
- Сайт компании «Тиксомет» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.thixomet.ru>.
- Сайт компании «Видеотест» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.videotest.ru>.
- Сайт SIAMS — системы анализа изображений и моделирования структур [Электронный ресурс]. — Режим доступа: www.siams.com.
- Садыков С.С., Яковлев А.В. Использование методов цифровой обработки изображений в количественной металлографии // *Надежность и качество 2000: Тр. междунар. симпозиума, Пенза, 22–31 мая, 2000 г.; под ред. А.Н. Андреева и др.* — Пенза: изд-во Пенз. гос. ун-та, 2000. С. 55, 56.
- Логунова О.С., Макарычев П.П. Алгоритмы и программное обеспечение распознавания низкоконтрастных изображений при оценке качества стали // *Программные продукты и системы.* 2008. № 3. С. 79–81.
- Чичко А.Н., Сачек О.А., Лихоузов С.Г. и др. Алгоритм и программное обеспечение для обработки изображений микроструктур перлитных сталей // *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук.* 2010. № 3. С. 14–21.
- Чичко А.Н., Сачек О.А., Лихоузов С.Г. О некоторых алгоритмах и методах обработки изображения микроструктур перлитных сталей // *Вестник компьютерных и информационных технологий.* 2011. № 2. С. 9–15.
- Чичко А.Н., Лихоузов С.Г., Сачек О.А. и др. Программное обеспечение для обработки изображений микроструктур железоуглеродистых сплавов // *Вестник Белорусского национального технического университета. Приборостроение. Информатика.* 2011. № 3. С. 13–18.
- Чичко А.Н., Сачек О.А., Лихоузов С.Г. О новых математических методах классификации изображений микроструктур сталей // *Литье и металлургия.* 2008. № 2. С. 103–108.

Поступила 25 апреля 2019 г.

REFERENCES

1. Gershteyn G., Numberger F., Cianciosi F., Shevchenko N., Schaper M., Bach Fr.-W. A Study of Structure Evolution in Pearlitic Steel Wire at Increasing Plastic Deformation. *Steel Research Int.*, 2011, vol. 82, no. 12, pp. 1368–1374.
2. Fetisov V.P. *Deformatsionnoe uprochnenie uglerodistoi stali* [Deformation strengthening of carbon steel]. Moscow: Mir, 2005, 200 p. (In Russ.).
3. Parusov E.V., Gubenko S.I., Lutsenko V.I., Sychkov A.V., Vedeneev A.V. Interaction between utmost deformability of coiled rolled product at drawing and parameters of its microstructure. *Lit'e i metallurgiya*, 2016, no. 3, pp. 74–81. (In Russ.).
4. Perchatkin A.V. *Formirovanie struktury i svoystv katanki dlya povysheniya ee plastichnosti pri proizvodstve svarochnoi provoloki: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Forming of the structure and properties of wire rod for increasing its ductility at production of welding wire. Extended Abstract of Cand. Sci. Diss.]. Magnitogorsk, 2012, 128 p. (In Russ.).
5. Volosevich P.Yu., Gavriilyuk V.G., Serditova V.N., Krymchanskii I.I., Rol'shchikov L.D. Change of steel wire structure and mechanical properties at high summarized reductions. *Stal'*, 1979, no. 3, pp. 211–213. (In Russ.).
6. Grachev S.V., Anashkin A.V., Kozhevnikova V.L. etc. Study of the reasons of string wires delamination. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya*, 1987, no. 6, pp. 57–60. (In Russ.).
7. Shimizu K., Kawabe N. Fracture mechanics aspects of delamination occurrence in high-carbon steel wire. *Wire Journal International*, 2002, March, pp. 88–97.
8. Durgaprasad A., Giri S., Lenka S. etc. Delamination of Pearlitic Steel Wires: The Defining Role of Prior-Drawing Microstructure. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2018, vol. 49, pp. 2037–2047.
9. Demidov A.V. Influence of additional deformation on mechanical properties of cold-deformed wire under composite-stressed conditions. *Lit'e i metallurgiya*, 2008, no. 3, pp. 92–98. (In Russ.).
10. *Metody komp'yuternoi obrabotki izobrazhenii* [Methods of computer processing of images]. Soifer V.A. ed. Moscow: Fizmatlit, 2003. 784 p. (In Russ.).
11. Yakovlev A.V., Sidorenko E.N. *Rezultaty eksperimentov po avtomaticheskomu analizu struktury mikroshlifov metallov* [Results of experiments on automatic analysis of metals polished sections]. Murom: Murom. in-t Vladimir. gos. un-ta, 2001, 20 p. (In Russ.).
12. *Sait kompanii "Tiksomet"* [Site of Tixomet company]. Electronic resource. Available at URL: <http://www.thixomet.ru/>. (In Russ.).
13. *Sait kompanii "Videotest"* [Site of Videotest company]. Electronic resource. Available at URL: [http://www.videotest.ru.](http://www.videotest.ru/) (In Russ.).
14. *Sait SIAMS – sistemy analiza izobrazhenii i modelirovaniya struktur* [SIAMS sire – systems of images analysis and structures modeling]. Electronic resource. Available at URL: [www.siams.com.](http://www.siams.com/) (In Russ.).
15. Sadykov S.S., Yakovlev A.V. *Ispol'zovanie metodov tsifrovoi obrabotki izobrazhenii v kolichestvennoi metallografii* [Application of images digital processing methods in quantity metal science]. *Nadezhnost' i kachestvo 2000: Tr. mezhdunar. simpoziuma, Penza, 22–31 maya, 2000* [Reliability and Quality 2000: Works. int. Symposium, Penza, May 22–31, 2000]. Andreev A.N. etc. ed. Penza: izd-vo Penz. gos. un-ta, 2000, pp. 55, 56. (In Russ.).
16. Logunova O.S., Makarychev P.P. Algorithms and software for recognition of low contrast images at estimation of steel quality. *Programmnye produkty i sistemy*, 2008, no. 3, pp. 79–81. (In Russ.).
17. Chichko A.N., Sachek O.A., Likhovozov S.G., Sobolev V.F., Vedeneev A.V. Algorithm and software for processing of images of perlite steels microstructures. *Izvestiya Natsional'oi akademii nauk Belarusi. Seriya fiziko-tehnicheskikh nauk*, 2010, no. 3, pp. 14–21. (In Russ.).
18. Chichko A.N., Sachek O.A., Likhovozov S.G. On some algorithms and methods of processing of images of perlite steels microstructures. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii*, 2011, no. 2, pp. 9–15. (In Russ.).
19. Chichko A.N., Likhovozov S.G., Sachek O.A., Sobolev V.F., Chichko O.I. Software for processing of images of iron-carbon alloys microstructures. *Vestnik Belorusskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta. Priborostroenie. Informatika*, 2011, no. 3, pp. 13–18. (In Russ.).
20. Chichko A.N., Sachek O.A., Likhovozov S.G. About new mathematical methods of classification of steels microstructures images. *Lit'e i metallurgiya*, 2008, no. 2, pp. 103–108. (In Russ.).

Received April 25, 2019