

АЛГОРИТМ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ, СНИМАЕМОЙ С ПОВЕРХНОСТИ МИКРОШЛИФОВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ СТАЛИ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ

А.Д. Дрозин, Н.М. Япарова, Е.Ю. Куркина

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

В процессе выплавки стали образуются неметаллические включения, ухудшающие ее свойства. Для определения их количеств и размеров из образца готовой стали делают микрошлиф, на котором можно видеть лишь срезы включений плоскостью микрошлифа, а не сами включения. По принятым в настоящее время в металлургии методикам информация, снимаемая с поверхности микрошлифа, обрабатывается неэффективно. В работе предложен основанный на теории вероятностей и математической статистике метод математической обработки информации о срезах включений для определения количеств и размеров самих включений в объеме металла. Приведен алгоритм расчета. Проведена проверка метода, которая показала пригодность алгоритма.

Ключевые слова: обработка информации, кристаллография, неметаллические включения, стереология.

Введение

Неметаллические включения являются вредными примесями в стали [1–4]. Как правило, они имеют размеры 0,1–100 мкм. Для определения их количеств и размеров обычно берут пробу металла, разрезают ее на некотором расстоянии от поверхности и полируют. Полученный микрошлиф рассматривают в микроскоп. Плоскость шлифа разрезает попавшие в нее включения, и исследователь видит в микроскоп срезы этих включений (рис. 1). Размеры срезов делят на диапазоны и подсчитывают количество срезов, попавших в каждый диапазон. На основе этих данных производят выбраковку металла по неметаллическим включениям.

Однако такой подход дает искаженную картину количеств и размеров включений. Как показано на рис. 2, включения разных размеров могут дать срезы одинакового размера, и исследователь будет считать их одинаковыми. И наоборот, включения одного размера могут давать совершенно разные срезы.

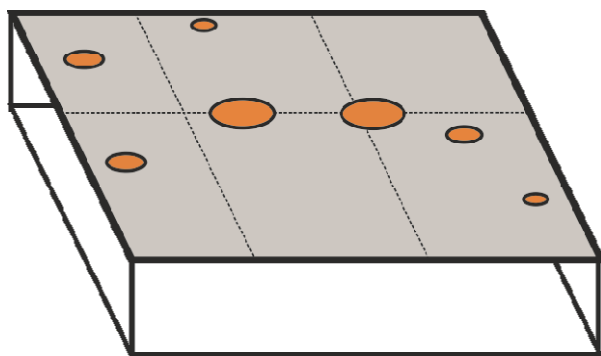


Рис. 1. Плоскость шлифа со срезами включений

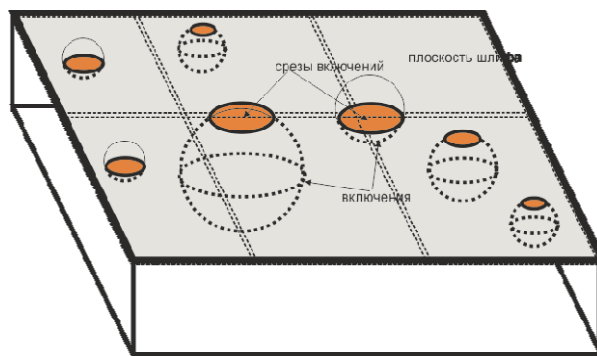


Рис. 2. Образование срезов включений

Разработано много методов определения распределения частиц по размерам (не только включений) из распределения по размерам их сечений. Подробные обзоры этих методов представлены в [5–10]. Основная идея этих методов заключается в следующем [11–13]. Задаваясь неизвестной функцией $N(R)$ распределения частиц по размерам (где R – радиус частицы), используя теорию вероятностей, получали функцию $n(r)$ распределения размеров сечений (где r – радиус

сечения) как интеграл с подынтегральным выражением, включающим $N(R)$. Обращая этот интеграл, получали $N(R)$ как интегральную функцию от $n(r)$. Полученный интеграл вычисляли различными численными методами.

Недостатки этих методов заключаются в следующем. Они не оценивают ошибку в определении истинного распределения частиц по размерам. Также, если почему-либо случайное наблюдаемое распределение размеров срезов не является монотонно убывающей функцией, эти методы могут давать отрицательные значения чисел частиц в некоторых диапазонах размеров.

Нами был предложен новый метод определения распределения частиц по размерам без этих недостатков [14]. Основными особенностями метода являются следующие.

1. При изучении вероятности пересечения данной частицы плоскостью разреза обычно исследователи рассматривают тонкий срез (толщина равна максимальному или среднему диаметру частиц) вблизи плоскости сечения. В данной работе предполагалось, что частица может быть расположена в любом месте всего образца. Этот подход позволил сделать некоторые дополнительные выводы.

2. Обычно исследователи предполагают, что число частиц с сечениями, попадающими в любой размерный интервал, подчиняется распределению Пуассона. В [14] было показано, что число частиц с сечениями, попадающими в любой интервал размеров $[r_1, r_2]$, должно подчиняться биномиальному распределению, которое может быть аппроксимировано либо распределением Пуассона, либо нормальным распределением [15]. В указанной работе использовалось нормальное приближение. Такой подход позволил получить некоторые новые полезные соотношения.

3. Когда исследователи подсчитывают сечения включений, они делят интервал $[0, r_M]$, где r_M – максимальный радиус сечений, на некоторые подынтервалы $[0, r_1]$, $[r_1, r_2]$, ..., $[r_{M-1}, r_M]$ и подсчитывают числа сечений, попадающих в каждый размерный интервал. В описываемой работе интервал $[0, R_M]$, где R_M – максимальный радиус самих включений, был разделен на почти те же промежуточные интервалы $[0, r_1]$, $[r_1, r_2]$, ..., $[r_{M-1}, R_M]$, а функция распределения частиц по размерам $N(R)$ рассматривалась как сплайн на множестве узлов (r_i, N_i) , $i = 2, \dots, M$, где $N_i = N(r_i)$. Таким образом, сложная задача определения неизвестной функции $N(R)$ была сведена к более простой задаче определения M чисел N_1, N_2, \dots, N_M .

На основе указанной работы был разработан алгоритм, позволяющий более полно и качественно использовать информацию, получаемую при обследовании микрошлифов образцов исследуемой стали.

1. Алгоритм математической обработки информации, снимаемой с поверхности микрошлифов при исследовании загрязненности стали неметаллическими включениями

1.1. Описание алгоритма

А0. При обследовании шлифов, изготовленных из данной партии металла, должна быть заполнена таблица вида (табл. 1).

Таблица 1

Исходная таблица

№	Обследованная площадь, мм ²	Верхние границы диапазонов размеров включений, мкм							
		1	2	3	5	7	10	15	20
1	50	10	7	7	5	4	4	3	2
2	100	18	16	12	14	5	0	5	5
3	100	20	14	14	10	4	5	3	2

Введем обозначения: L – число исследуемых шлифов, M – число размерных интервалов, S_l – площадь шлифа с номером l , $y_{l,i}$ – число срезов включений из i -го размерного интервала на шлифе с номером l . Так в табл. 1: $L = 3$, $M = 8$, $S_2 = 100$ мм², $y_{2,4} = 14$. Все расчеты, связанные с единицами длины, удобно выполнять в миллиметрах.

А1. Расчет вспомогательных матриц:

$$\bar{\Phi} = \begin{pmatrix} \Phi_{11} & \dots & \Phi_{1M} \\ \dots & \dots & \dots \\ \Phi_{M1} & \dots & \Phi_{MM} \end{pmatrix}; \quad \bar{\Theta} = \begin{pmatrix} \Theta_{11} & \dots & \Theta_{1M} \\ \dots & \dots & \dots \\ \Theta_{M1} & \dots & \Theta_{MM} \end{pmatrix}.$$

А1.1. Расчет элементов матрицы $\bar{\Phi}$:

$$\Phi_{ij} = \begin{cases} r_1^2, & \text{если } i = j = 1, \\ r_2^2 - r_1^2 - r_1^2 \ln \frac{r_2 - \sqrt{r_2^2 - r_1^2}}{r_1} - r_2 \sqrt{r_2^2 - r_1^2}, & \text{если } i = 1, j = 2, \\ r_j^2 - r_{j-1}^2 - r_1^2 \ln \frac{r_j - \sqrt{r_j^2 - r_1^2}}{r_{j-1} - \sqrt{r_{j-1}^2 - r_1^2}} - r_j \sqrt{r_j^2 - r_1^2} + r_{j-1} \sqrt{r_{j-1}^2 - r_1^2}, & \text{если } i = 1, j > 2; \\ 0, & \text{если } j < i, \\ r_{i-1}^2 \ln \frac{r_i - \sqrt{r_i^2 - r_{i-1}^2}}{r_{i-1}} + r_i \sqrt{r_i^2 - r_{i-1}^2}, & \text{если } i > 1, j = i, \\ r_{i-1}^2 \ln \frac{r_j - \sqrt{r_j^2 - r_{i-1}^2}}{r_{j-1} - \sqrt{r_{j-1}^2 - r_{i-1}^2}} - r_i^2 \ln \frac{r_j - \sqrt{r_j^2 - r_i^2}}{r_{j-1}} + \\ + r_j \left(\sqrt{r_j^2 - r_{i-1}^2} - \sqrt{r_j^2 - r_i^2} \right) - r_{j-1} \sqrt{r_{j-1}^2 - r_{i-1}^2}, & \text{если } i > 1, j = i + 1, \\ r_{i-1}^2 \ln \frac{r_j - \sqrt{r_j^2 - r_{i-1}^2}}{r_{j-1} - \sqrt{r_{j-1}^2 - r_{i-1}^2}} - r_i^2 \ln \frac{r_j - \sqrt{r_j^2 - r_i^2}}{r_{j-1} - \sqrt{r_{j-1}^2 - r_i^2}} + \\ + r_j \left(\sqrt{r_j^2 - r_{i-1}^2} - \sqrt{r_j^2 - r_i^2} \right) - r_{j-1} \left(\sqrt{r_{j-1}^2 - r_{i-1}^2} - \sqrt{r_{j-1}^2 - r_i^2} \right), & \text{если } i > 1, j > i + 1 \end{cases}$$

$(i, j = 1, \dots, M).$

Элемент Φ_{ij} определяет долю срезов включений из j -го размерного диапазона *включений*, попадающих в i -й размерный диапазон *срезов*.

А1.2. Расчет матрицы $\bar{\Theta}$:

$$\bar{\Theta} = \bar{\Phi}^{-1}.$$

Заметим, что элементы матриц $\bar{\Phi}$ и $\bar{\Theta}$ зависят только от выбора диапазонов размеров включений. Фактически, их нужно вычислить только один раз. В случае если диапазоны такие, как в табл. 1, матрица $\bar{\Theta}$ равна

$$\bar{\Theta} = \begin{pmatrix} d = ((0-1] & (1-2] & (2-3] & (3-5] & (5-7] & (7-10] & (10-15] & (15-20]) \\ 400 & -158,882 & 36,01098 & -7,0613 & 1,66294 & -0,48301 & 0,042313 & -0,03341 \\ 0 & 186,294 & -111,8921 & 9,475127 & -4,98322 & 0,416576 & -0,26237 & 0,013874 \\ 0 & 0 & 139,93307 & -50,849 & 11,97536 & -3,19812 & 0,373078 & -0,20961 \\ 0 & 0 & 0 & 39,55505 & -25,4649 & 3,010473 & -1,12494 & 0,164829 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 31,70203 & -15,5809 & 1,874784 & -0,90048 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 14,52936 & -6,42709 & 1,439377 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5,597323 & -3,76784 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4,67192 \end{pmatrix} \cdot 10^4.$$

А2. Расчет величин $S, \tilde{y}_i, \bar{\Lambda}^{em}$:

$$S = \sum_{l=1}^L S_l, \quad \tilde{y}_i = \sqrt{\frac{1}{S} \sum_{l=1}^L \frac{y_{l,i}^2}{S_l}}, \quad \bar{\Lambda}^{em} = (\tilde{y}_1, \tilde{y}_2, \dots, \tilde{y}_M)^T.$$

Здесь S – суммарная площадь всех шлифов; \tilde{y}_i – усредненное по всем шлифам число срезов включений в i -м размерном диапазоне.

Для случая, приведенного в табл. 1, $S = 250$,

$$\bar{\Lambda}^{em} = (0,17041 \ 0,14832 \ 0,13236 \ 0,11764 \ 0,05404 \ 0,04775 \ 0,04561 \ 0,03847)^T.$$

А3. Расчет плотности распределения включений по размерам:

$$\bar{N}^{em} = \bar{\Phi}^{-1} \bar{\Lambda}^{em}, M^{-1}.$$

Для случая, приведенного в табл. 1,

$$\bar{N}^{em} = (486017,5 \ 136753,4 \ 130432,8 \ 33761,31 \ 10199,68 \ 4560,207 \ 1103,255 \ 1797,324)^T.$$

А4. Расчет количеств включений в каждом размерном интервале:

$$N_i^{eV} = N_i^{em} \Delta r_i,$$

где Δr_i – ширина соответствующего интервала, мм. В данном случае

$$\Delta r_1 = \Delta r_2 = \Delta r_3 = 0,5 \cdot 10^{-3}; \Delta r_4 = \Delta r_5 = 1 \cdot 10^{-3}; \Delta r_6 = 1,5 \cdot 10^{-3}; \Delta r_7 = \Delta r_8 = 2,5 \cdot 10^{-3}, \text{ мм.}$$

Окончательно получаем оценки истинных количеств включений каждого диапазона размеров в одном кубическом миллиметре металла (табл. 2).

Таблица 2

Результаты расчета

Верхние границы диапазонов размеров включений, мкм	1	2	3	5	7	10	15	20
Наиболее вероятные значения истинных количеств включений, 1/мм ³	243,01	68,38	65,22	33,76	10,20	6,84	2,76	4,49

1.2. Случай недопустимого решения

Может случиться, что полученные по изложенной выше методике значения некоторых оценок N_j^{em} окажутся отрицательными. Что это значит?

Методика, которой мы воспользовались, вытекает, в частности, из принципа максимального правдоподобия, который предполагает, что в эксперименте реализовалась наиболее вероятная ситуация.

При исследовании шлифов мы можем столкнуться и с маловероятными случаями распределения срезов включений. Например, может оказаться, что в какой-то размерный диапазон срезов вообще не попало ни одно включение, хотя это и маловероятно, если есть включения больших размеров.

В этом случае наиболее правильно было бы повторить наблюдения, сделав и исследовав новые шлифы из данного образца.

В случае, если в силу каких-либо причин сделать это затруднительно или невозможно, для полного использования информации, полученной из имеющихся шлифов, можно воспользоваться численными методами поиска экстремума функции нескольких переменных [16].

1.3. Компьютерная программа расчетов

Для выполнения расчетов была разработана компьютерная программа в пакете Excel [17]¹. Пользователь заполняет строку диапазонов диаметров сечений частиц в микрометрах. Следующие строки содержат площади сечений просмотренных плоскостей среза в мм и количества сре-

¹ Если Вы желаете провести расчеты по этой программе, напишите мне по адресу drozinad@gmail.com и я Вам ее вышлю.

Краткие сообщения

зов в каждом размерном диапазоне. После этого пользователь нажимает соответствующую кнопку и в окне появляются результаты расчетов в м^{-3} (рис. 3).

Рис. 3. Интерфейс программы

2. Тестирование метода

Для проверки адекватности разработанного метода был проведен ряд численных экспериментов следующим образом.

1. Выбирались размерные интервалы диаметров включений и задавались количества включений в каждом размерном интервале в расчете на единицу объема.

2. Рассматривался образец, представляющий собой прямоугольный параллелепипед высотой 1 см. Задавался количество плоскостей среза, параллельных основанию параллелепипеда и координаты срезов по высоте. Рассчитывалось, какое количество включений каждого размера находилось в выделенном объеме.

3. С помощью генератора равномерно распределенных случайных чисел определялись координаты каждой частицы. Если частица попадала в плоскость среза какой-нибудь из секущих плоскостей, рассчитывался диаметр сечения и определялся размерный интервал, в который она попадала.

4. Полученные данные по срезам включений вносились в исходную таблицу выше описанной компьютерной программы, и производился расчет объемного распределения включений по размерам.

5. Производилось сравнение исходного распределения включений по размерам, рассчитаным по срезам, и определялась относительная погрешность метода.

Пример одного из расчетов приведен в табл. 3.

Таблица 3

Вариант результатов тестирования

$d, \mu\text{m}$	0–1	1–2	2–3	3–5	5–7	7–10	10–15	15–20
	Заданное количество частиц, $1/\text{м}^3$							
Количества частиц, $1/\text{м}^3$	1,00E+12	5,00E+11	1,00E+11	5,00E+10	2,00E+10	1,00E+10	5,00E+09	2,00E+09
	Количество сечений							
100	75	70	18	20	7	10	5	3
100	81	69	20	15	10	6	3	1
100	53	65	26	20	9	6	6	2
	Рассчитанные количества частиц, $1/\text{м}^3$							
	9,06E+11	5,20E+11	1,08E+11	5,26E+10	1,67E+10	1,23E+10	4,72E+09	2,52E+09
	Отклонения, %							
	–9,36	3,91	8,25	5,18	–16,64	23,12	–5,51	26,16

Было проведено большое число тестов при различных исходных количествах включений. Выявлены следующие закономерности.

Рассчитанные по изложенной методике оценки количеств включений достаточно близки к истинным. Средняя относительная погрешность колебалась от 0,5 до 30 %.

Результаты расчетов оказывались тем ближе к истинным значениям, чем больше было исходное количество включений каждого размера. Так, если общее количество включений составляло около $1,6 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-3}$ (в соотношении, как в табл. 3), то средняя относительная погрешность составляла 1,7 %, если $1,6 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ – 4,9 %, а если $1,6 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ – 31,3 %. Причина заключается в том, что при относительно малом числе частиц в обследуемую плоскость попадает очень мало частиц (например, в табл. 3 для больших сечений – 1–3). Получается очень большой разброс исходных данных для расчета и, соответственно, большая неточность.

Заключение

Был предложен новый, относительно простой метод определения истинных размеров и количеств включений в металле.

Разработаны алгоритм и универсальная компьютерная программа, которая выполняет все вычисления. Программа имеет простой понятный интерфейс, и любой может использовать ее.

Разработана процедура и компьютерная программа для тестирования предложенного метода.

Тестирование показало хорошую адекватность метода.

Литература

1. Lipiński, T. Size of Non-Metallic Inclusions High-Grade Medium Carbon Steel / T. Lipiński, A. Wach // Archives of Foundry Engineering. – 2012. – Vol. 14, no. 4. – P. 55–60.
2. Influence of Non-Metallic Inclusions on the Fatigue properties of Heavily Cold Drawn Steel Wires / K. Lambrighs, L. Verpoest, B. Verlinden, M. Wevers // Procedia Engineering. – 2010. – Vol. 2, iss. 1. – P. 173–181. DOI: 10.1016/j.proeng.2010.03.019
3. Fatigue Strength Prediction of Drilling Materials Based on the Maximum Non-Metallic Inclusion Size / D. Zeng, G. Tian, F. Liu et. al. // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2015. – Vol. 24, iss. 12. – P. 4664–4672. DOI: 10.1007/s11665-015-1753-1
4. Роцин, В.Е. Электрометаллургия и металлургия стали / В.Е. Роцин, А.В. Роцин. – Челябинск: Издат. Центр ЮУрГУ, 2013. – 571 с.
5. Салтыков, С.А. Стереометрическая металлография / С.А. Салтыков. – М.: Металлургия, 1970. – 376 с.
6. Чернявский, К.С. Стереология в металловедении / К.С. Чернявский. – М.: Металлургия, 1977. – 280 с.

7. Chraponski, J. *Usefulness evaluation of the stereological methods applied for grain size estimation* / J. Chraponski, J. Cwajna, M. Malinski // *Acta stereol.* – 1999. – Vol. 18, no. 1. – P. 81–88.
8. *Estimating Number Density NV – a Comparison of an Improved Saltykov Estimator and the Disector Method* / A. Davtian, U. Hahn, J. Ohser, D. Stoyan // *Image Anal. Stereol.* – 2000. – Vol. 19. – P. 209–214. DOI: 10.5566/ias.v19. – P. 209–214.
9. Anderssen, R.S. *Computational Methods in Stereology* / R.S. Anderssen, A.J. Jakeman // *Proceedings of the fourth international congress for stereology.* – U.S. government printing office, Washington, 1976. – P. 13–18.
10. Jakeman, A.J. *On Optimal Forms for Stereological Data* / A.J. Jakeman, R.S. Anderssen // *Proceedings of the fourth international congress for stereology.* – U.S. government printing office, Washington, 1976. – P. 69–74.
11. Kendall, M.G. *Geometric Probability* / M.G. Kendall, P.A.P. Moran. – Charles Griffin, London, 1963.
12. Tanemura, M. *Estimation of Linear Functionals by Maximum Likelihood* / M. Tanemura // *Proceedings of the First International Symposium for Science on Form.* – KTK Scientific Publishers, Tokyo, 1986. – P. 157–165.
13. Nicholson, W.L. *On Optimal Forms for Stereological Data* / W.L. Nicholson // *Proceedings of the fourth international congress for stereology.* – U.S. government printing office, Washington, 1976. – P. 19–24.
14. Drozin, A.D. *Calculating of the True Sizes and the Numbers of Spherical Inclusions in Metal* / Drozin, A.D. // *Metallography, Microstructure, and Analysis.* – 2017. – Vol. 6, iss. 3. – P. 240–246. – <https://doi.org/10.1007/s13632-017-0354-9>. DOI: 10.1007/s13632-017-0354-9
15. Феллер, В. *Введение в теорию вероятностей и ее приложения* / В. Феллер. – М.: Мир, 1963. – Т. 2. – 754 с.
16. *Численные методы условной оптимизации* / под ред. Ф. Галла, У. Мюрреля. – М.: Мир, 1977. – 296 с.
17. *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2015663317 Российская Федерация. Программа расчета распределения включений в объеме металла по известному распределению их срезов плоскостью шлифа* / А.Д. Дрозин. – № 2015660078; заявл. 22.10.2015; опублик. 15.12.2015.

Дрозин Александр Дмитриевич, д-р техн. наук, профессор, директор Центра элитного образования, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; drozinad@susu.ru.

Япарова Наталья Михайловна, канд. физ.-мат. наук, заведующий кафедрой вычислительной математики и высокопроизводительных вычислений, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; iaparovam@susu.ru.

Куркина Елена Юрьевна, заместитель директора Центра элитного образования, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; kurkinaei@susu.ru.

Поступила в редакцию 25 декабря 2017 г.

ALGORITHM OF MATHEMATICAL PROCESSING OF INFORMATION OBTAINED FROM THE SURFACE OF STEEL SAMPLES AT THE STUDY OF POLLUTION OF STEEL BY NON-METALLIC INCLUSIONS

A.D. Drozin, drozinad@susu.ru,

N.M. Yaparova, iaparovnm@susu.ru,

E.Yu. Kurkina, kurkinaei@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

In the process of steel smelting, nonmetallic inclusions are formed, which impair steel quality. To determine their numbers and sizes, polished planes are made from a sample of finished steel, on which only the inclusion cross sections can be seen, and not the inclusions themselves. According to currently accepted methods in metallurgy, information taken from the surface of polished planes is not efficiently processed. The paper proposes a method based on the theory of probability and mathematical statistics for the mathematical processing of information on inclusion sections for determining the quantities and sizes of the inclusions themselves in the volume of a metal. The algorithm of calculation is given. The method was tested, which showed the suitability of the algorithm.

Keywords: information processing, crystallography, non-metallic inclusions, stereology.

References

1. Lipiński T., Wach A. Size of Non-Metallic Inclusions High-Grade Medium Carbon Steel. *Archives of Foundry Engineering*, 2012, vol. 14, no. 4, pp. 55–60.
2. Lambrighs K., Verpoest L., Verlinden B., Wevers M. Influence of Non-Metallic Inclusions on the Fatigue Properties of Heavily Cold Drawn Steel Wires. *Procedia Engineering*, 2010, vol. 2, iss. 1, pp. 173–181. DOI: 10.1016/j.proeng.2010.03.019
3. D. Zeng, G. Tian, F. Liu, T. Shi, Z. Zhang, J. Hu, W. Liu, Z. Ouyang. Fatigue Strength Prediction of Drilling Materials Based on the Maximum Non-Metallic Inclusion Size. *JMEP*, 2015, vol. 24, iss. 12, pp. 4664–4672. DOI: 10.1007/s11665-015-1753-1
4. Roshchin V.E. *Elektrometallurgiya i metallurgiya stali* [Electrometallurgy and Metallurgy of Steel]. Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., 2013. 571 p.
5. Saltykov S.A. *Stereometricheskaya metallografiya* [Stereometric Metallography]. Moscow, Metallurgy Publ., 1970. 376 p.
6. Chernyavskiy K.S. *Stereologiy v materialovedenii* [Stereology in Metallurgy]. Moscow, Metallurgy Publ., 1977. 280 p.
7. Chraponski J., Cwajna J., Malinski M. Usefulness Evaluation of the Stereological Methods Applied for Grain Size Estimation. *Acta Stereol.*, 1999, vol. 18, no. 1, pp. 81–88.
8. Davtian A., Hahn U., Ohser J., Stoyan D. Estimating Number Density NV – a Comparison of an Improved Saltykov Estimator and the Disector Method. *Image Anal. Stereol.*, 2000, vol. 19, pp. 209–214. DOI: 10.5566/ias.v19. – pp. 209–214.
9. Anderssen R.S., Jakeman A.J. Computational Methods in Stereology. *Proceedings of the Fourth International Congress for Stereology*, U.S. Government Printing Office, Washington, 1976, pp. 13–18.
10. Jakeman A.J., Anderssen R.S. On Optimal Forms for Stereological Data. *Proceedings of the Fourth International Congress for Stereology*, U.S. Government Printing Office, Washington, 1976, pp. 69–74.
11. Kendall M.G., Moran P.A.P. *Geometric Probability*. Charles Griffin, London, 1963.
12. Tanemura M. Estimation of Linear Functionals by Maximum Likelihood. *Proceedings of the First International Symposium for Science on Form*. KTK Scientific Publishers, Tokyo, 1986, pp. 157–165.

13. Nicholson W.L. On Optimal Forms for Stereological Data. *Proceedings of the Fourth International Congress for Stereology*. U.S. Government Printing Office, Washington, 1976, pp. 19–24.
14. Drozin A.D. Calculating of the True Sizes and the Numbers of Spherical Inclusions in Metal. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 2017, vol. 6, iss. 3. – pp. 240–246. Available at: <https://doi.org/10.1007/s13632-017-0354-9>. DOI: 10.1007/s13632 -017-0354-9
15. Feller W. *An Introduction to Probability Theory and Its Applications*. John Wiley & Sons, Inc, New York, London, Sydney, 1968.
16. Gill P.E., Murray W. *Numerical Methods for Constrained Optimization*. Academic Press, London, 1974.
17. Drozin A.D. *Programma rascheta raspredeleniya vklyucheniye v oboyme metalla po izvestnomu raspredeleniyu ikh srezov ploskostyu shlifa* [The Program of Calculation of Distribution of Inclusions in Volume of Metal on the Known Distribution of their Sections the Microsection Plane]. Patent RF, no. 2015663317, 15.12.2015.

Received 25 December 2017

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Дрозин, А.Д. Алгоритм математической обработки информации, снимаемой с поверхности микрошлифов при исследовании загрязненности стали нематаллическими включениями / А.Д. Дрозин, Н.М. Япарова, Е.Ю. Куркина // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2018. – Т. 18, № 1. – С. 124–132. DOI: 10.14529/ctcr180115

FOR CITATION

Drozin A.D., Yaparova N.M., Kurkina E.Yu. Algorithm of Mathematical Processing of Information Obtained from the Surface of Steel Samples at the Study of Pollution of Steel by Non-Metallic inclusions. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 124–132. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr180115
