

**БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

УДК 004.932 + 669

САЧЕК
Ольга Александровна

**МЕТОД И АЛГОРИТМЫ ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНОГО
АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ СТРУКТУР ПРОМЫШЛЕННЫХ
ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности
05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации

Минск, 2011

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете.

Научный руководитель: **Чичко Александр Николаевич**, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Машины и технология литейного производства» Белорусского национального технического университета

Официальные оппоненты: **Старовойтов Валерий Васильевич**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Объединенного института проблем информатики НАН Беларуси;

Садов Василий Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры интеллектуальных систем Белорусского государственного университета

Оппонирующая организация: ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси»

Защита состоится «3» ноября 2011 г. в 14³⁰ на заседании совета по защите диссертаций К 02.05.01 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65, корп. 1, ауд. 202, тел. ученого секретаря (017) 293-95-64, e-mail gurski2010@gmail.com.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «30» сентября 2011 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций,
кандидат технических наук, доцент

Н.Н. Гурский

© Сачек О.А., 2011

© БНТУ, 2011

ВВЕДЕНИЕ

Разработка методов и алгоритмов автоматизации обработки микроструктур железоуглеродистых сплавов является сложнейшей задачей компьютерного анализа изображений, которая теснейшим образом связана с разработкой технологических процессов промышленного производства.

Анализ методик, используемых в заводских лабораториях, а также литературных данных, проведенный на момент начала диссертационной работы, показал, что методы и алгоритмы автоматизированного анализа микроструктур железоуглеродистых сплавов (углеродистые стали перлитного класса, серые чугуны), еще недостаточно разработаны, что затрудняет решение ряда практических задач промышленного производства.

В настоящей работе развиваются методы и алгоритмы обработки изображений микроструктур, позволяющие на количественном уровне ранжировать микроструктуры одного класса сплавов, что позволяет создать математический аппарат для решения многочисленных научно-технических задач металлургического и литейного производства.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами, темами. Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям фундаментальных и прикладных научных исследований. Результаты, изложенные в диссертации, получены в рамках исследовательской работы, проводимой в БНТУ по заданию ГППНИ «Металлургия» «Разработка математических методов для совершенствования технологии получения бронзированной проволоки с высоким уровнем механических свойств» (номер госрегистрации 20091218, задание 1.33, срок выполнения 2006–2010 гг.).

Цель и задачи исследования – разработка метода и алгоритмов для компьютерного анализа изображений структур железоуглеродистых сплавов с целью совершенствования технологических процессов металлургического производства. Для реализации цели были решены следующие научно-технические задачи:

- разработать метод компьютерного анализа изображений микроструктур перлитной стали на основе расчета статистического распределения межпластиночных расстояний микроструктур;
- разработать алгоритм для параметризации изображений микроструктур перлитных сталей на основе статистической функции распределения межпластиночных расстояний микроструктур;
- разработать алгоритм автоматизированного определения статистических распределений характеристик графитной фазы по изображениям микроструктур серого чугуна;
- разработать алгоритм для количественного анализа характеристик изображений макроструктуры темплетов стальных слитков металлургического производства;
- провести апробацию разработанных алгоритмов для решения прикладных задач металлургического производства.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются изображения структур промышленных железоуглеродистых сплавов (углеродистая сталь, чугун), используемых в металлургическом производстве. Предметом исследования являются алгоритмы и методы обработки изображений макро- и микроструктур сплавов.

Методы исследования. В работе использованы методы и алгоритмы компьютерной обработки изображений структур промышленных железоуглеродистых сплавов. Для получения изображений микроструктур использованы электронный микроскоп Vega II LMV–Tescan и оптический микроскоп МИМ-6.

Положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Метод автоматизированного определения межпластиночных расстояний по изображениям микроструктур перлитных сталей, полученных с использованием электронного микроскопа, отличающийся от известных способом определения кратчайших расстояний между феррито-цементитными пластинами и расчетом статистической функции распределения межпластиночных расстояний в микроструктуре, что позволяет устранить субъективный фактор при обработке перлитных колоний, сократить время определения межпластиночных расстояний.
2. Алгоритм для параметризации изображений микроструктур перлитных сталей, отличающийся от известных методом автоматизированного определения межпластиночных расстояний и способом расчета характеристик изображений микроструктур на основе статистической функции распределения межпластиночных расстояний

по всему выделенному полю микроструктур, что позволяет исследовать взаимосвязи между свойствами изделий промышленного производства и характеристиками их микроструктур с целью совершенствования металлургических технологий.

3. Алгоритм автоматизированной обработки изображений микроструктур серого чугуна, полученных с использованием оптического микроскопа, отличающийся от известных способом расчета статистических функций распределения характеристик графитной фазы, распределенной хаотически в матрице.

4. Алгоритм автоматизированного определения характеристик изображений макроструктур темплетов стальных слитков металлургического производства, отличающийся от известных способом количественной оценки металлургических дефектов слитка, что позволяет усовершенствовать методы разработки технологических режимов разливки сталей.

Личный вклад соискателя. Основные результаты, касающиеся разработки и алгоритмизации обработки изображений, изложенные в диссертации и выносимые на защиту, получены автором лично.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных конференциях: «Молодежь в науке – 2009» (г. Минск, 21–24 апреля 2009 г.), «Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов» (г. Минск, 28–29 октября 2009 г.), «Информационные технологии, электронные приборы и системы (г. Минск, 6–7 апреля 2010 г.)», «Современные информационные компьютерные технологии» (г. Гродно, 26–28 апреля 2010 г.), «Системный анализ и информационные технологии» (г. Киев, 25–29 мая 2010 г.), «Информационные технологии в промышленности» (г. Минск, 28–29 октября 2010 г.), «Актуальные проблемы науки и техники» (г. Уфа, 9 декабря 2010 г.).

Опубликованность результатов диссертации. По основным результатам выполненных исследований опубликовано 17 печатных работ. Из них 10 статей опубликовано в научных журналах, 7 статей в материалах международных научно-практических конференциях (общее количество страниц составляет 4,05 авторского листа), получено 2 свидетельства о регистрации программы.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, спис-

ка использованных источников и четырех приложений. Полный объем диссертации составляет 161 страница, включая 81 рисунок, 30 таблиц, список использованных источников из 112 наименований и приложения на 25 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проанализирован математический аппарат и алгоритмы, которые используются при обработке полутоновых и черно-белых изображений.

Во второй главе рассматривается математический аппарат, который использован для построения статистической функции распределения межпластиночных расстояний. В основе математического аппарата положен метод треугольников, суть которого сводится к построению на феррито-цементитных пластинах множества треугольников, по площади которых и определяются кратчайшие межпластиночные расстояния. Алгоритм построения статистической функции распределения представлен ниже.

Шаг 1. Преобразование исходного изображения микроструктуры (множество $\Omega^0 = \{N_{ij}^0 \in N\}$) при помощи функций пороговой обработки в полутоновое изображение (множество $\Omega^1 = \{N_{ij}^1 \in R \mid 0 \leq N_{ij}^1 \leq 1\}$).

Шаг 2. Преобразование полутонового изображения с использованием (1) в вектор длиной m бинаризованных изображений $\Omega^2 = \{\Omega_1^2, \Omega_2^2, \dots, \Omega_m^2\}$, где $\Omega_k^2 = \{N_{ijk}^2\}$, $k=1, m$.

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

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

Шаг 3. Преобразование вектора изображений в бинаризованное изображение микроструктуры $\Omega^3 = \Omega_l^2 = \{N_{ij}^3 \mid N_{ij}^3 = 0 \text{ если } N_{ij}^3 = 1\}$, где l – индекс вектора параметров α , для которого выполняется условие

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

$$\text{где } \alpha_k = \frac{\sum_{i=1}^{L_x} \sum_{j=1}^{L_y} t_{ij}^k}{L_x L_y - \sum_{i=1}^{L_x} \sum_{j=1}^{L_y} t_{ij}^k};$$

i, 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

$$t_{ij}^k = \begin{cases} 1, & \text{если } N_{ijk}^2 = -1; \\ 0, & \text{если } N_{ijk}^2 = 1; \end{cases}$$

$k = 1, m$;

μ – заданное значение порога бинаризации;

ε – отклонение μ .

Шаг 4. Определение межпластиночных расстояний микро-структуры ($\Omega^4 = \{d_{ij}^{\ddot{e}} \in R \mid N_{ij}^3 = 1\}$) с использованием формулы

$$d_{ij}^{\ddot{e}} = \frac{(d_1 + d_2) \cdot (d_3 + d_4)}{\sqrt{(d_1 + d_2)^2 + (d_3 + d_4)^2}}, \quad (3)$$

где d_1, d_2, d_3, d_4 – значения, удовлетворяющие условиям

$$\begin{cases} N_{i,(j+d_1+1)}^3 = 0; \\ N_{i,(j+w)}^3 = 1, \quad \forall w = \overline{1, d_1}; \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} N_{(i+d_2+1),j}^3 = 0; \\ N_{(i+w),j}^3 = 1, \quad \forall w = \overline{1, d_2}; \end{cases} \quad (5)$$

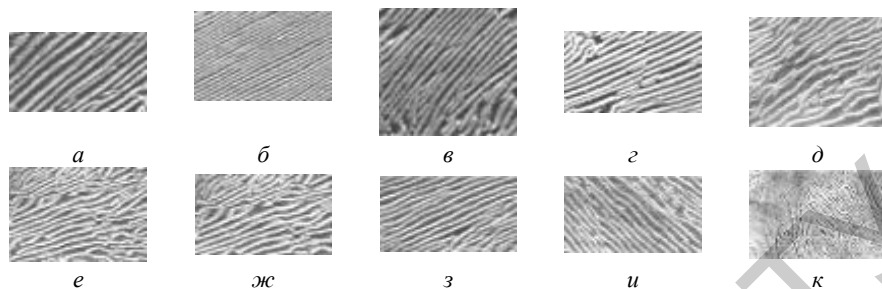
$$\begin{cases} N_{i,(j-d_3-1)}^3 = 1; \\ N_{i,(j-v)}^3 = 1, \quad \forall v = \overline{1, a}; \\ N_{i,(j-w)}^3 = 0, \quad \forall w = \overline{a+1, d_3}; \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} N_{(i-d_4-1),j}^3 = 1; \\ N_{(i-v),j}^3 = 0, \text{ \textasciitilde{a} \textasciitilde{a} \textasciitilde{a} } w = \overline{1, a}; \\ N_{(i-w),j}^3 = 0, \text{ \textasciitilde{a} \textasciitilde{a} \textasciitilde{a} } w = \overline{a + 1, d_4}. \end{cases} \quad (7)$$

Шаг 5. Построение функции распределения межпластиночных расстояний микроструктуры $H(d_{пл})$ для q интервалов дискретизации значений межпластиночных расстояний, вычисляемых как: $(0; 3 \cdot \Delta d/2]$, $(3 \cdot \Delta d/2; 5 \cdot \Delta d/2]$, ..., $((2q-1) \cdot \Delta d/2; (2q+1) \cdot \Delta d/2]$, где Δd – шаг дискретизации межпластиночных расстояний. Таким образом, значениями функции $H(d_{пл})$ являются дискретными значениями межпластиночных расстояний: $d_{i\bar{e}}^k = \Delta d \cdot k$, где $k = 1, q$.

Шаг 6. Преобразование функции $H(d_{пл})$ в нормированную функцию распределения межпластиночных расстояний микроструктуры $H_p(d_{пл})$ по формуле $H_p(d_{i\bar{e}}^k) = H(d_{i\bar{e}}^k) / n$, где n – число всех межпластиночных расстояний микроструктуры.

В качестве объектов для обработки изображений с целью определения межпластиночного расстояния были использованы микроструктуры катанки перлитной стали диаметром $5,5 \cdot 10^{-3}$ м (рисунок 1), получаемой на РУП «БМЗ» (Белорусский металлургический завод, Беларусь, г. Жлобин). Для каждой из этих микроструктур, с использованием представленного математического аппарата с помощью специально разработанной программы автоматизированной обработки микроструктур «АОМ-1» (свидетельство о регистрации № 85 от 16.06.2009) были рассчитаны функции распределения $H_p(d_{пл})$, на базе значений которых были определены значения среднего межпластиночного расстояния. Проведен сравнительный анализ межпластиночных расстояний перлитной стали, рассчитанных с помощью компьютерного метода треугольников и традиционного метода. Показано, что отклонение средних значений межпластиночных расстояний не превышает 1 %. Следует отметить, что традиционный метод требует для обработки одного образца порядка 7-9 часов работы металловеда. В то время как предлагаемый метод обрабатывает аналогичную микроструктуру за секунды. Таким образом, преимущество разрабатываемой методики очевидно.



a – № 1; *б* – № 2; *в* – № 3; *г* – № 4; *д* – № 5; *е* – № 6; *ж* – № 7; *з* – № 8; *и* – № 9; *к* – № 10

Рисунок 1 – Изображения микроструктур перлитной стали фрагментов №№ 1–10, использованных в исследовании (увеличение $\times 4000$)

В третьей главе приведен математический аппарат для расчета характеристик количественного анализа микроструктур перлитных сталей, вычисляемых по функции распределения $H_P(d_{\text{пл}})$. В работе были использованы следующие характеристики, вычисленные по формулам

$$P_1 = \begin{cases} d_{\text{пл}}^k - \Delta d \cdot s_1, & \text{если } H_P(d_{\text{пл}}^{k-1}) > H_P(d_{\text{пл}}^{k+1}); \\ d_{\text{пл}}^k + \Delta d \cdot s_2, & \text{если } H_P(d_{\text{пл}}^{k-1}) \leq H_P(d_{\text{пл}}^{k+1}); \end{cases}$$

где $k = \arg \max(H_P(d_{\text{пл}}^k))$;

$$s_1 = \frac{H_P(d_{\text{пл}}^{k-1}) - H_P(d_{\text{пл}}^{k+1})}{2 \cdot (H_P(d_{\text{пл}}^k) - H_P(d_{\text{пл}}^{k+1}))};$$

$$s_2 = \frac{H_P(d_{\text{пл}}^{k+1}) - H_P(d_{\text{пл}}^{k-1})}{2 \cdot (H_P(d_{\text{пл}}^k) - H_P(d_{\text{пл}}^{k-1}))}.$$

$$P_2 = \sum_{k=1}^q H_P(d_{\text{пл}}^k) \cdot d_{\text{пл}}^k.$$

$$P_3 = \sum_{i=k-1}^{k+1} H_P(d_{\text{пл}}^i) \cdot d_{\text{пл}}^i.$$

$$P_4 = \frac{\sum_{i=1}^{L_x} \sum_{j=1}^{L_y} N_{ij}^3}{L_x \cdot L_y}.$$

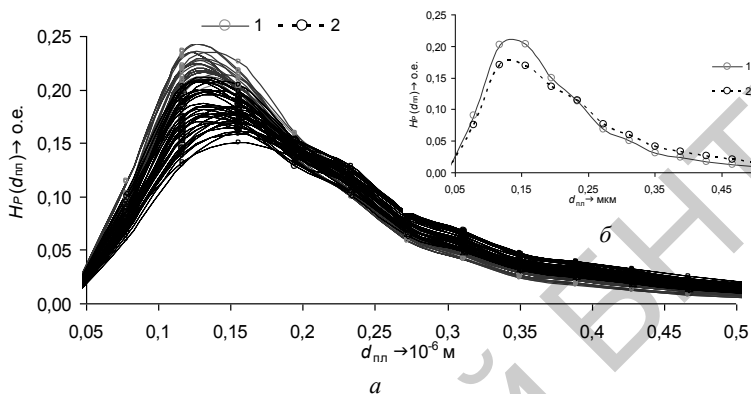
$$P_i = \sum_{i=1}^{t_i} H_P(d_{\text{иe}}^i) \cdot d_{\text{иe}}^i .$$

характеристика P_1 (мкм), характеризующая преобладающее межпластиночное расстояние микроструктуры; характеристика P_2 (мкм), характеризующая среднее межпластиночное расстояние микроструктуры; характеристика P_3 (мкм), характеризующая приведенное межпластиночное расстояние, соответствующее максимальному значению функции распределения $H_P(d_{\text{пл}})$; характеристика P_4 (о.е.), характеризующая долю цементитных пластин микроструктуры; группа характеристик P_5 – P_{14} (о.е.), характеризующих доли межпластиночных расстояний микроструктуры в различных диапазонах от d_{min} до d_i , где $d_i = 0,04 \cdot t_i$; $i = 5, 14$; $t_i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 12, 16, 26$.

Вышеперечисленные характеристики были рассчитаны для шестидесяти образцов микроструктур. Каждому образцу соответствовали значения параметров свойств проволоки (катанки) и десять фотографий микроструктур поперечного сечения катанки. По этим результатам была составлена матрица, на основе которой были изучены парные корреляции между характеристиками изображений микроструктуры и свойствами образцов. Были выявлены взаимосвязи: между относительным удлинением проволоки и характеристикой микроструктуры P_4 ($R_{xy} = -0,72$); между максимальным содержанием углерода и характеристикой P_2 ($R_{xy} = -0,69$), между содержанием хрома и характеристиками микроструктуры P_{10} ($R_{xy} = -0,69$), P_{11} ($R_{xy} = -0,71$). Эти результаты были использованы для построения многомерных регрессионных зависимостей, связывающих свойства металлургической продукции и характеристики изображений микроструктуры катанки.

В работе была решена задача классификации образцов стальной проволоки по степени расслоения проволоки с использованием функции распределения межпластиночных расстояний. На основе промышленных данных были выбраны две группы образцов микроструктур. Степень расслоя образцов первой группы А (число образцов равно 42) составляла не более $x_{\text{кр}}$ (показатель расслоя, используемый в качестве критического значения на заводе), степень расслоя для образцов группы Б – более $x_{\text{кр}}$ (число образцов равно 18). На рисунке 2 представлены усредненные функции распределения $H_P(d_{\text{пл}})$ двух групп А и Б, показывающие смещение функций друг относительно друга. Как видно из рисунка, проволока с меньшей степенью расслоя характери-

зается большим значением высокодисперсных феррито-цементитных областей и имеет более однородную структуру по сравнению с проволокой из группы с большей степенью расслоя.



1 – образцы группы А; 2 – образцы группы Б

a – одиночные функции распределения; \bar{b} – усредненные функции распределения

Рисунок 2 – Одиночные (60 шт.) и усредненные функции распределения межпластиночных расстояний, рассчитанные по изображениям микроструктур образцов двух групп катанки, с различным значением степени расслоя проволоки

В четвертой главе рассматриваются основы математического аппарата, который использован для компьютерной обработки микроструктур серого чугуна и определения характеристик графитной фазы. Алгоритм построения функции распределения характеристик графитной фазы представлен ниже.

Шаги 1–4. На этих этапах производится первоначальная обработка и бинаризация изображения (аналог этапов 1–4 предыдущего алгоритма).

Шаг 5. Формирование множества $\Omega^4 = \{N_{ij}^4 \in N\}$ маркированных пятен (графитных включений), где N_{ij}^4 – номер пятна, которому принадлежит пиксел 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 пиксела p_{ij} следующим образом, в случае если $N_{ij}^3 = 0$, то $N_{ij}^4 = 0$, иначе N_{ij}^4 вычисляется по формуле

$$N_{ij}^4 = \begin{cases} \min\{q_a, q_b\}, \text{ а́нчë } N_{i-1,j}^4 = q_a \cap N_{i,j-1}^4 = q_b; \\ q_a, \text{ а́нчë } \begin{cases} N_{i-1,j}^4 = q_a; \\ N_{i,j-1}^4 = 0; \end{cases} \cup \begin{cases} N_{i-1,j}^4 = 0; \\ N_{i,j-1}^4 = q_a; \end{cases} \\ q_{k+1}, \text{ а́нчë } N_{i-1,j}^4 = 0 \cap N_{i,j-1}^4 = 0; \end{cases} \quad (13)$$

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

Шаг 6. Определение значений площадей $S = \{s_1, s_2, \dots, s_k\}$, периметров $P = \{p_1, p_2, \dots, p_k\}$ и расстояний между графитными включениями $R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$.

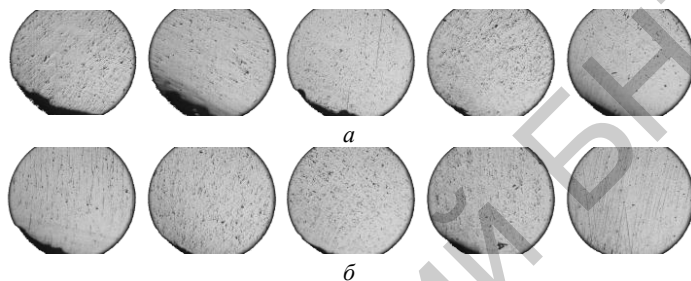
Шаг 7. Построение функций распределения значений площадей, периметров графитных включений и расстояний между ними $H_s(s), H_p(p), H_r(r)$ с шагами дискретизации значений $\Delta q_s, \Delta q_p, \Delta q_r$.

Шаг 8. Расчет интегральных статистических распределений значений площадей, периметров включений графита и расстояний между ними $H_s^{\text{нóì}}(s), H_p^{\text{нóì}}(p), H_r^{\text{нóì}}(r)$.

По данному алгоритму было разработано программное обеспечение «Автоматизированная обработка микроструктур серого чугуна» («АОМ-2 сч», свидетельство о регистрации № 225 от 24.09.2010), позволяющее проводить анализ фотографий нетравленных микроструктур серого чугуна, сделанных с помощью оптического микроскопа с увеличением $\times 100$.

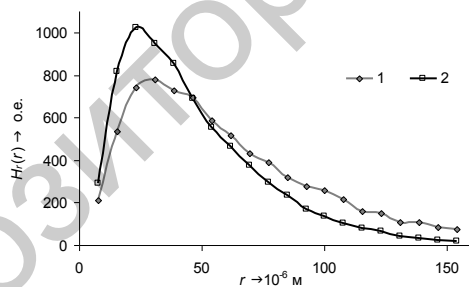
В этой главе использованы материалы хозяйственного договора на тему «Расчет показателей качества и эксплуатационных характеристик детали «коленвал» различных производителей на основе изображения типизированных участков микроструктуры» (шифр ХД № 1052/10), который выполнялся в период с марта 2010 года по июнь 2010 года между БНТУ и ЗАО «Атлант» (г. Барановичи). С использованием программы «АОМ-2 сч» были исследованы 40 изображений микроструктур серых чугунов двух производителей с различной степенью обрабатываемости. Изображения микроструктур зон припуска деталей фирмы «А», характеризующиеся меньшей степенью обрабатываемости, представлены на рисунке 3, а, деталей фирмы «D» с большей степенью обрабатываемости – на рисунке 3, б. В результате обработки изображений микроструктур были получены статистические функции распределения значений расстояний между графитными включениями, приведенные на рисунке 4,

из которого можно видеть, что образцы различных производителей характеризуются различными функциями распределения. В тоже время характеристики микроструктур образцов, полученные с использованием балльной шкалы по традиционным металлографическим исследованиям, одинаковы. Как видно из рисунка, для микроструктур изделий фирмы «D» включения графита расположены более компактно, тогда как в микроструктуре фирмы «A» включения графита более удалены друг относительно друга.



a – изображения микроструктур фирмы «A»; *b* – изображения микроструктур фирмы «D»

Рисунок 3 – Изображения областей припуска образцов фирмы «A» и фирмы «D»



1 – образцы фирмы «A»; 2 – образцы фирмы «D»

Рисунок 4 – Функции распределения значений расстояний между графитными включениями для образцов различных производителей

Данные исследования позволили с высокой степенью точности классифицировать особенности и различия распределения графитной фазы и установить следующие закономерности. Число включений и содержание графита уменьшается при движении от зоны припуска к центру, причем для образцов фирмы «D» это уменьшение носит более резкий характер и включения смещены в большей степени в зону

припуска отливки по сравнению с образцами фирмы «А». Так, для образцов фирмы «D» уменьшение содержания графита составляет от 15,36 % до 10,58 % (в 1,45 раза), для образцов фирмы «А» – от 14,25 % до 11,36 % (в 1,25 раза). Результаты исследования по выявлению различий в дисперсности перлитной матрицы серого чугуна показали, что большая часть образцов фирмы «А» имеет более тонкое пластинчатое строение перлита и большую долю малых межпластиночных расстояний по сравнению с образцами фирмы «D».

Установленные взаимосвязи между свойствами чугуна и статистическими функциями распределений, полученными в результате обработки изображений микроструктур, были положены в основу разработки новых технических решений по совершенствованию технологического процесса изготовления деталей «коленвал» в условиях ЗАО «Атлант».

Таким образом, показано, что компьютерная обработка изображений микроструктур серого чугуна с использованием разработанного алгоритма позволяет классифицировать неразличимые традиционными металлографическими методами микроструктуры на основе статистических распределений характеристик графитной фазы и межпластиночных расстояний перлита, что имеет важное практическое значение для литейного производства.

В пятой главе описываются алгоритм и математический аппарат компьютерного метода для количественной оценки изображений макроструктур темплетов слитка (рисунок 5). Ниже представлен алгоритм метода.

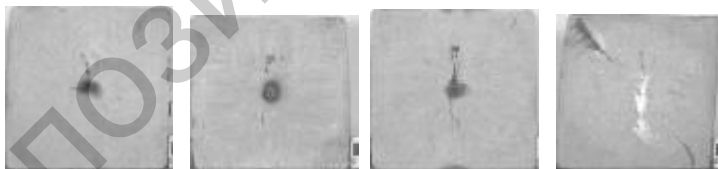


Рисунок 5 – Изображения макроструктуры темплетов поперечного сечения слитка

Шаг 1. Бинаризация изображения макроструктуры темплетта.

Шаг 2. Выделение области равноосных кристаллов Θ^1 , содержащей такие дефекты как осевые ликвационные пятна; областей столбчатых кристаллов Θ^2 , Θ^4 , Θ^6 , Θ^8 , с такими дефектами как общие ликвационные полосы и трещины; областей Θ^3 , Θ^5 , Θ^7 , Θ^9 , в которых происходит формирование угловых ликвационных полосок и трещин.

Шаг 3. Определение для каждой области темплета $\Theta^1\text{--}\Theta^9$ следующих характеристик изображения макроструктуры: общая площадь пятен дефектов области, общая длина пятен дефектов области, общий периметр пятен дефектов.

Шаг 4. Формирование матрицы $\{p''_{ij}; i = 1, r; j = 1, 27\}$, строки которой составляют значения рассчитанных характеристик макроструктуры темплетов, экспериментально полученных для r испытаний технологических режимов

Шаг 5. Преобразование матрицы $\{p''_{ij}\}$ в матрицу $\{g_{ij}\}$ на основе метода последовательного ранжирования значений характеристик макроструктуры $\{p''_{ij}\}$ таким образом, что строки матрицы $\{g_{ij}\}$ представляют собой нумерованные последовательности строк матрицы $\{p''_{ij}\}$.

Шаг 6. Вычисление комплексного критерия H_i равного сумме значений строк матрицы $\{g_{ij}\}$. Минимальное значение критерия H_i соответствует макроструктуре слитка наилучшего качества.

Данный алгоритм разрабатывался в процессе выполнения хозяйственной работы №43-05/2008 (для РУП «БМЗ») на тему «Научное сопровождение технических мероприятий по внедрению на МНЛЗ-1 РУП «БМЗ» разливки заготовки из качественных марок стали круглого сечения диаметром 140 мм для трубного производства и квадратного сечения 140×140 мм для метизного производства». Следует отметить, что с использованием традиционной схемы разработки технологии разливки стали, основанной на качественном анализе темплетов, затруднительно производить ранжирование режимов из-за слабой градации характеристик макроструктуры слитка и близости их изображений. Применение данной методики позволяет ранжировать темплеты по количественным характеристикам макроструктуры, что является основой для оптимизации технологии получения слитков.

В приложениях представлены исследованные изображения микроструктур образцов перлитной стали и чугунов, приведены копии свидетельств регистрации программных продуктов, акт внедрения программы «АОМ-1» на РУП «БМЗ», а также акты использования результатов диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

В результате выполнения диссертационной работы решена важная научно-техническая задача по разработке метода, алгоритмов и программ для обработки изображений структур железоуглеродистых сплавов, имеющая важное теоретическое и практическое значение для совершенствования технологий металлургического производства.

1. Разработан метод автоматизированного определения межпластиночных расстояний в перлитных сталях по изображениям микроструктур, полученных с использованием электронного микроскопа, отличающийся от известных способом определения кратчайших расстояний между феррито-цементитными пластинами и расчетом статистической функции распределения межпластиночных расстояний в микроструктурах. Метод позволяет устранить субъективный фактор при обработке перлитных колоний, снизить время обработки для одного образца с 7-9 часов до нескольких секунд, что имеет важное практическое значение для сокращения времени металлографических исследований в промышленном производстве [3–5, 8].

2. Разработан алгоритм для параметризации изображения микроструктур перлитных сталей, отличающийся от известных, методом автоматизированного определения межпластиночных расстояний и способом расчета характеристик изображений микроструктур на основе статистической функции распределения межпластиночных расстояний по всему выделенному полю микроструктур, что позволяет исследовать взаимосвязи между свойствами изделий промышленного производства и характеристиками их микроструктуры с целью совершенствования металлургических технологий. Алгоритм включает следующие этапы: первичную обработку изображений, бинаризацию структур с адаптивным порогом, определение функции распределения межпластиночных расстояний $H_P(d_{пл})$, расчет количественных показателей микроструктуры для различных наборов межпластиночных расстояний.

Алгоритм реализован в виде программного обеспечения «АОМ-1» (свидетельство о регистрации № 085 от 16.06.2009). Программное обеспечение «АОМ-1» внедрено в центральной заводской лаборатории РУП «Белорусский металлургический завод» в 2009 году [1–8, 11, 13, 14, 18].

3. С помощью разработанного программного обеспечения «АОМ-1» определены статистические функции распределения межпластиночных расстояний перлита углеродистых сталей для образцов катанки РУП «БМЗ». Исследованы взаимосвязи между свойствами проволоки, катанки (механические свойства, химический состав) и характеристиками изображения микроструктуры катанки. Показано, что наибольшее влияние на характеристики изображения микроструктуры катанки, оказывают такие факторы химического состава стали как «содержание хрома» и «максимальное содержание углерода». Для относительного удлинения, разрывного усилия проволоки, предела прочности катанки наиболее информативным является характеристика P_4 , характеризующая долю цементитных пластин микроструктуры, для степени расслоя – характеристика P_6 , характеризующая долю межпластиночных расстояний микроструктуры в диапазоне (0 м; $0,08 \cdot 10^{-6}$ м).

Решена задача классификации изображений микроструктур двух групп проволок с различной степенью расслоения на основе сравнительного анализа функций распределения межпластиночных расстояний [4, 5, 8].

4. Разработан алгоритм автоматизированной обработки изображений микроструктур серого чугуна, полученных с использованием оптического микроскопа, отличающийся от известных способом расчета статистических функций распределения характеристик графитной фазы, распределенной хаотически в матрице. Алгоритм включает следующие этапы: бинаризация изображения с использованием адаптивного порога, распознавание включений графита, определение площадей, периметров и расстояний между графитными включениями, определение статистических функций распределения характеристик графитных включений.

Разработано программное обеспечение «АОМ-2 сч» (свидетельство о регистрации № 225 от 24.09.2010) для математической обработки изображений, позволяющее автоматизировать процесс расчета характеристик графитной фазы серых чугунов, что имеет важное практическое значение для исследования взаимосвязей типа «микроструктура чугуна – свойства изделия» [9, 17].

5. С помощью программного обеспечения «АОМ-2 сч» по рассчитанным функциям статистического распределения характеристик графитной фазы выявлены различия в микроструктурах чугунов с различной обрабатываемостью деталей, что позволило предложить различные варианты изменения технологии, с целью

повышения обрабатываемости детали «коленвал», изготавливаемой на ЗАО «Атлант». Программное обеспечение использовано при выполнении хозяйственного договора между БНТУ и Барановичским станкостроительным заводом ЗАО «Атлант» на тему «Расчет показателей качества и эксплуатационных характеристик детали «коленвал» различных производителей на основе изображения типизированных участков микроструктуры», шифр ХД № 1052/10с [10, 19].

6. Разработан алгоритм для определения характеристик изображений макроструктур темплетов стальных слитков металлургического производства, отличающийся от известных способом количественной оценки дефектов слитка (зональная ликвация углерода в слитке, угловые и поперечные трещины). Алгоритм апробирован для разработки технологических режимов разливки сталей в условиях РУП «БМЗ» [12, 15].

7. Предложен алгоритм для автоматизированного определения характеристик зеренной структуры углеродистых сталей 20ХНЗА, подвергнутых химико-термической обработке, основанный на обработке изображений микроструктур, полученных с использованием оптического микроскопа, определении границ зерен, определении площадей зерен и функции их распределения в микроструктурах [16].

Рекомендации по практическому применению

Разработанный метод и программное обеспечение «АОМ-1» для расчета характеристик изображений микроструктур перлитных сталей могут быть использованы в заводских лабораториях на металлургических предприятиях для решения задач по выявлению взаимосвязей между характеристиками изображений микроструктур и свойствами сталей.

Разработанное программное обеспечение «АОМ-2 сч» может быть использовано в центральных заводских лабораториях литейных предприятий для решения задач, связанных с решением технологических вопросов, связанных с технологией изготовления отливок из серого чугуна.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных журналах

1. Чичко, А.Н. О новых математических методах классификации изображений микроструктур сталей / А.Н. Чичко, О.А. Сачек, С.Г. Лихоузов // Литье и металлургия. – 2008. – № 2. – С. 103–108.
2. Чичко А.Н. Алгоритмы обработки изображений микроструктур сталей для определения межпластиночных расстояний феррита и цементита / А.Н. Чичко, О.А. Сачек, А.В. Веденеев // Литье и металлургия. – 2009. – № 1. – С. 86–93.
3. Лихоузов, С.Г. О методах компьютерной обработки микроструктур сталей с различной дисперсностью перлита / С.Г. Лихоузов, О.А. Сачек, А.Н. Чичко // Информатика и системы управления. – 2010. – № 1. – С. 19–29.
4. Чичко, А.Н. О методах математического описания изображений микроструктур перлитных сталей / А.Н. Чичко, О.А. Сачек // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. – 2010. – № 3. – С. 15–22.
5. Алгоритм и программное обеспечение для обработки изображений микроструктур перлитных сталей / А.Н. Чичко, О.А. Сачек, С.Г. Лихоузов, В.Ф. Соболев, А.В. Веденеев // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. – 2010. – № 3. – С.14–21.
6. Чичко, А.Н. Программное обеспечение и алгоритмы для анализа изображений микроструктур перлитных сталей / А.Н. Чичко, О.А. Сачек, С.Г. Лихоузов // Программные продукты и системы. – 2010. – № 4. – С. 123–127.
7. Чичко, А.Н. Методы автоматизации обработки изображений микроструктур перлитных сталей / А.Н. Чичко, О.А. Сачек, С.Г. Лихоузов // Информационные технологии. – 2010. – № 7. – С. 71–77.
8. Чичко, А.Н. О некоторых алгоритмах и методах обработки изображения микроструктур перлитных сталей / А.Н. Чичко, О.А. Сачек, С.Г. Лихоузов // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2011. – № 2. – С. 9–15.
9. Компьютерная обработка изображений микроструктур чугуна для решения задачи классификации отливок по обрабатываемости / А.Н. Чичко, С.Г. Лихоузов, В.Ф. Соболев, О.А. Сачек,

О.И. Чичко // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2011. – № 3. – С. 103–109.

10. Программное обеспечение для обработки изображений микроструктур железоуглеродистых сплавов / А.Н. Чичко, С.Г. Лихоузов, О.А. Сачек, В.Ф. Соболев, О.И. Чичко // Вестник Белорусского национального технического университета. Приборостроение. Информатика. – 2011. – № 3. – С. 13–18.

Материалы и тезисы докладов на научно-технических конференциях

11. Методы автоматизации для анализа микроструктур сталей перлитного класса / А.Н. Чичко, О.А. Сачек, В.Ф. Соболев, А.В. Веденеев // Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 28–29 окт. 2009 г. / БГТУ; редкол.: И.М. Жарский [и др.]. – Минск, 2009. – С.25–28.

12. Сачек, О.А. Методы обработки изображений для количественного анализа макроструктуры сталей / О.А. Сачек, А.Н. Чичко // Информационные технологии, электронные приборы и системы: материалы Междунар. науч.-практ. конф. ITEDS 2010, Минск, 6–7 апреля 2010 г. / БГУ; редкол.: В.В. Апанасович [и др.]. – Минск: БГУ. – Ч. 3. – 2010. – С. 107–111.

13. Сачек, О.А. Системный анализ микроструктур сталей на основе метода обработки изображений / О.А. Сачек, А.Н. Чичко // Системный анализ и информационные технологии: материалы 12-й Междунар. науч.-техн. конф. SAIT 2010, Киев, 25–29 мая 2010 г. / УНК «ИПСА» НТУ «КПИ»; редкол.: Н.Д. Панкратова [и др.]. – Киев: УНК «ИПСА» НТУ «КПИ», 2010. – С. 486.

14. Программное обеспечение для расчета микроструктур сталей / А.Н. Чичко, О.А. Сачек, С.Г. Лихоузов, О.И. Чичко, В.Ф. Соболев // Информационные технологии в промышленности: тезисы докладов шестой Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 28–29 окт., 2010 г. / ОИПИ НАН Беларуси; науч. ред. Е.В. Владимиров. – Минск, 2010. – С. 22–23.

15. Сачек, О.А. Компьютерная методика обработки изображений макроструктуры стальных заготовок / О.А. Сачек, А.Н. Чичко // Современные информационные компьютерные технологии mcIT-2010: материалы II Междунар. науч.-практ. конф. [Электронный ресурс] /

УО «Гр. ун-т им. Я. Купалы». – Гродно, 2010. – 1 электр. компакт диск (CD-R). – 995 с. – Рус. – Деп. в ГУ «БелИСА» 24.05.2010 г., №. Д201019.

16. Сачек, О.А. О новых методах классификации микроструктур сталей / О.А. Сачек, А.Н. Чичко // Молодежь в науке – 2009: материалы Междунар. конф. молодых ученых, Минск, 21–24 апреля 2009 г. / Приложение к журналу Весті Нац. акадэміі навук Беларусі: у 5 ч., серыя фіз.-мат. навук, серыя фіз.-тэхн. навук. – Минск: Беларус. навука, 2010. Ч. 5. – С.194–199.

17. Компьютерная обработка микроструктур серых чугунов / О.А. Сачек, С.Г. Лихоузов, А.Н. Чичко, В.Ф. Соболев // Актуальные проблемы науки и техники: сб. трудов второй Междунар. научной конф. молодых ученых: в 2 т., Уфа, 9 дек. 2010 г. / УГНТУ. – Уфа, Нефтегазовое дело, 2010. – Т. 1. – С.200–202.

Патенты и свидетельства регистрации

18. Авторское свидетельство о регистрации компьютерной программы АОМ-1: 085 / А.Н. Чичко, О.А. Сачек, С.Г. Лихоузов, А.В. Веденеев, Е.П. Барадынцева, В.Ф. Соболев. – № С20090028; заявл. 11.06.2009; зарег. 16.06.2009.

19. Авторское свидетельство о регистрации компьютерной программы АОМ-2 СЧ: 225 / А.Н. Чичко, В.Ф. Соболев, С.Г. Лихоузов, О.А. Сачек. – № С20100098; заявл. 31.08.2010; зарег. 24.09.2010.

РЭЗІЮМЭ Сачок Вольга Аляксандраўна

МЕТАДЫ І АЛГАРЫТМЫ ДЛІ КАМП'ЮТАРНАГА АНАЛІЗУ ВІДАРЫСАЎ СТРУКТУР ПРАМЫСЛОВЫХ ЖАЛЕЗАВУГЛЯРОДІСТЫХ СПЛАВАЎ

Ключавыя словы: апрацоўка відарысаў, мікраструктура, статыстычная функцыя размеркавання, перлітная сталь, чыгун.

Мэтай дысертацыйнай працы з'яўляецца распрацоўка метаду і алгарытмаў для камп'ютарнага аналізу відарысаў структур жалезавугляродістых сплаваў з мэтай удасканалення тэхналагічных працэсаў металургічнай вытворчасці.

Аб'ектам даследавання з'яўляюцца відарысы структур прамысловых жалезавугляродістых сплаваў (вугляродзістая сталь, чыгун), выкарыстоўваных у металургічнай вытворчасці.

Распрацаваны метады, алгарытм і праграмае забеспячэнне для аўтаматызаванага вызначэння межпластыначных адлегласцей па відарысах мікраструктур перлітных сталей, што дазваляе скараціць час аналізу мікраструктур прамысловых узораў.

Распрацаваны алгарытм для параметрызацыі відарысаў мікраструктур перлітных сталей, які адрозніваецца ад вядомых метадам аўтаматызаванага вызначэння межпластыначных адлегласцей і спосабам разліку характарыстак відарысаў мікраструктур на аснове статыстычнай функцыі размеркавання межпластыначных адлегласцей.

Распрацаваны алгарытм апрацоўкі відарысаў мікраструктур шэрых чыгуноў, якая ўключае вызначэнне статыстычных функцый размеркавання характарыстак графіту ў мікраструктуры і мае этапы: бінарызацыя відарыса з выкарыстаннем адаптыўнага парога, распазнаванне ўключэнняў графіту, вызначэнне значэнняў плошчы, перыметраў і адлегласцей паміж графітнымі ўключэннямі, вызначэнне функцый статыстычных размеркаванняў характарыстак графітных ўключэнняў.

Распрацаваны алгарытм для аўтаматызаванага вызначэння характарыстак відарысаў макраструктуры зліткаў металургічнай вытворчасці, які ўключае колькасную ацэнку дэфектаў злітка (занальная ліквіцыя вугляроду ў злітку, кутнія і папярочныя трэшчыны), што дазваляе ўдасканаліць метады распрацоўкі тэхналагічных рэжымаў бесперапыннага разлівання сталяў.

Вынікі працы ўкаранены на РУП «БМЗ».

РЕЗЮМЕ

Сачек Ольга Александровна

МЕТОД И АЛГОРИТМЫ ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНОГО АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ СТРУКТУР ПРОМЫШЛЕННЫХ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ

Ключевые слова: обработка изображений, микроструктура, статистическая функция распределения, перлитная сталь, чугун.

Целью диссертационной работы является разработка метода и алгоритмов для компьютерного анализа изображений структур железоуглеродистых сплавов с целью совершенствования технологических процессов металлургического производства.

Объектом исследования являются изображения структур промышленных железоуглеродистых сплавов (углеродистая сталь, чугун), используемых в металлургическом производстве.

Разработаны метод, алгоритм и программное обеспечение для автоматизированного определения межпластиночных расстояний по изображениям микроструктур перлитных сталей, что позволяет сократить время анализа микроструктур промышленных образцов.

Разработан алгоритм для параметризации изображений микроструктур перлитных сталей, отличающийся от известных методом автоматизированного определения межпластиночных расстояний и способом расчета характеристик изображений микроструктур на основе статистической функции распределения межпластиночных расстояний.

Разработан алгоритм обработки изображений микроструктур серых чугунов, заключающейся в определении статистических функций распределения характеристик графита в микроструктуре, включающий этапы: бинаризация изображения с использованием адаптивного порога, распознавание включений графита, определение значений площадей, периметров и расстояний между графитными включениями, определение функций статистических распределений характеристик графитных включений.

Разработан алгоритм для автоматизированного определения характеристик изображений макроструктуры слитков металлургического производства, включающий количественную оценку дефектов слитка (зональная ликвация углерода в слитке, угловые и поперечные трещины), что позволяет усовершенствовать методы разработки технологических режимов непрерывной разливки сталей.

Результаты работы внедрены на РУП «БМЗ».

SUMMARY

Sachek Olga

METHOD AND ALGORITHMS FOR COMPUTER ANALYSIS OF STRUCTURES IMAGES OF INDUSTRIAL IRON-CARBON ALLOYS

Keywords: image processing, microstructure, the statistical distribution function, pearlitic steel, iron.

The purpose of dissertation work is to develop methods and algorithms for computer image analysis structures of iron-carbon alloys to improve the technological processes of metallurgical production.

The object of research are images of structures of industrial iron alloys (carbonaceous steel, iron), used in steel production.

Developed a method, algorithm and the software for the automated determination of distances between pearlite colonies in images of microstructures of pearlitic steel. This reduces the analysis of microstructures of industrial designs.

Developed an algorithm for the parametrization of microstructures images of pearlitic steels, which differs from the known method of automated determination of distances between pearlite colonies and the method of calculating the characteristics of images of microstructures based on the statistical distribution function of distances between pearlite colonies.

Developed an algorithm for image processing of microstructures of gray irons consisting in determining the statistical distribution functions of the characteristics of the graphite in the microstructure. The algorithm includes stages of: binarization of image with the adaptive threshold, the recognition of the graphite inclusions, the definition of the values of the areas, perimeters and distances between the graphite inclusions, the definition of the functions of statistical distributions of characteristics of graphite inclusions.

Algorithms for automated determining of the images characteristics of ingots macrostructure of metallurgical production, including the a quantitative estimate defects ingot (zonal segregation of carbon in the ingot, the angular and transverse cracks). This allows to improve the methods for developing technological regimes continuous cast of steels.

The results of the work are introduced at RUE «BMZ».

Научное издание

САЧЕК Ольга Александровна

**МЕТОД И АЛГОРИТМЫ ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНОГО АНАЛИЗА
ИЗОБРАЖЕНИЙ СТРУКТУР ПРОМЫШЛЕННЫХ
ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности
05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации

Подписано в печать 28.09.2011.

Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 1,34. Уч.-изд. л. 1,04. Тираж 60. Заказ 947.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009.

Проспект Независимости, 65, 220013, Минск.