

УДК: 51-74:669.017.3

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИКРОТВЕРДОСТИ
СТРУКТУРНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ
ВЫСОКОХРОМИСТЫХ ЧУГУНОВ В РЕЗУЛЬТАТЕ
МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИХ
ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Скобло Т.С., д.т.н., Клочко О.Ю., к.т.н., Белкин Е.Л.

*Харьковский национальный технический университет сельского
хозяйства имени Петра Василенко*

Полученная математическая модель позволяет с высокой точностью определять микротвердости фаз высокохромистых чугунов при помощи математической обработки изображений структур с использованием разработанной методики.

Введение. Микроструктура высокохромистого чугуна (16-18%Cr), используемого в рабочем слое биметаллических прокатных валков отличается существенной структурной, фазовой и химической неоднородностью. Она представлена аустенито-карбидной эвтектикой со специальными карбидами хрома Me_7C_3 и многофазной системой продуктов распада аустенита. Такая неоднородность структуры по содержанию компонентов и дисперсность выделяющихся карбидов в процессе кристаллизации сплава приводят к существенной неоднородности микротвердости фаз. В ряде случаев из-за дисперсности формируемых фаз оценить их микротвердость не представляется возможным, однако для установления отличающихся по составу фаз, которые отражают достигаемый уровень микротвердости, можно использовать новый подход в их качественном и количественном определении. Этот подход включает применение разработанной методики математической оценки металлографических изображений гетерогенного сплава, в частности высокохромистого чугуна, с использованием элементов численного гидродинамического анализа основанного на уравнениях Навье – Стокса [2].

Цель работы. Проведение исследований, направленных на поиск зависимостей микротвердости фаз высокохромистых чугунов от параметров, полученных в результате математической обработки изображений структур с использованием разработанной методики математической оценки металлографических изображений.

Методика обработки фотографий. Исследования проводили статистически на массиве данных, содержащем 52 фотографиях структур высо-

кохромистого чугуна в литом состоянии, 9 из которых получены после измерения микротвердости (с отпечатками индентора), по методике изложенной в [2]. При этом цвета от 0 до 92 – соответствуют карбидным фазам, 155- аустениту, от 164 до 255 – ферритным. В работе рассмотрены 24 точки вокруг средней для удобства вычисления конечно-разностных производных включительно до 4-го порядка, где c_{ij} - цвет точки в формате *bmp* 256 цветов.

Микротвердость структурных составляющих измеряли по стандартной методике твердомером по Микро-Виккерсу UIT HVmicro-1. При измерениях микротвердости (H_{μ}) дисперсной структуры с различным содержанием фаз результаты усредняли. Это дало возможность оценить вклад изменения в них концентрации компонентов. Микроструктуру образцов до и после термической обработки изучали с помощью металлографического микроскопа «Neophot-21».

Результаты исследований. В работе введены показатели, характеризующие локальные дифференциальные соотношения между условными цветами (на основе конечных разностей), описывающих диффузию химических элементов и плотность фрагмента изображения – абсолютные значения лапласианов и дивергенций [2], а также качественно новый параметр, являющийся отношением абсолютной величины лапласианов разных порядков (вторых и четвертых производных) к цвету. Их использовали для построения гистограмм, преобразованных по этим формулам изображений, а также построения фильтров и определения нормативных характеристик при сравнении образцов.

$$r_1 = \frac{|c_2 + c_4 + c_6 + c_8 - 4c_1|}{|c_2 - c_1| + |c_4 - c_1| + |c_6 - c_1| + |c_8 - c_1|}, \quad (1)$$

где $0 \leq r_1 \leq 1$.

$$r_2 = c_1, \quad (2)$$

r_2 - цвет средней точки

$$r_3 = \frac{|c_3 + c_5 + c_7 + c_9 - 4c_1|}{|c_3 - c_1| + |c_5 - c_1| + |c_7 - c_1| + |c_9 - c_1|}, \quad (3)$$

где $0 \leq r_3 \leq 1$.

Показатели, оцениваемые уравнениями (1) и (3) – являются характеристиками нейтральности абсолютного значения лапласиана, поскольку алгебраическая сумма лапласианов, в среднем, на достаточно большом числе точек всегда будет равна нулю. (5) и (6) - показатели однородности,

описывающие корреляцию между дивергенцией и условным цветом. При одинаковых значениях цветов, входящих в формулы точек, они равны 1. В противном случае - меньше единицы.

$$\sigma = \sqrt{\frac{(c_1 - \bar{c})^2 + (c_2 - \bar{c})^2 + (c_4 - \bar{c})^2 + (c_6 - \bar{c})^2 + (c_8 - \bar{c})^2}{4}} \quad (4),$$

где $\bar{c} = \frac{c_1 + c_2 + c_4 + c_6 + c_8}{5}$;

$r_4 = \sigma$ - среднеквадратическое отклонение

$$r_5 = \frac{(c_3c_4 + c_2c_1 + c_9c_8 + c_4c_5 + c_1c_6 + c_8c_7)^2}{(c_3^2 + c_2^2 + c_9^2 + c_4^2 + c_1^2 + c_8^2)(c_4^2 + c_1^2 + c_8^2 + c_5^2 + c_6^2 + c_7^2)} \quad (5)$$

$$r_6 = \frac{(c_3c_2 + c_4c_1 + c_5c_6 + c_2c_9 + c_1c_8 + c_6c_7)^2}{(c_3^2 + c_4^2 + c_5^2 + c_2^2 + c_1^2 + c_6^2)(c_2^2 + c_1^2 + c_6^2 + c_9^2 + c_8^2 + c_7^2)} \quad (6)$$

Оценили (7) – обобщенный (усредненный) градиент по абсолютной величине, являющийся средней эффективной скоростью изменения цвета (однородности) и (8) – абсолютную величину конечно-разностного лапласиана, описывающего диффузию химических элементов [2].

$$r_7 = \frac{|c_2 - c_1| + |c_4 - c_1| + |c_6 - c_1| + |c_8 - c_1|}{4} \quad (7)$$

$$r_8 = |c_2 + c_4 + c_6 + c_8 - 4c_1| \quad (8)$$

Введены следующие двумерные функции:

$$r_9 = |c_{10} - 3c_2 + 3c_1 - c_6 + c_{14} - 3c_4 + 3c_1 - c_8| \quad (9)$$

$$r_{10} = |c_{10} - 4c_2 + 6c_1 - 4c_6 + c_{18} + c_{14} - 4c_4 + 6c_1 - 4c_8 + c_{22}| \quad (10)$$

$$r_{11} = \frac{r_9}{|c_{10} - c_2| + 2|c_2 - c_1| + |c_1 - c_6| + |c_{14} - c_4| + 2|c_4 - c_1| + |c_1 - c_8|} \quad (11)$$

$$r_{12} = \frac{r_{10}}{|c_{10} - c_2| + 3|c_2 - c_1| + 3|c_1 - c_6| + |c_6 - c_{18}| + |c_{14} - c_4| + 3|c_4 - c_1| + 3|c_1 - c_8| + |c_8 - c_{22}|} \quad (12)$$

$$r_{13} = |c_2 + c_4 - 2c_1| \quad (13)$$

$$r_{14} = \frac{r_{13}}{|c_2 - c_1| + |c_4 - c_1|} \quad (14)$$

Формулы (9), (10), (13) описывают абсолютные величины конечно-разностной дивергенции и характеризуют уплотнение и разрежение вещества в структуре металла; (11), (12), (14) - показатели нейтральности выражений (9),(10), (13).

В качестве первых 14 аргументов для корреляционных зависимостей приняты средние значения параметров, рассчитываемых написанных по формулам (1)-(14) на фрагментах 50×50 пикселей для фотографий, на которых есть отпечатки индентора при измерении микротвердости: $\overline{r_1} - \overline{r_{14}}$.

В следующих анализируемых 4-х параметрах вводили суммы процентов, согласно гистограммам значений оцененных формулами (8), (9), (10) и (13), начиная с цвета 255. Было замечено, что эта сумма характеризует долю феррита с повышенной концентрацией углерода (например, структуры бейнит, мартенсит). В качестве следующих пяти параметров вводили средние значения отношений r_7/c_1 , r_8/c_1 , r_9/c_1 , r_{10}/c_1 и r_{13}/c_1 . Итого рассмотрено 23 параметра на всех фрагментах фотографий.

Методика расчета эмпирических зависимостей микротвердости от введенных 23 параметров. Вначале выбирали фрагменты, на которых производилось измерение микротвердости. Была разработана специальная программа для решения уравнений регрессии и, соответствующих им, коэффициентов множественной корреляции. Анализировали число строк исходных данных - 52. Число столбцов в каждом из этих массивов составляло 24 (23 аргумента и значение измеренной микротвердости). В каждом из 23 аргументов выбрали наименьшие значения, которыми описывали зависимость микротвердости от выбранных аргументов. Показателем удовлетворительным для выбора аргументов являлся коэффициент корреляции. Например, выбирали любые 5 параметров (без повторений) из 23 имеющихся: x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 . Методом наименьших квадратов находили 6 коэффициентов $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ уравнения регрессии для расчета зависимости

$$H_{\mu} = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_5 \quad (15)$$

Полученному уравнению соответствовал коэффициент множественной корреляции ($R_{\text{мн}}$). Перебирая всевозможные сочетания из 23 аргументов по 5, выбирали сочетание, дающее максимальный коэффициент $R_{\text{мн}}$. Кроме наилучших сочетаний по пять, рассматривали аналогичные по 4-м, 3-м и 2-м факторам. Расчеты показали, что переход от поиска четырех факторов к пяти практически не увеличивает коэффициент множественной корреляции. Проведен анализ однофакторных зависимостей. Установлено, что почти все зависимости имеют положительный знак при соответствующем факторе. Исключение составляют зависимость 2 от цвета и две зави-

симости (5 и 6) от однородности. Положительный знак означает рост микротвердости от увеличения значения фактора. От увеличения однородности в силу значительных коэффициентов корреляции (0,574 и 0,576) возможно уменьшение твердости. Коэффициент корреляции 0,09 показывает, что зависимости микротвердости от цвета для литых структур не существует. Обращает также на себя внимание, что коэффициент корреляции для зависимостей микротвердости от различных видов нейтральности заметно меньше (от 0,373 до 0,414), чем у факторов, связанных с разбросом и рассеянием (градиенты и т.п.) энергии. Для повышения точности результатов исследования проведен 4-х и 5-ти факторный анализ, построены модели зависимости микротвердости высокохромистого чугуна от рассматриваемых факторов.

При 4-х факторном анализе рассмотрены факторы с номерами 7,15,17,18. То есть, показателей разброса однородности цвета, доли феррита с повышенной концентрацией углерода относительно абсолютной величины лапласиана; относительно абсолютной величины четвертого лапласиана и относительно абсолютной величины дивергенции. Получены следующие коэффициенты регрессии: $a_0 = 261.158$ (свободный член) и $a_1 = -62.797$ $a_2 = 120.910$ $a_3 = 23.144$ $a_4 = -102.635$ соответственно. Наибольший коэффициент корреляции ($R_{\text{мн}}$) равен 0,74. Значимости факторов (по порядку следования в их перечне): 26.6, 44.2, 5.6 и 8.8. Наиболее значимый фактор - доля феррита с повышенной концентрацией углерода относительно абсолютной величины лапласиана. Установлены 22 варианта для 4-х факторного анализа, где коэффициент корреляции близок к наибольшему. У 10-ти - одним из факторов является номер 1 – нейтральность лапласиана. Во все без исключения варианты вошли аргументы, так или иначе связанные со структурами феррита, у которых повышена концентрация углерода.

Проведенный пятифакторный анализ выявил, что наиболее значимый фактор соответствует нейтральности лапласиана с $R_{\text{мн}} = 0,75$.

Проверка полученных зависимостей. Чтобы убедиться в том, что полученные зависимости отражают микротвердость не только элементов массива исходных данных, на которых она рассчитывалась, но и по всей фотографии, были вычислены средние микротвердости по каждой из фотографий, на которых были отпечатки. Расчет средних значений производился для формул с наилучшими сочетаниями по 4 и 5 факторов для 9 фотографий с отпечатками индентора по специально разработанной программе. Результаты расчетов, а также усредненные экспериментальные значения микротвердости представлены в табл.1. Установлено, что результаты расчетов по 4-х и 5-ти факторным моделям довольно близки друг к другу и к экспериментальным значениям. В проведенных ранее

исследованиях было установлено, что средние значения абсолютных величин лапласианов и производных от них также примерно в том же соотношении повышаются [3].

Таблица 1. Значения средней микротвердости Н-50, рассчитанные с помощью математической модели в результате 4-х и 5-ти факторных корреляционных зависимостей

Значение средней микротвердости Н-50									
Экспериментальное значение	447	658	275	473	437	288	437	437	466
4-х факторная модель	381	508	353	436	432	363	426	434	486
5-и факторная модель	402	557	368	468	477	372	463	465	534

Выводы.

1. Установлено, что предлагаемые аргументы тесно связаны с физико-химическими процессами при формировании структур высокохромистых чугунов. Это доказывают высокие значения коэффициентов корреляций, как для одномерных, так и многомерных зависимостей. В литом состоянии имеют место прямые зависимости (кроме однородности) микротвердости от введенных аргументов.

2. Максимальные коэффициенты корреляции для структур в литом состоянии при 4-х и 5-ти факторном анализе не превышают 0,75. Видимо, большую роль оказывает фактор неоднородности распределения структур по глубине под отпечатком индентора.

3. Расчет средней твердости по фотографии является определенной новизной работы. Полученные средние значения микротвердости по фотографии микроструктур показали достоверно подтвержденную экспериментами картину определения микротвердости.

Список использованных источников

1. Производство и применение прокатных валков. Справочник: под ред. проф. Скобло Т.С. / Т.С. Скобло, А.И.Сидашенко, Н.М.Александрова [и др.] // Харьков: ЦД №1, 2013. – 572с.
2. Скобло Т.С. Применение компьютерного анализа металлографических изображений при исследовании структуры высокохромистого чугуна /Т.С.Скобло, О.Ю. Ключко, Е.Л. Белкин //Заводская лаборатория. Диагностика материалов.–2012.–№ 6 (78).–С.35-42
3. Скобло Т.С. Исследование структуры высокохромистого комплексно-легированного чугуна с применением методов математического ана-

Анотація

**ВИЗНАЧЕННЯ МІКРОТВЕРДОСТІ СТРУКТУРНИХ
СКЛАДОВИХ ВИСОКОХРОМИСТИХ ЧАВУНІВ В
РЕЗУЛЬТАТІ МАТЕМАТИЧНОЇ ОБРОБКИ ЇХНІХ
ЗОБРАЖЕНЬ**

Скобло Т.С., Клочко О.Ю., Белкін Й.Л.

Отримана математична модель дозволяє з високою точністю визначати мікротвердості фаз високохромистих чавунів за допомогою математичної обробки зображень структур з використанням розробленої методики.

Abstract

**STRUCTURAL DETERMINATION OF
MICROHARDNESS COMPONENTS OF HIGH-
CHROMIUM CAST IRON IN RESULTS OF
MATHEMATICAL PROCESSING OF THEIR IMAGES**

Skoblo T.S., Klochko O.Yu., Belkin E.L.

The mathematical model obtained allows one to accurately determine the microhardness phase of high-chromium cast iron in terms of mathematical image processing of structures with the use of the developed technique.