

УДК: 51-74:669.017.3

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАВИСИМОСТИ МИКРОТВЕРДОСТИ СТРУКТУРНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ТЕРМООБРАБОТАННЫХ ГЕТЕРЕГЕННЫХ СПЛАВОВ

Т.С. Скобло, д.т.н., профессор; О.Ю. Клочко, к.т.н.; Е.Л. Белкин
*Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства
имени Петра Василенко, г. Харьков, Украина*

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

Введение

Микроструктура высокохромистого чугуна (16-18%Cr), используемая для рабочего слоя биметаллических прокатных валков, в литом состоянии и после низкотемпературных циклических отжигов [1], отличается существенной структурной, фазовой и химической неоднородностью. Она представлена аустенито-карбидной эвтектикой со специальными карбидами хрома и многофазной системой дисперсных продуктов распада аустенита, отличающиеся дисперсностью и химическим составом. Также при распаде аустенита выделяется неоднородно-легированный феррит, имеющий существенные отличия по концентрации компонентов. Такая неоднородность структуры по содержанию компонентов и дисперсность выделяющихся карбидов в процессе кристаллизации сплава и последующей термической обработки, приводят и 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]. Исследуемые высокохромистые чугуны были подвержены термической обработке, способствующей максимальному распаду остаточного аустенита [3], заключающейся в циклическом нагреве и изотермической выдержке при определенных температурах, для получения магнитострикционного эффекта в легированном цементе и специальных карбидах, содержащих 40-43% железа (Me_{23}C_6 и

Me₇C₃). В результате создаются дополнительные структурные деформации, стимулирующие фазовые превращения при более низких температурах обработки (200-500°C), что особенно важно для двухслойных валков с сердцевиной из серого или высокопрочного чугуна.

Цель работы

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

Методика обработки фотографий

Исследования проводили статистически на массиве данных, содержащем 32 фотографии структур высокохромистого чугуна после низкотемпературного циклического отжига. Проведены цифровые оценки этих фотографий в формат *pgm*, который включает 256 оттенков серого цвета (0 – самая темная точка, 255 – самая яркая), где все пиксели (точки) каждой фотографии обрабатываются по специально разработанной программе. При этом цвета от 0 до 154 – соответствуют карбидным фазам, 155-160 – аустениту, от 161 до 255 – ферритным. В работе рассмотрены 24 точки вокруг средней для удобства вычисления конечно-разностных производных включительно до 4-го порядка. Схема расположения точек вокруг средней включает номер строки *i* и номер столбца *j* Обозначение: *c_{ij}* – цвет точки. В общем случае все цвета могут быть разными. Для сокращения дальнейших записей присвоили указанным текущим точкам номера *c₁₂*, *c₁₃* и т.д.

Микротвердость структурных составляющих измеряли по стандартной методике твердомером Микро-Викерсом *UIT HVmicro-1* при нагрузке 0,49Н. 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 «*Neophot-21*» и электронного *JEOL JSM-6390LV* микроскопов.

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, пре-

образованных по этим формулам изображений, а также определения нормативных характеристик при сравнении образцов.

$$r_1 = \frac{|c_2 + c_4 + c_6 + c_8 - 4c_1|}{|c_2 - c_1| + |c_4 - c_1| + |c_6 - c_1| + |c_8 - c_1|}, \quad \text{где } 0 \leq r_1 \leq 1; \quad (1)$$

$$r_2 = C_1, \quad \text{где } r_2 - \text{цвет средней точки}; \quad (2)$$

$$r_3 = \frac{|c_3 + c_5 + c_7 + c_9 - 4c_1|}{|c_3 - c_1| + |c_5 - c_1| + |c_7 - c_1| + |c_9 - c_1|}, \quad \text{где } 0 \leq r_3 \leq 1. \quad (3)$$

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.

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

где $\bar{c} = \frac{c_1 + c_2 + c_4 + c_6 + c_8}{5}$; $r_4 = \sigma$ - среднеквадратическое отклонение

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

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

(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. 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:

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

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

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

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

$$r_{13} = |c_2 + c_4 - 2c_1| \quad (13); \quad r_{14} = \frac{r_{13}}{|c_2 - c_1| + |c_4 - c_1|} \quad (14)$$

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 по формулам (1)-(15) 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

На выбранных фрагментах измеряли микротвердость. С помощью специально разработанной программы решали уравнения регрессии и находили соответствующие коэффициенты множественной корреляции ($R_{\text{мн}}$). Анализировали число строк исходных данных для структур после термообработки – 32. 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, удовлетворяющим выбор аргументов, являлся коэффициент корреляции. Например, выбирали любые 5 параметров (без повторений) из 23 имеющихся: x_1-x_5 . Методом наименьших квадратов находили 6 коэффициентов a_0-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 $R_{\text{мн}}$. Перебирая всевозможные сочетания из 23 аргументов по 5, выбирали сочетание, дающее максимальный $R_{\text{мн}}$. Однофакторный анализ показал низкую корреляцию между микротвердостью и рассматриваемыми параметрами. Для повышения точности результатов исследования проведен 4-х и 5-ти факторный анализ, построены модели зависимости микротвердости высокохромистого чугуна от рас-

смаатриваемых факторов. При 4-х факторном анализе рассмотрены варианты с номерами 8,14,17,23 - абсолютная величина лапласиана, нейтральность дивергенции, доля феррита с повышенной концентрацией углерода относительно абсолютной величины 4-го лапласиана, отношение абсолютной величины дивергенции к цвету соответственно. Наибольший $R_{\text{мн}} = 0,592$. Значимость факторов (по порядку следования в их перечне): 56.5, 3.6, 9.0 и 16.1. Как видно наиболее значимый из них фактор - абсолютная величина лапласиана. При пятифакторном анализе рассматривали факторы с номерами 8,9,15,16,17, соответствующие абсолютным величинам лапласиана и третьего лапласиана, а также доле структур феррита с повышенной концентрацией углерода относительно абсолютных величин лапласиана, третьего и четвертого лапласианов соответственно. Наибольший $R_{\text{мн}} = 0,651$. Значимости факторов (по порядку следования в их перечне): 261.7, 131.1, 39.1, 71.5 и 53.9. Наиболее значимый фактор – абсолютная величина лапласиана.

При анализе рассмотрели альтернативные варианты (для которых $R_{\text{мн}}$ близок к наибольшему) 4-х факторного взаимодействия. В 28 из 31 вариантов вошли аргументы, так или иначе связанные с игольчатыми структурами (бейнит, мартенсит). Например, номер 17. Во все без исключения варианты вошли аргументы так или иначе связанные с рассеянием или градиентами. Например, аргумент с номером 8 – абсолютная величина лапласиана. Аргументы, связанные с нейтральностью (1,3,11,12,14) вошли в 23 варианта из 31, что больше, чем для литых структур. Следует заметить, что первые два варианта в качестве аргумента содержат цвет, чего не было для литых структур. Так как в эти варианты входят и абсолютные значения лапласианов, то на самом деле косвенно учитывается отношение лапласианов к цвету. Поэтому из 31 варианта у 28 одним из факторов является номер, связанный с отношением рассеяния к цвету (номера от 19 до 23, см. описание). Сопоставляя результаты с ранее проведенными исследованиями структур в литом состоянии, можно заключить, что имеется несколько механизмов образования фаз, как в литом состоянии, так и после термообработки. Однако после термообработки таких механизмов больше, что в значительной степени связано с распадом остаточного аустенита и процессов обработки в температурном интервале магнитного превращения цементита и спецкарбидов хрома (явлением магнитоотрицкиии). Также можно сделать заключение о существовании связи между структурами феррита с повышенной концентрацией углерода и введенными параметрами. Однако этот вопрос требует дополнительного изучения.

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 значения микротвердости по каждой из анализируемых фотографий. Расчет

средних значений производили для формул с наилучшими сочетаниями по 4 и 5 факторов следующим образом. Для каждого фрагмента рассчитывали 23 средних значения. В каждую расчетную формулу входило 4 или 5 номеров факторов (формулы и факторы см. выше). Поэтому для каждого фрагмента с помощью программы выбирали средние значения и производили расчет микротвердости. Затем показания микротвердости накапливали по всем фрагментам, а впоследствии делили на число фрагментов. Результаты расчетов, а также усредненные экспериментальные значения микротвердости представлены в табл.1.

Таблица 1 -Значения средней микротвердости H_n , рассчитанные с помощью математической модели и полученные экспериментально

Значение средней микротвердости, Н/мм ² при нагрузке 0,49Н									
Экспериментальное значение	5630	6480	7060	5740	7350	6440	6040	6190	7040
4-х факт. модель	6600	6630	7140	6440	7550	6640	6600	6630	7140
5-и факт. модель	6440	6660	7310	6500	7820	6890	6440	6660	7310

Установлено, что результаты расчетов по 4-х и 5-ти факторным моделям довольно близки друг к другу и к экспериментальным значениям. Также установлено, что после проведенной термообработки средняя микротвердость повышается ~ в 1,5 раза. В проведенных ранее исследованиях было установлено, что средние значения абсолютных величин лапласианов и производных от них также примерно в том же соотношении повышаются [2]. В результате термообработки уменьшается разброс средних значений микротвердости. При анализе по фотографиям происходит уменьшение значений коэффициентов множественной корреляции по сравнению с литым состоянием.

Заключение

1. После термообработки невозможно описать микротвердость с помощью только одного аргумента, что, связано с увеличением продуктов распада остаточного аустенита и магнитострикционным эффектом, что увеличивает число фаз с изменяющимся их составом. **2.** Максимальные коэффициенты корреляции для термообработанных структур при 4-х факторном анализе $\leq 0,6$ и при 5-ти факторном изменяются незначительно - $\leq 0,65$. Отмечается уменьшение коэффициента корреляции после термообработки по сравнению со структурами в литом состоянии. Это можно объяснить заметным повышением неупорядоченности структуры после термической обработки. Большую роль может играть фактор неоднородности распределения структур по глубине под отпечатком индентора из-за дополнительного распада остаточного аустенита с выделением более мелких фаз. **3.** Расчет средней микротвердости по фотографии является определенной новизной работы. Можно считать, что получен

ные средние значения микротвердости по фотографии микроструктур показали достоверно подтвержденную экспериментами картину увеличения микротвердости после термообработки ~ в 1,5 раза.

Литература

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. Клочко, Е.Л. Белкин //Заводская лаборатория. Диагностика материалов.– 2012.-№ 6 (78).-С.35-42
3. Патент України UA №65602, МПК (2011.01) C21D5/00. Спосіб термічної обробки валків з високолегованого чавуну /Т.С.Скобло, О.Ю. Клочко [та інш.] // Власник: ХНТУСГ. - №u2011006215; опубл. 12.12.2011, Бюл.№23.

Abstract

The 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.

УДК 631.435: 621.98

ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНОСТИ ПОЧВЫ НА ИЗНАШИВАЕМОСТЬ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ ОРУДИЙ

¹ В.В. Смильский, к.т.н., доцент, ² А.В. Сидорчук, д.т.н., профессор
¹Тернопольский национальный педагогический университет им. В. Гнатюка, г. Тернополь, ²ННЦ «Институт механизации и электрификации сельского хозяйства», пгт. Глеваха, Киевская обл., Украина

Описывается методика, и приводятся результаты оценки влияния гранулометрического состава почв на интенсивность износа рабочих органов почвообрабатывающих орудий.

Введение

Механическая обработка почв сопровождается интенсивным изнашиванием рабочих органов земледельческих орудий. Сотни тонн металла, с трудом добытых из недр Земли снова возвращаются туда же, но уже в распыленном виде, и собрать их обратно нет никакой возможности. Многие исследователи стремились уменьшить результаты этого бедствия, но особых успехов пока не достигнуто. Лемех, как наиболее изнашиваемая де-