

Скобло Т.С.,
Гончаренко А.А.,
Марков А.В.,
Омельченко Л.В.,
Телятников В.В.,
Тупиченко С.В.

Харьковский национальный техниче-
ский университет сельского хозяй-
ства им. П. Василенко
E-mail:alex-goncharenko@i.ua

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДИФИКАТОРОВ

УДК 621.791.927

Предложена методика оценки изменчивости фазового состава на основе металлографических изображений, описанных оптико-математическим методом, в основе, которого лежит изменчивость цветов фаз.

Ключевые слова: модификаторы, метод оптико-математической обработки, металлографические изображения, пиксели, дивергенция.

Введение

Известно, что модифицирование больших масс жидкого металла различными присадками существенно повышает качество изделий и их эксплуатационную стойкость [1].

Реже такие присадки используют при восстановительных наплавках, компенсирующих износившийся слой деталей в эксплуатации. Это связано с тем, что из-за нанесения малого слоя, компенсирующего износ, широко используемые модификаторы из-за условий быстрой кристаллизации не успевают раствориться в жидкой фазе и, кроме того, концентрируясь в различных зонах покрытия способствуют снижению качества и потребительских свойств изделий.

В последние годы особое внимание уделяют использованию при наплавке нанопорошков, которые при определенных технологических процессах решают проблему неравномерного распределения модифицирующей присадки. Это технологии дозированного ввода присадок вместе с используемой для наплавки проволоки, а также процессы нанесения электролитических покрытий, при которых эффективно использование внешнего воздействия при кристаллизации: ультразвуковое или вибрационное [2,3].

В литературе практически отсутствует информация о влиянии нанопорошковых модификаторов на свойства восстановленных деталей.

Нет и надежных методов исследований, которые бы позволили оценить вклад таких присадок на свойства восстановленного слоя.

В связи с этим, **целью исследований** являлась разработка метода, позволяющего оценить влияние нанодобавок на изменчивость фазового состава восстановленных покрытий.

Получение такой информации позволит управлять технологическими процессами и определять эффективность типа используемого модификатора.

Основная часть

В основе разработанного подхода по оценке структурообразования лежит предложенный метод оптико-математической обработки фотографий микроструктур.

При анализе фотографий микроструктур различных зон при наплавке все пиксели

последовательно просматривали на мониторе компьютера. Каждый пиксель имеет числовую характеристику от 0 до 255; 0- самая темная точка, 255 – самая яркая. Вокруг каждого пикселя (или точки) имеется множество окружающих ее точек. В работе рассматривалось 24 точки вокруг средней. Это необходимо для того, чтобы можно было вычислять конечно разностные производные до 4-го порядка включительно. Схема расположения точек вокруг средней с номером строки i и номером столбца j показана на рисунке 1.

$$\begin{aligned}
 & c_{i-2j-2} \cdot c_{i-2j-1} \cdot c_{i-2j} \cdot c_{i-2j+1} \cdot c_{i-2j+2} \cdot \\
 & c_{i-1j-2} \cdot c_{i-1j-1} \cdot c_{i-1j} \cdot c_{i-1j+1} \cdot c_{i-1j+2} \cdot \\
 & c_{ij-2} \cdot c_{ij-1} \cdot c_{ij} \cdot c_{ij+1} \cdot c_{ij+2} \cdot \\
 & c_{i+1j-2} \cdot c_{i+1j-1} \cdot c_{i+1j} \cdot c_{i+1j+1} \cdot c_{i+1j+2} \cdot \\
 & c_{i+2j-2} \cdot c_{i+2j-1} \cdot c_{i+2j} \cdot c_{i+2j+1} \cdot c_{i+2j+2} \cdot
 \end{aligned}$$

Рис. 1. Схема расположения точек вокруг средней с номером строки i и номером столбца j

Для сокращения дальнейших записей присвоили указанным текущим точкам номера, как показано на, рис. 2. В этом случае точке с индексами ij присвоен номер 1, точке с индексами $ij - 1$ номер 2, и так далее.

$$\begin{aligned}
 & c_{12} \cdot c_{13} \cdot c_{14} \cdot c_{15} \cdot c_{16} \cdot \\
 & c_{11} \cdot c_3 \cdot c_4 \cdot c_5 \cdot c_{17} \cdot \\
 & c_{10} \cdot c_2 \cdot c_1 \cdot c_6 \cdot c_{18} \cdot \\
 & c_{25} \cdot c_9 \cdot c_8 \cdot c_7 \cdot c_{19} \cdot \\
 & c_{24} \cdot c_{23} \cdot c_{22} \cdot c_{21} \cdot c_{20} \cdot
 \end{aligned}$$

Рис. 2. Схема нумерации точек вокруг средней

Для расчета вводили следующие показатели, характеризующие локальные дифференциальные соотношения между цветами (на основе конечных разностей).

Приведенные ниже формулы используются, как для построения гистограмм, преобразованных по этим зависимостям изображений, так и для получения разных фильтров и определения нормативных характеристик при сравнении их с эталонами:

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

r_1 - это показатель нейтральности потому, что в среднем, величина числителя без абсолютного значения равна 0. Такой показатель всегда ≤ 1 .

$$r_2 = c_1 \text{ цвет средней точки} \quad (2)$$

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

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

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

$r_4 = \sigma$ - среднеквадратическое отклонение

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

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

$r_5(5)$ и $r_6(6)$ это показатели однородности, потому, что при одинаковых значениях цветов, входящих в формулы точек, они равны 1. При неодинаковых - они меньше 1. Это формула косинусов:

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

$r_7(7)$ – зависимость обобщенного (усредненного) градиента по абсолютной величине.

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

$r_8(8)$ – показатель абсолютной величины конечно - разностного лапласиана.

$$r_9 = |c_{10} + c_{14} - 3c_2 + 6c_1 - 3c_4 - c_6 - c_8|, \quad (9)$$

$$r_{10} = |c_{10} + c_{14} + c_{18} + c_{22} + 12c_1 - 4c_2 - 4c_6 - 4c_4 - 4c_8|, \quad (10)$$

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

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

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

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

Выражения (9), (10) и (13) являются показателями нейтральности. Формулы (11), (12) и (14) имеют тот же смысл, что и (1).

Формулы (8), (9), (10) и (13) являются конечно - разностным аналогом зависимостей:

$$r_8 \cong \left| \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right|, \text{ если } \partial x = \partial y = 1, \quad (15)$$

$$r_9 \cong \left| \frac{\partial^3 c}{\partial x^3} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^3} \right|, \text{ если } \partial x = \partial y = 1, \quad (16)$$

$$r_{10} \cong \left| \frac{\partial^4 c}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 c}{\partial y^4} \right|, \text{ если } \partial x = \partial y = 1, \quad (17)$$

$$r_{13} \cong \left| \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial c}{\partial y} \right|, \text{ если } \partial x = \partial y = 1. \quad (18)$$

Эти зависимости применяют в гидродинамике и во многих других прикладных расчетах. Первую, можно назвать абсолютной величиной лапласиана (в гидродинамике аналог абсолютная величина вихря), для второй и третьей зависимости принимаем их третьим и четвертым лапласианом. Для r_{13} в гидродинамике также имеется аналог, который в данном случае отражает значение абсолютной величины дивергенции.

Значения, (8), (9), (10), (13) будут совпадающими с (15), (16), (17), (18) если в них $\partial x = 1$ и $\partial y = 1$.

Известно, что для трехмерных задач гидродинамики, если они не связаны с взрывами и течением со скоростью большей чем у звука, в большинстве случаев имеет место условие несжимаемости:

$$\frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial c}{\partial y} + \frac{\partial c}{\partial z} = 0 \quad (19)$$

В точках, где не выполняется это условие, все равно имеют место другие, связанные с законом сохранения массы, но они не входят в область этого исследования (так как условия сохранения массы зависят от времени). При рассмотрении фотографий микроструктуры в точках, где не выполняется условие несжимаемости, имеют место зоны уплотнения и разряжения.

Анализируемые фотографии микроструктур металла двумерны. Тем не менее, во многих случаях имеет место:

$$\frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial c}{\partial y} = 0. \quad (20)$$

Такие условия возникают, когда область состоит из одного цвета, или очень близких цветов.

Введенная двумерная функция r_{13} связана с уплотнением и разрежением фаз в структуре металла, и, играет большую роль в их прогнозировании при формировании.

Целесообразно рассмотреть, конечно - разностный аналог формулы:

$$\left| \frac{\partial^2 c}{\partial x \partial y} \right|, \quad (21)$$

который, как отмечалось ранее при $\partial x = 1$ и $\partial y = 1$ имеет вид:

$$|c_1 + c_3 - c_2 - c_4| \quad (22)$$

Аналог кинетической энергии в гидродинамике также можно рассматривать и для анализа фотографий. Выражение кинетической энергии имеет вид:

$$\left(\frac{\partial c}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial c}{\partial y} \right)^2 \quad (23)$$

В конечно разностной форме предыдущее выражение при $\partial x = 1$ и $\partial y = 1$ имеет

вид:

$$(c_2 - c_1)^2 + (c_4 - c_1)^2 \quad (24)$$

Представленным не исчерпывается класс возможных функций. Рассматривали разные вариации зависимостей (4), (5), (6).

Например, значения среднеквадратического отклонения и однородности рассчитывали по формулам 25-27.

При этом часть схемы (рис. 2) имеет вид:

$$c_4 \cdot \\ c_2 \cdot c_1 \cdot$$

Среднеквадратичное отклонение оценивали как аналог функции (4).

$$\bar{c} = \frac{c_1 + c_2 + c_4}{3} \quad (25)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(c_1 - \bar{c})^2 + (c_2 - \bar{c})^2 + (c_4 - \bar{c})^2}{2}} \quad (26)$$

Аналог функции однородности для этих трех точек будет выглядеть так:

$$r_5 = \frac{(c_2 c_1 + c_4 c_1)^2}{(c_2^2 + c_1^2)(c_4^2 + c_1^2)} \quad (27)$$

Выводы

Предложена оценка аналитической связи между лапласианами, дивергенциями, а также вторыми лапласианами, однородностью и цветом пикселей.

Задача имеет прямой физический смысл и многочисленные расчеты показали, что такая связь существует. Физический смысл этой связи уже проявляется, когда она слабая между перечисленными факторами. Это может быть связано с ликвидацией компонентов (неоднородным распределением, формированием или вводом не растворяемых новых фаз).

Введенное понятие локальной однородности значительно повышает коэффициент множественной корреляции. Это подтверждает, что исследуемые зоны могут быть неоднородны. Известно, что значимые результаты неоднородности могут быть подтверждены микрорентгеноспектральным анализом. Однако, его возможности также ограничены, поскольку пятно луча захватывает не только анализируемую дисперсную фазу, но и отражает зону вокруг нее и подслоя. Поэтому предложенная методика оптико-математического описания структуры является более точной при локальной оценке фаз.

Литература

1. Скобло Т.С. Применение шлакообразующих смесей при производстве и реновации изделий.: Монография. /Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, А.Д. Мартыненко, Р.В. Ридный, Н.С. Пасько, А.К. Автухов. Под ред. д.т.н., проф. Т.С. Скобло – Х.: «Полосатая типография», 2016. – 284с.
2. Патент №48353 Україна, МПК (2009) В24В39/00. Спосіб відновлення та зміцнення деталей. / Т. С. Скобло, І. М. Рибалко, О. І. Сідашенко, О. В. Тіхонов та інш.; заявник та патентоутримувач Т. С. Скобло. - №200910791. заявл. 26.10.09.; опубл. 10.03.10.,

Бюл. № 5.

3. А.В. Плугатарев. Легирование хромированного покрытия нанопорошками /А.В. Плугатарев //Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П.Василенка. Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві. Вип.133 – Харків: ХНТУСГ, 2013р. – С. 158-163.

Summary

Skoblo T., Goncharenko A., Markov A., Omelchenko L., Telyatnikov V. Tupichenko S. Methods investigation of pattern formation restoration parts with modifiers

The method for evaluation of variability of the phase composition on the basis of metallographic images described opto-mathematical method, the basis of which is the variability of the phase colors.

Keywords: *modifiers, optical and mathematical processing technique, metallographic image pixels divergence.*

References

1. Skoblo T.S. The use of slag-forming mixtures in the production and renovation of products .: Monograph. /T.S. Skoblo, A.I. Sidashenko, A.D. Martynenko R.V. Ridnyi, N.S. Pasko, A.K. Avtukhov. Ed. prof. T.S. Skoblo - H .: "Striped typography", 2016. - 284s.
2. Patent of Ukraine №48353, IPC (2009) V24V39 / 00. Method restoration and strengthening of parts. / T.S. Skoblo, I.M. Rybalko, A.I. Sidashenko, A.V. Tikhonov and others .; applicant and T.S. Skoblo. - №200910791. appl. 10.26.09 .; publ. 10.03.10., Bull. Number 5.
3. A.V. Pluhatarov. Doping chrome coating nanopowders/ Journal of Kharkov National Technical University of Agriculture .. P.Vasilenka. Resource-saving technologies, materials and equipment in the repair work. Vyp.133 - Kharkiv: KNTUA, 2013. - S. 158-163.