

УДК 519.21

**ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗЕРЕННОЙ
СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛОВ**

В. Н. Волчук

*Приднепровская государственная академия
строительства и архитектуры*

Введение

Оценка параметров зеренной структуры является одной из важнейших характеристик, которая отвечает за качество металла. От размера зерна зависят статистические характеристики механических свойств (предел текучести, твердость, относительное удлинение), а также ударная вязкость и др. [1; 2].

В настоящее время наряду с традиционными методиками оценки геометрических параметров зеренных структур металлов, такими как оценка линейных размеров зерен, площади элементов структуры и их объема, возникают новые, которые основаны на использовании промежуточной асимптотики [3; 4], позволяющей оценить размерностные показатели. Такой подход выводит на более качественный уровень круг задач, связанных с оценкой зеренной структуры металла. Однако эти методы имеют общие недостатки, связанные, в первую очередь, с распознаванием зеренной структуры программным путем, так как процессы полировки, шлифовки, травления поверхности металла приводят к ее частичному искажению и ухудшению контрастности изображения. При фотографировании качество снимка понижается за счет высокой зернистости и дефектности фотоэмульсии, фоновой неоднородности, что во многих случаях не улавливается человеческим глазом [5; 6]. К перечню недостатков можно добавить искажение структуры при сканировании, когда зачастую появляются посторонние “шумовые” элементы – оттиски печати в виде темных пятен, групп пикселей, точек, что снижает точность количественной оценки элементов структуры металла. Поэтому одним из требований, предъявляемых к новым методам оценки структуры, является высокая достоверность полученных результатов, что становится невозможным без предварительной обработки изображения.

Для оценки зеренной структуры металла был применен метод вейвлетов (от англ. wavelet – “всплеск, небольшая волна”), который называют “математическим” микроскопом [7; 8]. Вейвлет-анализ разработан для решения сложных прикладных задач физики, математики, материаловедения и успешно используется для изучения поверхности аморфных металлов [9], сглаживания рентгенографических данных [10], обработки изображений в атомно-силовом микроскопе [11] и других областях техники [12].

В основе вейвлет-преобразований используются солитоноподобные функции, сконструированные на основе производных функции Гаусса [13].

Выбор базисной функции является важным моментом при проведении исследований – нужно выбрать такой вейвлет, который позволяет заметить необходимую информацию. Сделать это можно с помощью базисных

функций, выбор которых можно интерпретировать как задание разрешения для объектива “математического” микроскопа, – если выбранное разрешение позволяет увидеть нужные детали, то вейвлет подходит для решаемых задач. Более того, последующий выбор объектива с лучшим разрешением уже не дает ничего нового [9].

Базис вейвлет-преобразования строится путем непрерывных масштабных преобразований и переносов $\psi(x)$ вида

$$\psi_{a,b}(x) = \psi\left(\frac{x-b}{a}\right). \quad (1)$$

Коэффициент a называют масштабным коэффициентом, коэффициент b – параметром сдвига. Тогда вейвлет-преобразование определяется как интегральное преобразование вида

$$W(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} g(x) \cdot \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx. \quad (2)$$

Результатом вейвлет-преобразования является функция двух переменных (a, b) , несущая информацию о распределении неоднородностей различных масштабов (размеров дефектов, включений) в пространстве, в частности, о наличии разнообразных статистических закономерностей дефектной структуры поверхности [9]. Это является одним из главных достоинств метода вейвлетов.

Оценка зеренной структуры металлов проводилась с помощью вейвлет-преобразований Фурье. В работе проведен расчет и универсальная количественная интерпретация статистических показателей структуры сталей 09Г2ФБ, 20, 40, Ст6, У8: однородности, упорядоченности и регулярности а также установлена их взаимосвязь с механическими свойствами.

Материалы и методики

Химический состав сталей (в % по массе) и значения твердости приведены в таблице 1.

Таблица 1

Сталь	С	Mn	Ni	Si	Cr	S	P	Твердость, НВ
09Г2ФБ	0,09	1,4	-	0,22	-	0,005	0,019	110
20	0,20	0,55	0,20	0,27	0,22	0,03	0,030	160
40	0,40	0,60	0,24	0,25	0,20	0,03	0,030	185
Ст6	0,46	0,65	-	1,10	-	0,04	0,035	195
У8	0,80	0,17	-	0,17	0,20	0,028	0,030	345

Увеличение структуры осуществлялось с помощью оптического микроскопа “Неофот – 2” (Германия):

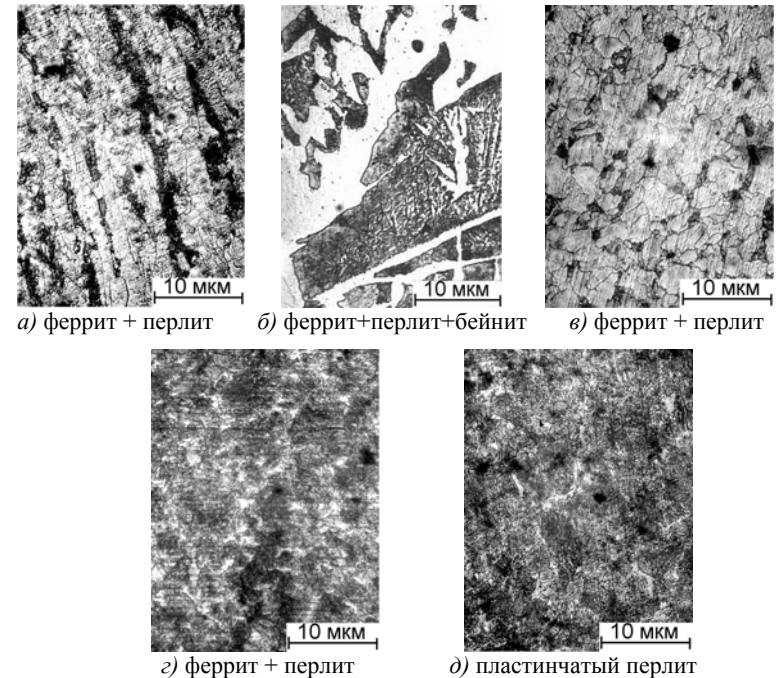


Рис. 1. Структуры сталей 09Г2ФБ (а); 20 (б); 40 (в); Ст6 (г) и У8 (д), × 1000.

Полученные структуры были сфотографированы и переведены в электронный вид цифровой камерой “Olympus C-50” при увеличении × 1000. В электронном виде структуры переведены в 256-цветный формат с оттенками серого (*.bmp). Размер каждого фотоснимка составлял 120 × 90 мм, что в электронном виде соответствует 680 × 510 пикселей.

Для анализа фотоснимков структуры использовалась солитоноподобная функция вида “мексиканская шляпа”, сконструированная из второй производной функции Гаусса:

$$\psi(x) = \frac{\partial^2}{\partial x^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right). \quad (3)$$

В процессе анализа 256-цветного фотоснимка металла были отобраны такие фрагменты, которые имели дефекты полировки в виде “мусора” (пятен и царапин) и неконтрастные границы светлых (феррит) и темных зерен (перлит, бейнит). Масштабирование оттенков серого цвета для отобранных фрагментов проводилось локально с помощью (2). В процессе изменения гаммы оттенков серого цвета дефекты были устранены и выявлены контрастные границы зерен. На рисунке 2 приведен пример вейвлет-преобразования участка структуры стали 20, изображенной на рисунке 1 б.

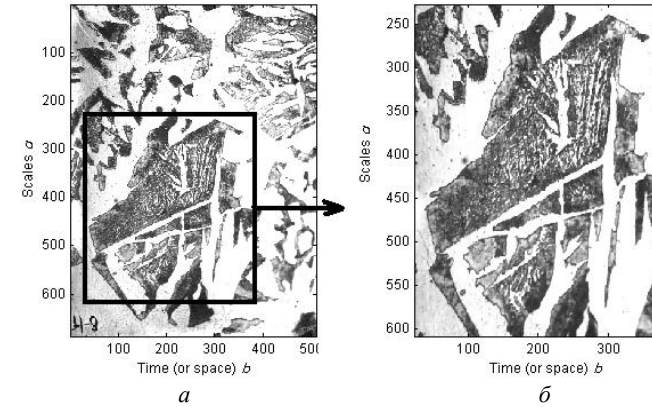


Рис. 2. Участок структуры стали 20 до (а) и после вейвлет-преобразования (б) с заданным коэффициентом масштаба a и параметром сдвига b (в пикселях).

Статистические оценки получены с помощью метода максимума модуля вейвлет-преобразований. В его основе лежит построение функции распределения вейвлет-коэффициентов вида [9]:

$$Z(q, a) = \sum_{b_i(a)} |W(a, b)|^q \propto a^{\tau(q)}. \quad (4)$$

Сумма $Z(q, a)$ в (4) вычислялась по всем точкам пространства, в которых модуль вейвлет-преобразования $W(a, b)$ принимает максимальные значения (по локальным максимумам модуля), $q \in R$. Показатель массы $\tau(q)$ определен с использованием линейной аппроксимации $\log Z(q, a) - \log a$.

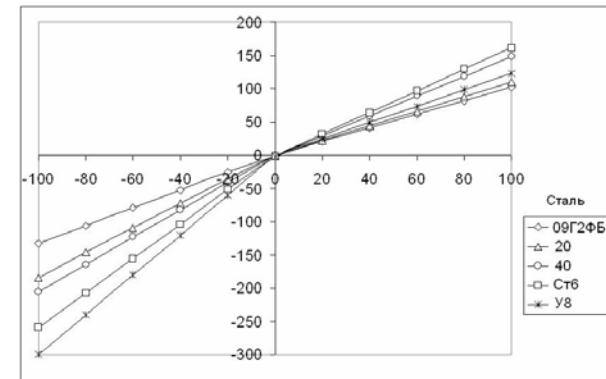
В рамках алгоритма метода максимума модуля вейвлет-преобразований рассчитан канонический спектр сингулярностей $f(h)$ с помощью преобразований Лежандра:

$$\begin{cases} h = \frac{d\tau}{dq}, \\ f(h) = qh - \tau(q) \end{cases}, \quad (5)$$

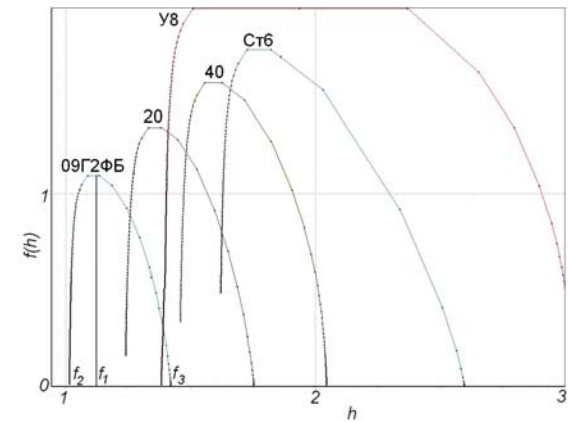
где показатель Гельдера h – локальная характеристика, изменяющаяся от точки к точке. Чем больше значение показателя h , тем более регулярной (“гладкой”) является функция [14]. Физический смысл указанных величин раскрыт в работах [14–16], где величина $\tau(q)$ интерпретируется как свободная энергия или показатель массы; q – величина обратная температуре; показатель Гельдера h – энергия и $f(h)$ – показатель неоднородности или энтропия.

Результаты и их обсуждение

Генерация меры проводилась по темным участкам структуры с $q_{min} = -100$ и $q_{max} = 100$ при 100 % площади покрытия изображения. На рисунке 3 приведены графики зависимостей $\tau(q)$ и $f(h)$ для темных участков структуры (перлита и бейнита).



а



б

Рис. 3. Графики зависимостей спектра показателей массы $\tau(q)$ (а) и канонического спектра сингулярностей $f(h)$ (б).

В таблице 2 приведены статистические характеристики зеренной структуры металла, полученные на основе анализа графиков $\tau(q)$ и $f(h)$ (рис. 3).

Таблица 2

Статистические характеристики структуры металла

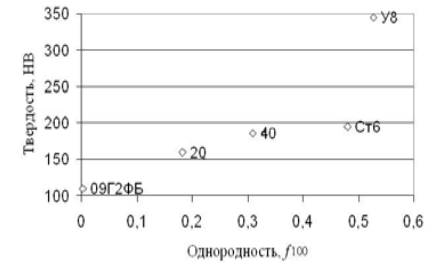
Сталь	Однородность, f_{100}	Упорядоченность, Δ	Регулярность, K
09Г2ФБ	0,002	0,06	0,29
20	0,183	0,135	0,72
40	0,31	0,071	0,541
Ст6	0,480	0,111	0,937
У8	0,527	0,483	1,723

Анализ зависимостей $f(h)$ (рис. 3 б) показал, что наибольший показатель однородности 0,527 выявлен для стали У8, структура которой состоит на 90 % из пластинчатого перлита и 10 % занимает ферритная сетка по границам зерен. Неоднородность здесь означает неравномерное распределение точек по областям, на которые разбивается структура, то есть ее геометрически одинаковые элементы заполнены точками с различной вероятностью. Если структура полностью однородна, то спектр $f(h)$ вырождается в точку. В остальных феррито-перлитных структурах показатель однородности ниже, так как в них значительную объемную долю занимает фаза феррита (светлые участки изображения). Минимальное значение параметра однородности 0,002 выявлено для стали 09Г2ФБ, что можно объяснить неравномерным распределением углерода в виде перлитной полосчатости, которая снижает прочностные показатели металла.

О характере рассматриваемых структур можно судить по таким показателям, как мера упорядоченности $\Delta = f_1(q=0) - f_2(q=100)$ и мера регулярности $K = f_3(q=-100) - f_2(q=100)$ (скрытая периодичность) [17]. Эти показатели отражают нарушение симметрии общей конфигурации структуры в целом, в отличие от однородности, которая описывает локальную дефектность конфигурации, пористость или шероховатость отдельных элементов (в данном случае перлита и бейнита). В работе [18] показано, что чем больше значение этих показателей, тем выше содержание в структуре периодических составляющих (упорядоченных элементов структуры одной фазы).

Показатель массы $\tau(q)$ отражает, в данном случае, плотность заселенности темными точками занимаемой площади. Если в структуре увеличивается количество темных участков структуры, то значения показателя массы увеличивается в сторону отрицательных значений. Увеличение количества углерода от 0,09 % для стали 09Г2ФБ до 0,80 % для стали У8 привело к увеличению отрицательных показателей $\tau(q)$ для перлита, соответственно от -133 до -300 (рис. 3 а).

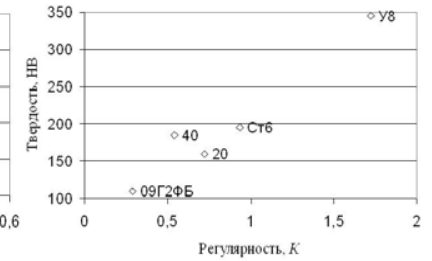
Изменения твердости и параметров однородности, регулярности и упорядоченности приведены на рисунках 4–6.



$$HV = 606,9 \cdot f_{100}^2 + 10,114 \cdot f_{100} + 118,56$$

$$R^2 = 0,7453$$

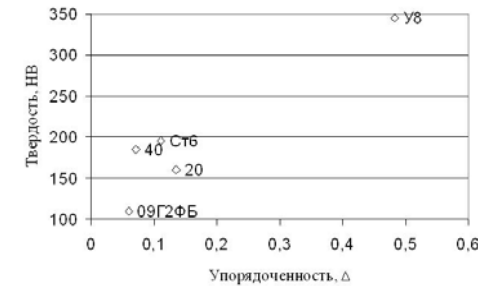
Рис. 4. Изменение параметра однородности и твердости при увеличении $\times 1000$.



$$HV = 155,89 \cdot K + 67,71$$

$$R^2 = 0,9380$$

Рис. 5. Изменение параметра регулярности и твердости при увеличении $\times 1000$.



$$HV = 469,47 \cdot \Delta + 118,25$$

$$R^2 = 0,8864$$

Рис. 6. Изменение параметра упорядоченности и твердости при увеличении $\times 1000$.

На рисунке 4 наблюдается степенная зависимость, так как для структуры пластинчатого перлита стали У8 значение показателя однородности отличается от остальных феррито-перлитных структур. Это свидетельствует о том, что по параметру однородности можно выявлять различия между различными вариантами структур. Из графиков на рисунках 5 и 6 следует, что твердость повышается при повышении показателей регулярности и упорядоченности. Параметр регулярности наиболее чувствителен к изменению твердости, что можно использовать для ее определения. Физически этот факт подтверждается тем, что увеличение количества углерода в стали, а, соответственно, темной фазы, приводит к увеличению в структуре периодической составляющей перлита.

Данный подход можно использовать для формирования базы данных из уравнений, где в качестве функции цели выступают механические свойства, а в качестве аргументов – наиболее чувствительные к ним статистические характеристики структуры.

ВЫВОДЫ

1. В работе проведен расчет статистических показателей структуры сталей 09Г2ФБ, 20, 40, Ст6, У8: однородности, упорядоченности и регулярности.
2. С помощью параметра однородности можно выявлять различия между ферритно-перлитными структурами и пластинчатым перлитом. На их основе можно предложить метод идентификации металлографических структур с помощью метода вейвлет-анализа.
3. Установлено, что по показателям регулярности и упорядоченности можно проводить количественную оценку перлита в стали.
4. Установлена взаимосвязь между статистическими показателями структуры и твердостью, которая указывает на то, что метод вейвлет-анализа перспективно применять в качестве дополнительного способа оценки механических свойств на основе статистического анализа элементов структуры.

Литература

1. Большаков В. И. Упрочнение строительных сталей. – Д. : Січ, 1992. – 332 с.
2. Большаков В. И., Береза Ю. И., Миронова О. Ю., Марченко В. И. Матеріалознавство. – Базіліан Пресс, Канада. – 1998. – 216 с.
3. Mandelbrot B. B. Les Objets Fractals: Forme, Hasard and Dimensions : Flammarion, Paris, 1975.
4. Встовский Г. В., Колмаков А. Г., Бунин И. Ж. Введение в мультифрактальную параметризацию структур материалов. Ижевск : Научно-издательский центр “Регулярная и хаотическая динамика”. – 2001. – 116 с.
5. Дроздов Ю. А., Ткаль В. А., Окунев А. О., Данильчук Л. Н. Устранение фоновой неоднородности и влияния зернистости фотоматериалов на топографические и поляризационно-оптические изображения дефектов структуры монокристаллов. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2004. – Т. 70. – № 7. – С. 25–34.
6. Ткаль В. А., Окунев А. О., Дроздов Ю. А., Данильчук Л. Н. Применение цифровой обработки для выявления топографических изображений микродефектов и дефектов фотоэмульсии. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2004. – Т. 70. – № 11. – С. 23–28.
7. Muzy J. F., Bacry E., Arneodo A. Phys. Rev. Lett. 67, - 3515 (1991).
8. Daubechies I. Ten Lectures on Wavelets (Philadelphia, Pa.: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1992).
9. В. Л. Гиляров, В. Е. Корсуков, П. Н. Бутенко, В. Н. Светлов. Физика твердого тела. – Т. 46, вып. 10. – 2004. – С. 1806–1810.
10. Лавренов А. Ю. Немонотонная релаксация в водосодержащих сплавах Pd-Eg. Автореф. дисс. канд. физ.-мат. наук. М. : МГУ, 2003. – 22 с.
11. С. Ш. Рехвиашвили. Применение вейвлет-преобразования для обработки изображений в атомно-силовом микроскопе // Письма в ЖТФ. – Т. 28, вып. 6. – 2002. – С. 46–50.

12. Н. М. Астафьева. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения. // УФН. Т. 166, вып. 11. – 1996. – С. 1145–1170.
13. И. М. Дремин, О. В. Иванов, В. А. Нечитайло. Вейвлеты и их использование. //УФН. – Т. 171, вып. 5. – 2001. – С. 465–501.
14. A. Arneodo, E. Vacry, J. F. Muzy. Physica A, vol. 213, 232 (1995).
15. P. Collet, J. Lebowitz, A. Porsio. J. Statist. Phys, vol. 47, 609 (1987).
16. M. J. Feigenbaum. J. Statist. Phys, vol. 46, 919 (1987).
17. Лепов В. В. Структурные модели процессов накопления повреждений и трещиностойкость конструкционных материалов. Автореф. дисс. докт. техн. наук. – Якутск : Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, 2006. – 37 с.
18. Giona M., Piccirilli P., Cimagalli V. //J. Phys. A. 1991. vol. 24. №3. – P. 367–373.