

3. Обнаруженное явление интерпретируется как фазовый переход типа «складка» в среде с нелинейными свойствами, где возможная смена диссипативного состояния обусловлена возникновением динамической неустойчивости между притоком активных дислокаций и их последующим стоком вначале в малоугловые, а затем большеугловые границы. Предполагается, что множественные изгибы границ зерен связаны с процессами самоорганизации дефектов кристаллического строения.

*Работа выполнена при государственной поддержке ведущих научных школ РФ (код гранта № НШ-1505.2003.8).*

#### Список литературы

1. Барахтин Б.К., Варгасов Н.Р., Рыбин В.В. Мультифрактальный анализ структурных изменений при вариации температурно-скоростных режимов пластической деформации. Труды 5-го Международного семинара «Актуальные проблемы прочности». Великий Новгород: НГУ, 2001. - т.2. - с.38-42.
2. Штремель М.А. Прочность сплавов Часть 2. Деформация. М.: МИСИС, 1997. - 527 с.
3. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов. М.: Металлургия, 1986 - 479с.
4. Барахтин Б.К., Чашников В.Ф. Программа ЭВМ для мультифрактального анализа изображений структур металлов и сплавов // Вопросы материаловедения, 2001,N 4 (28). с.5-8.

УДК 539.25:620.187

## ОСОБЕННОСТИ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОЙ АККОМОДАЦИИ ПАКЕТОВ МАРТЕНСИТА В СТАЛЯХ ИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МУЛЬТИФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ СТРУКТУР

Барахтин Б. К., Зворыгин Р. Г.

*ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт – Петербург, Россия*

Накопленные знания о структуре и свойствах, а также практический опыт применения сталей судостроительного назначения говорят о том, что в последовательности технологических операций термомеханической обработки (ТМО) увеличение скорости охлаждения при закалке листового проката сопровождается заметным улучшением всего комплекса механических свойств [1]. Одной из причин, ответственных за возрастание прочности и вязкости сталей, является формирование игольчатых мартенситных и (или) бейнитно-мартенситных мезофаз<sup>2</sup> речного дислокационного строения [2]. В качестве другой причины, способной оказать влияние на завершенность и кинетику фазовых превращений, видится неоднородное неравновесное состояние матрицы после закалки, особенно заметное при производстве толстолиствого проката. Так, в результате

<sup>2</sup> Здесь и далее термин «мезофаза» означает продукты ГЦК → ОЦК реакции, сосредоточенные в пределах зерен металла.

быстрого охлаждения в поверхностных слоях листов происходит мартенситное превращение, а в сердцевине – нет. Наличие градиента температур по толщине делает возможным последующий самоотпуск мартенситных структур, способный привести к формированию "квазикомпозита", в котором отдельные слои обладают мартенситным, бейнитным или феррито-перлитным строением.

Наряду с неоднородным по толщине листа распределением мезофаз превращения возможна активация взаимодействия среди ансамблей вакансионной и дислокационной природы на уровне микроскопического масштаба. Полагают [3], что на этапе охлаждения в поверхностных слоях металла возникает вакансионный поток по направлению температурного градиента. Благодаря активному взаимодействию с дислокациями и малоугловыми границами, он способен образовывать поливакансионные комплексы (вакансии и дивакансии), которые придают дислокационным линиям неустойчивые конфигурации, а их перемещению – свойства нелинейных сред [4].

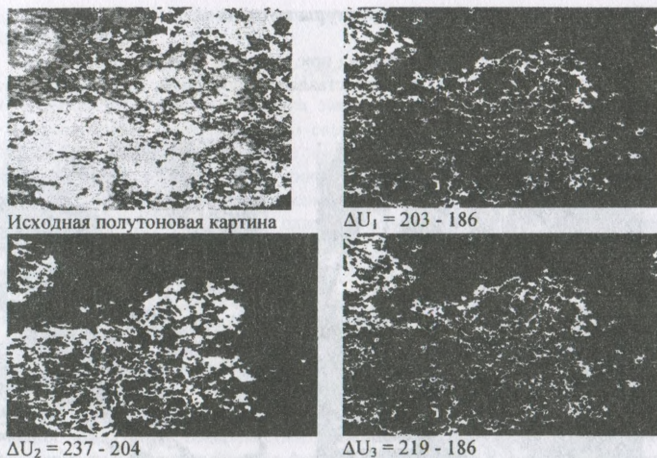
Предполагая возможность возникновения или сохранения локального неравновесного состояния в сталях после закалки, задачей исследования являлось обнаружение его следов. Они могли проявиться в морфологии рельефа границ мезофаз, образующихся в результате ГЦК → ОЦК реакции в виде дисперсной бейнито-мартенситной или феррито-цементитной смесей, вследствие неоднородной сосредоточенной упруго-пластической аккомодации и других процессов у поверхностей сопряжения зерен, пакетов, реек.

#### **Выбор методики исследования**

Эксперименты выполнены с образцами, изготовленными из листов толщиной 10-20 мм сталей типа 09ХН2МД, которые в промышленных условиях после ТМО охлаждались с повышенной скоростью в роликозакалочной установке. Прочностные свойства металла оценивались по результатам стандартных механических испытаний на одноосное растяжение.

После испытаний с определением предела текучести, на поперечных сечениях образцов вырезались пробы (фольги) для электронно-микроскопических исследований «на просвет», которые выполнялись с помощью микроскопа «ЕМ-400Т».

С целью сопоставимости результатов, полученных при обработке электронно-микроскопических изображений, все дифракционные картины приводились к одному оптическому увеличению ( $\times 26000$ ) посредством пропорционального масштабирования с помощью программы «Фотошоп-7». Таким способом было обработано около 50 полей. Далее, с целью обнаружения признаков неравновесного состояния использован метод мультифрактальной параметризации изображений структур [5], с помощью которого по программе «Фрактал» [6] рассчитывался спектр обобщенных размерностей (Реньи). Из набора мультифрактальных параметров использовались значения пространственной  $D_f^0$  и информационной  $D_f^1$  размерностей. Например, величина размерности  $D_f^0$  служит для количественной аттестации извилистости границ выделенных фрагментов, а значения  $D_f^1$  характеризуют рост информации, необходимой для определения местоположения выделенной точки при стремлении размеров окружающего пространства к нулю. Вычисление размерностей производилось с точностью 1%. Для этого выбранные изображения оцифровывались в кадры площадью  $512 \times 285$  псх, в пределах которых оператор мог установить аналитическую рамку  $256 \times 256$  псх на любых участках дифракционных картин, где были обнаружены какие-либо особенности.



**Рис. 1.** Пример полутонового дифракционного изображения ячеистой дислокационной структуры (слева вверху) и его бинарные отображения при разных окнах бинаризации  $\Delta U = U_{\max} - U_{\min}$ . При нахождении размерностей величина окна фиксировалась на значении  $\Delta U_3$ . Значения  $U_{\max}$  и  $U_{\min}$  выбираются из интервала (0, 256).

Цифровой анализ изображений производят на бинарных изображениях, где частицы (объекты) представляют собой массивы из связанной белой компоненты на поле черного цвета. Операция бинаризации заключалась в преобразовании исходных полутоновых картин, представленных в 256 уровнях серого цвета, в их черно-белые отображения с последующим вычислением назначенных параметров. В итоге, на черном поле бинарного изображения матрицы белым цветом обозначались контуры геометрических фигур, параметры которых (рельеф, размеры, относительные доли) подлежали анализу (рис.1).

Внешний контур такого бинарного объекта образован пикселями, где плотность почернения отвечает заданному окну или порогу преобразования. В результате последовательного суммирования пикселей вдоль направления обхода фигур (например, по часовой стрелке), формировались их контуры. В представленной работе было применено окно, образованное двумя порогами бинаризации:  $\Delta U_3 = 219 - 186$ .

Существует принципиальное различие в природе формирования полутоновых и бинарных изображений структур. Так, контуры объектов, видимых на электронно-микроскопических изображениях, определяются условиями дифракции и имеют физическое обоснование. На экране микроскопа полутоновое изображение формируется аналоговыми сигналами переменной амплитуды. На экране компьютера вид бинарных картин определяется окном или порогом преобразования и зависит от количества единичных импульсов (нулей и единиц) постоянной амплитуды. Таким образом, бинарную картину следует рассматривать как дискретную аппроксимацию характеристических функций объекта или статистически-геометрической моделью исходной картины. При удачном выборе окна или порога преобразования операция бинаризации не вносит существенных искажений в статистические массивы данных и сохраняет масштабное соответствие в геометрических параметрах.



## Результаты исследования структуры металла

После ускоренного охлаждения при закалке внутреннее строение листового проката сталей типа 09ХН2МД представляет собой смесь из бейнито-мартенситных мезофаз (Рис.2).



**Рис.2.** «Тонкая» бейнито-мартенситная структура в закаленных листах толщиной 10 мм. Внутри пакетов мартенсита самоотпуска видны карбиды  $Me_7C$ .



**Рис.3.** Периодический дифракционный контраст в пакетах мартенсита вблизи границ.

На некоторых электронно-микроскопических снимках мартенситных структур внутри и вдоль границ пакетов зафиксирован дифракционный контраст (рис.3) в виде чередующихся ступенчатых интенсивностей. Как правило, он наблюдался в середине бейнито - мартенситных пакетов. Повторяемость с шагом  $\sim 200$  нм и локализация на участках протяженностью до 0.1 мкм соответствуют плавным изменениям разориентировок в пределах нескольких градусов. Максимумы интенсивности свидетельствуют о локализации латентной энергии, вызванной полями изгиба кручения в кристаллической решетке. Из периодичности в расположении интерференций следует, что между энергетическими зонами присутствуют области микропластической релаксации.

Согласно теоретическим расчетам полей напряжений вблизи равновесных и неравновесных границ [7], при данной средней плотности дефектов минимальной упругой энергией должны обладать границы с равновесным и периодическим строением. Напряжения, порождаемые неравновесными границами, затухают медленно и вызывают более плотный дифракционный контраст. Локализация контраста у границ в местах, соответствующих (по длине) серединам пакетов, свидетельствует о неполной компенсации напряжений у стыков пакетов и частичном сохранении там неравновесного состояния.

В толковании полученных данных мы исходим из предположения о частичной компенсации упругих напряжений вблизи границ мезофаз игольчатой морфологии. Неполная уравнированность дислокационной структуры в стыках пакетов свидетельствует о ее пониженной устойчивости и неравновесности. Обнаруженный периодический дифракционный контраст можно представить как результат

прохождения одиночного фронта пластической аккомодации, определяемого плотностью дислокаций  $p$ .

$$dp/dt = D d^2p/dr^2 + A_1p - A_2p^2.$$

В этом случае перемещение дефектов зависит от коэффициента диффузии  $D$  и реализуется механизмом переползания со скоростью  $V > \sqrt{kD}$ , где  $k$  – постоянная, пропорциональная градиенту движущей силы. Истоки – стокковые слагаемые с коэффициентами  $A_1$  и  $A_2$  определяют кинетику перестройки. Поскольку активация этого процесса требует достаточно высоких температур, следует допустить, что периодический контраст был вызван пластической аккомодацией при завершении термомеханической обработки стальных листов или на ранних этапах ГЦК → ОЦК превращения при их закалке.

При компьютерной обработке и мультифрактальной параметризации изображений тонкой структуры замечено, что между значениями пространственных размерностей  $D_f^0$  для границ (а) пакетов и внутренних контуров (б) от дислокационных сплетений устойчиво воспроизводится разница  $D_f^{0a} - D_f^{0b} = 0.05$ . Она не зависела от толщины исследованных стальных листов, что указывало на единую физическую природу структурных перестроек вблизи границ пакетов. При «тренде» структурных изменений в направлении «изнутри к поверхности», обнаруженное скачкообразное изменение величин размерностей свидетельствует о фазовом превращении 1-го рода с изменением упорядочения в хаотическом скоплении дислокаций. Скалярная плотность дефектов оценена в  $\sim 10^{14} \text{ м}^{-2}$ , что вполне достаточно для проявления коллективных эффектов [8].

Принимая во внимание результаты мультифрактального анализа электронно-микроскопических изображений, которые указали на смену упорядоченности в дислокационных структурах вблизи границ пакетов мартенсита, обнаруженный эффект возникновения периодического контраста можно интерпретировать как результат локализованного быстрого перемещения дислокаций в состояниях, далеких от равновесного. Такое перераспределение дефектов скалярной плотностью  $P^w$ , вектором Бюргера  $b$  и сдвигом  $g$  должно осуществляться в микрообъемах аккомодации  $W$  без образования дислокационных зарядов с образованием слоев различной ориентации  $Q \sim (dg/dr)/b$  механизмом скольжения в разных направлениях и суммарной скоростью сдвигов  $V \sim 0$  [8].

$$P^w = p^+ + p^- \quad \text{и} \quad Q = (p^+ - p^-).$$

Такой схеме (рис. 4) соответствуют кинетические уравнения:

$$dp^w/dt = d/dr [P^w D (dp^+/dr + dp^-/dr)]$$

и

$$dQ/dt = d/dr [P^w D (dp^+/dr - dp^-/dr)]$$

Здесь  $D$  – коэффициент самодиффузии,  $r$  – координата.

В предложенной записи уравнения характеризуют кинетику самоорганизации дислокационной подсистемы вблизи границ мезофаз. Малые возмущения (сдвиги) описываются суперпозицией волн  $p_j^w$  вида:

$$p_j^w = p_{j0} \exp\{ft + i 2\pi r/\lambda\},$$

где  $f$  – комплексные частоты,  $t$  – время,  $\lambda$  – длина волны, которая может рассматриваться как один из характеристических масштабов структуры. В решении дифференциального уравнения комплексные составляющие свидетельствуют о том, что искомая функция является колебательной.

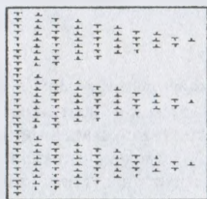


Рис. 4. Схема послойного разделения дислокаций разного знака

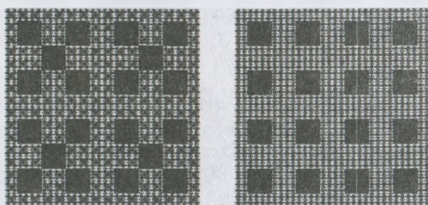


Рис. 5. Модели регулярных фракталов в виде стоячих волн, которые соответствуют значениям  $D_f^1$  по обе стороны границ мартенситных пакетов с периодическим дифракционным контрастом.

Основным фактором, определяющим подвижность хаотически распределенных дислокаций, является их скалярная (общая) плотность –  $P^w$ . Если периодический контраст обусловлен самоорганизацией дефектов, то в их распределении можно ожидать возможность проявления резонансных эффектов по мере возрастания скоростей охлаждения (назначения начальных условий) в некоторых «подходящих по размеру» мартенситных пакетах (граничных условиях задачи).

Информационная размерность  $D_f^1$ , которая определялась аналогично величине  $D_f^0$  из спектра обобщенных размерностей бинаризованных картин (состоящих из нулей и единиц), также претерпевала скачок вблизи границы мартенситного пакета. В мультифрактальной интерпретации скачок величины  $D_f^1$  характеризует направленный поток энтропии информации через границу [9]. С целью лучшей наглядности для обнаружения и возможной последующей оценки изменения этого потока построены модели трех поколений статистических (регулярных) фракталов в виде ковров Серпинского. В построении использованы значения размерностей  $D_f^1$ , вычисленные по обе стороны границ мартенситных пакетов в местах, где обнаружен периодический контраст. Вид моделей в «телеграфной» (диадической) системе координат показан на рисунке 5. Модели представляют собой упорядоченные стоячие волны, локализованные в пределах аналитической рамки  $256 \times 256$  пикс. Изменения в местоположениях их максимумов описываются операциями типа «сложения» или «вычитания» [10]. И если «физическое» толкование периодического контраста ведет к дифференциальным уравнениям, то с помощью стоячих волн проблема обнаружения изменений в упорядоченности расположения объектов «с информацией» может быть сведена к числовой задаче с разностными уравнениями.

## Выводы

1. Структура листов высокопрочной судостроительной стали типа 09ХН2МД, быстро закаленной в промышленных условиях, характеризуется бейнитом-мартенситными фазами пакетного (дислокационного) вида.

2. На электронно-микроскопических изображениях вблизи границ некоторых мартенситных пакетов зафиксирован дифракционный периодический контраст, обусловленный процессами упруго – пластической аккомодации с самоорганизацией дислокаций, которые после закалки находились в локально неравновесном состоянии.

3. При мультифрактальном анализе электронно-микроскопических изображений бейнито-мартенситных структур вблизи границ мартенситных пакетов зарегистрирован скачок величин пространственной и информационной размерностей, что свидетельствует о превращении 1-го рода с изменением степени порядка в хаотическом скоплении дислокаций.

4. Геометрические – статистические модели в виде регулярных фракталов, построенные в диалектической (двоичной) системе координат по бинарным отображениям полутоновых дифракционных картин, представляют собой упорядоченные стоячие волны. Скачок значений информационной размерности и изменение в расположении максимумов стоячих волн являются наглядной иллюстрацией превращения 1-го рода и потока информации через границу мартенситного пакета, где обнаружен периодический дифракционный контраст.

*Работа выполнена при государственной поддержке ведущих научных школ РФ (код гранта № НШ-1505.2003.8).*

#### Список литературы

1. Барахтин Б.К., Пазилова У.А., Хлусова Е.И. Скорость охлаждения как синергетическое влияние диффузионных процессов на механические свойства сталей // 14 Петербургские чтения по проблемам прочности. СПб, март 2003г.Сб.тезисов. СПб.: СПб ГУ, 2003г.-с.129-130.
2. Барахтин Б.К., Семичева Т.Г., Высоцкий В.М. Морфология межфазных границ в низкоуглеродистых хладостойких сталях при вариации условий охлаждения после термомеханической обработки // Труды I Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата, июль 2002, Якутск: ИПС СО РАН, 2002.- т.2.- с 3-10.
3. Кудряков О. В. Дислокационные квазидиполи при мартенситном превращении сталей // Физика металлов и металловедение, 2002.-т.94,№5.-с.3-10.
4. Дж. С. Ли. Микромеханизмы деформации и разрушения // Металлические стекла. М.:Металлургия, 1984.-с.173-191.
5. Встовский Г.В., Колмаков А.Г., Бунин И.Ж. Введение в мультифрактальную параметризацию структур материалов. Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001.- 116 с.
6. Барахтин Б.К., Чашников В.Ф. Программа ЭВМ для мультифрактального анализа изображений структур металлов и сплавов // Вопросы материаловедения, 2001,№4(28).-с.5-8.
7. Валиев Р.З., Владимиров В.И., Герман В.Ю., Назаров А.А., Романов А.Е. Поля напряжений равновесных и неравновесных границ зерен. Препринт 1327. Л.: ФТИ, 1989.-22 с.
8. Владимиров В.И. Физическая природа разрушения металлов. М.: Металлургия, 1984.-280 с.
9. Хазен А.М. Введение меры информации в аксиоматическую базу механики. М.: Рауб, 1998.- 164 с.
10. Хармут Х. Применение методов теории информации в физике. М.: Мир, 1989.- 344 с.