

## РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОЦЕНКИ МИКРОСТРУКТУРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ

А. А. КАЗАКОВ, Е. И. КАЗАКОВА, Д. В. КИСЕЛЕВ, Г. Д. МОТОВИЛИНА\*

*В данной статье рассмотрены методы оценки микроструктурной неоднородности трубных сталей. Разработаны и реализованы в виде отдельных модулей анализатора изображения Thixomet Pro методики количественной оценки микроструктурной неоднородности всех типов современных марок трубных сталей.*

*Ключевые слова: микроструктура, неоднородность, феррит, анизотропия, бейнит, оценка, методика, модуль, анализатор изображения, образцы.*

Для оценки микроструктурной полосчатости ферритно-перлитной стали по ГОСТ-5640 используют метод сравнения с эталонными шкалами, построенными по принципу возрастания количества полос перлита с учетом их сплошности и степени вытянутости ферритного зерна.

Трубные стали следующего поколения имеют ферритно-бейнитную структуру, и ферритное зерно намного меньше, чем это предусмотрено ГОСТ-5640. В связи с этим для них были разработаны новые стандартные шкалы [1], построенные по тому же принципу, что и шкалы ГОСТ-5640.

Для повышения точности и объективности оценки микроструктурной полосчатости в листовом и рулонном прокате трубных сталей ферритно-бейнитного класса разработали автоматизированную методику с использованием анализатора изображений [2, 3]. В этой методике ввели условное понятие «вторая фаза», под которой понимается собственно бейнит и другие продукты распада аустенита, отличные по цвету от ферритной матрицы. Методом направленных секущих [4] определяли следующие стереологические параметры.

1. Коэффициент полосчатости:  $\sigma_{VL\parallel}/\sigma_{VL\perp}$  ( $\sigma_{VL\parallel}$  — среднее квадратичное отклонение доли второй фазы на секущих, параллельных оси деформации;  $\sigma_{VL\perp}$  — среднее квадратичное отклонение доли второй фазы на секущих, перпендикулярных оси деформации), который описывает характер взаимного расположения элементов структуры (феррита и второй фазы), точнее, степень разделения этих структурных составляющих на отдельные слои, ориентированные вдоль оси деформации.

2. Коэффициент анизотропии:  $\bar{N}_{L\perp}/\bar{N}_{L\parallel}$  ( $\bar{N}_{L\parallel}$  — среднее количество частиц второй фазы, пересеченных секущими, параллельными оси деформации на единицу длины секущей;  $\bar{N}_{L\perp}$  — среднее количество частиц второй фазы, пересеченных секущими, перпендикулярными оси деформации на единицу длины секущей), отражающий вытянутость отдельных частиц второй фазы вдоль оси деформации.

На основе данных параметров, а также с учетом анизотропии ферритного зерна назначали балл соответствующей шкалы.

При производстве современных трубных сталей используют термомеханическую обработку, которая предусматривает применение в конце чистовой прокатки эффективных систем ускоренного охлаждения. Листовой прокат в этом случае имеет практически полностью бейнитную структуру, микроструктурная полосчатость отсутствует. Тем не менее в таких сталях можно наблюдать анизотропию собственно бейнитной структуры. Стереологические методы, которые использовали для оценки ферритно-перлитных и ферритно-бейнитных структур, неприменимы для описания сложной морфологии бейнита. Для этого случая был разработан метод оценки анизотропии бейнита, основанный на текстурном анализе изображений [5].

Текстурный анализ заключается в выделении количественных признаков, которые полностью или частично характеризуют данное изображение или его фрагмент. Задача состоит в нахождении такого признака, который однозначно характеризует анизотропию микроструктуры, то есть наличие и выраженность приоритетного направления микроструктуры. Одним из способов нахождения текстурных признаков изображения является построение матриц совместной встречаемости уровней серого  $P_{d,\alpha}$ , элементы которых представляют собой условную ве-

\* А. А. Казаков, Е. И. Казакова, Д. В. Киселев, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет; Г. Д. Мотовилина, ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей»; kazakov@thixomet.ru

роятность  $P(i, j)$  возникновения пикселя с уровнем яркости  $i$  на расстоянии  $d$  в направлении  $\alpha$  от пикселя с уровнем яркости  $j$ . Далее вычисляются количественные параметры, описывающие вид этих матриц. Одним из таких параметров является «обратная разность» или гомогенность [5]

$$H_{d,\alpha} = \sum_i \sum_j \frac{P_{d,\alpha}(i, j)}{1 + |i - j|}. \quad (1)$$

Данный параметр характеризует рассеяние матрицы  $P(i, j)$  относительно главной диагонали, которое, в свою очередь, отражает размер зерна или грубость текстуры. Очевидно, что для изображений анизотропных структур грубость текстуры сильно отличается в одном из направлений, а значит, отличается и признак гомогенности.

Расчет коэффициента анизотропии выполняют следующим образом. Строят несколько матриц  $P$  для разных направлений  $\alpha$  и на основе каждой матрицы вычисляют признак гомогенности. Коэффициент анизотропии рассчитывается как среднеквад-

ратичное отклонение значений  $H_{d,\alpha}$  вычисленных для разных направлений:

$$K_A = \sigma_{H_{d,\alpha}}. \quad (2)$$

При использовании методов текстурного анализа нет необходимости выделения элементов микроструктуры, что позволяет оценивать микроструктуру сложной морфологии и повышает объективность оценки. Полученный с помощью этого метода коэффициент однозначно характеризует анизотропию микроструктуры сталей бейнитного класса.

На рис. 1 показаны микроструктуры с различными значениями коэффициента анизотропии.

Исследования показали, что среди разнообразных морфологических форм именно бейнит реечной морфологии, вытянутый в направлении прокатки, понижает уровень механических свойств листовой стали [6]. Разработана методика травления, позволяющая однозначно выделять бейнит такой морфологии и выполнять с помощью анализатора изображений измерения его объемного содержания и протяженности

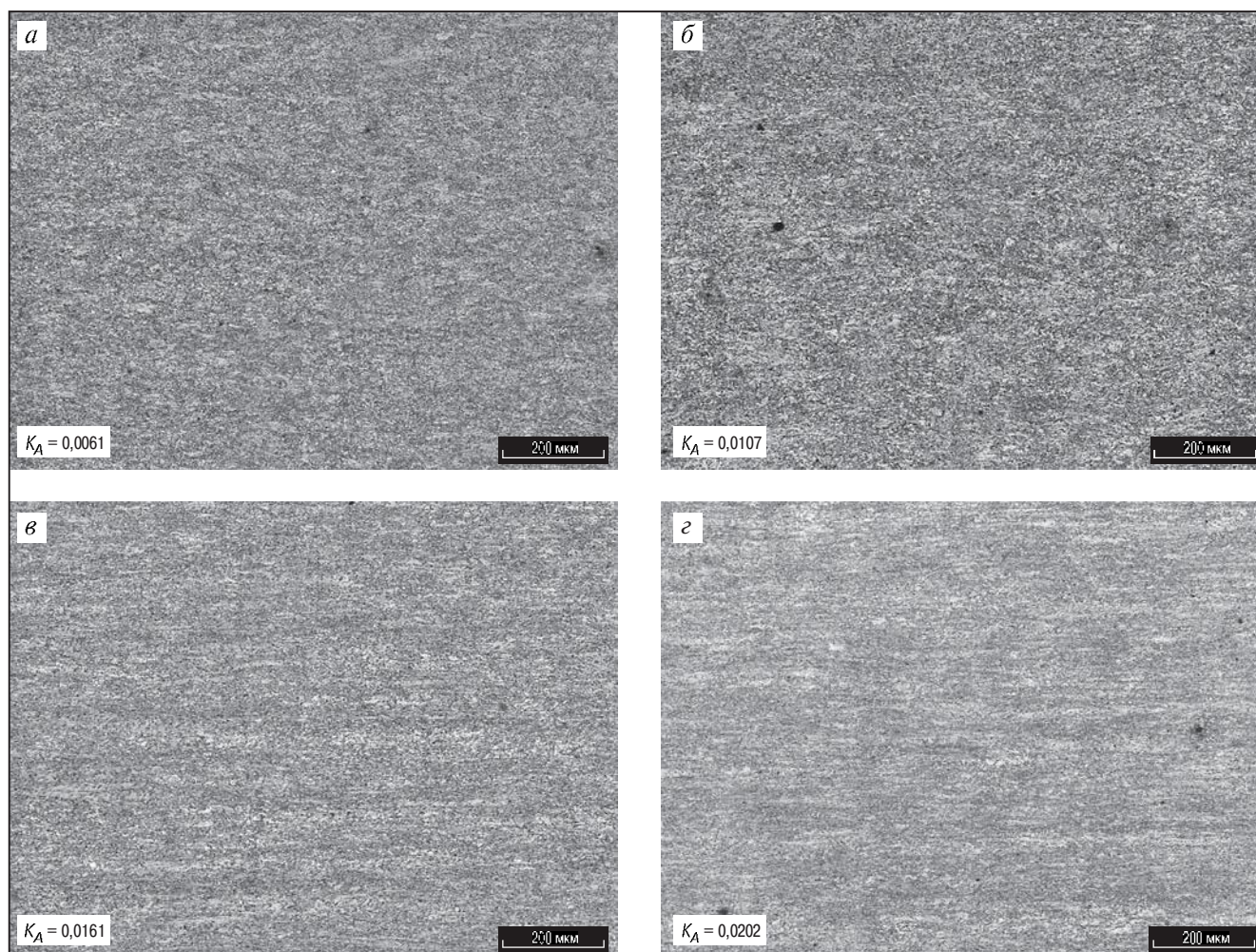


Рис. 1. Микроструктуры стали с различными значениями коэффициента анизотропии бейнита ( $a, б$  — поперечное направление,  $в, г$  — продольное направление)

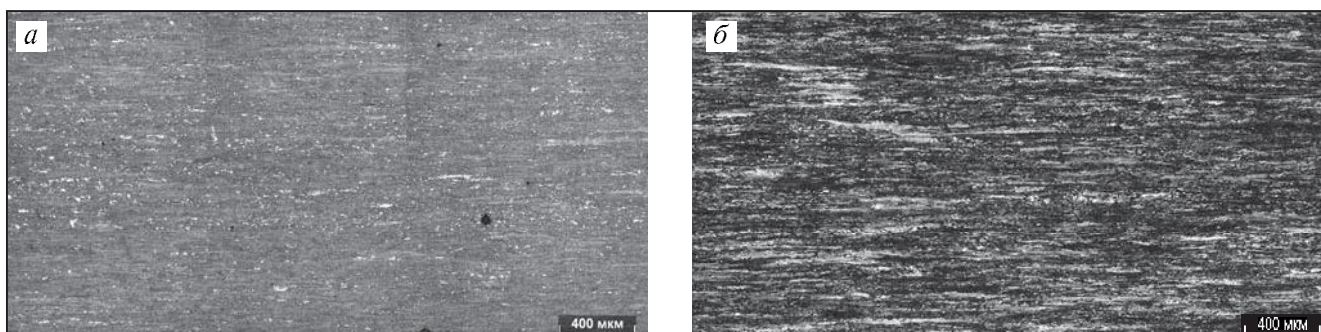


Рис. 2. Панорамное изображение структуры после цветного травления при увеличении  $\times 100$  в светлом поле (а) и в поляризованном свете (б)

продольных межфазных границ, во многом определяющих механические свойства трубных сталей этого класса. Данная методика включает следующие этапы.

1. Подготовка поверхности шлифа по методике шлифподготовки горячекатаного листа из сталей ферритно-бейнитного и бейнитного классов для количественных металлографических исследований (шлифование и полирование образцов проводили на станке Buehler Phoenix 4000 с использованием следующих расходных материалов: шлифовальные бумаги — Buehler CarbiMet № 320 и 600, алмазные пасты — Metadi 2, суспензии — Metadi и MasterMet 2);

— мокрая шлифовка на абразивной бумаге № 320 в течение 30–40 с при скорости вращения круга 150 об/мин с нагрузкой 16–20 кг;

— мокрая шлифовка на абразивной бумаге № 600 в течение 30–40 с при скорости вращения круга 150 об/мин с нагрузкой 16–20 кг;

— грубая полировка на ткани UltraPad с использованием алмазных паст Metadi 6 или 9 мкм; параметры полирования: скорость 100–125 об/мин, нагрузка 14–16 кг при вращении головы и барабана в одном направлении, время 3 мин;

— промежуточная полировка на круге из нетканого материала TexMet с использованием алмазных паст Metadi 2 (3 мкм) и добавлением в процессе полирования жидкости Metadi Fluid (параметры полирования: скорость 100 об/мин, нагрузка 12–15 кг, при вращении головы и барабана в разных направлениях, время 3,5 мин);

— окончательная полировка на ворсистой ткани MicroCloth с использованием суспензии окиси алюминия Micropolish II с размером частиц 0,05 мкм (параметры полирования: скорость 50 об/мин, нагрузка 11–14 кг при вращении головы и барабана в разных направлениях, время 4–4,5 мин).

2. Цветное пленочное травление для получения оптического эффекта при использовании поляризованного света. Шлиф после полирования слегка подтравливают 3%-ным раствором азотной кислоты, поверхность обезжиривают спиртом, высушивают и травят 10%-ным водным раствором тиосульфата натрия методом погружения в течение приблизительно 20 с. Продолжительность травления зависит от свойств образца. Стали с низким содержанием углерода требуют более длительного травления, чем стали с повышенным содержанием углерода. Затем образцы промывают в спирте и высушивают в потоке холодного воздуха.

3. Анализ изображений ферритно-бейнитной микроструктуры. Количественный анализ структурных составляющих проводили на моторизованном оптическом микроскопе Axiovert 200 MAT, оснащенном анализатором изображений Thixomet.

Разработана методика количественной оценки бейнита речечной морфологии после пленочного травления и последующего анализа в поляризованном свете, суть которой состоит в следующем:

— построение панорамного изображения площади в несколько десятков полей зрения при увеличении от  $\times 100$  до  $\times 500$  (рис. 2, а, б), при этом сле-

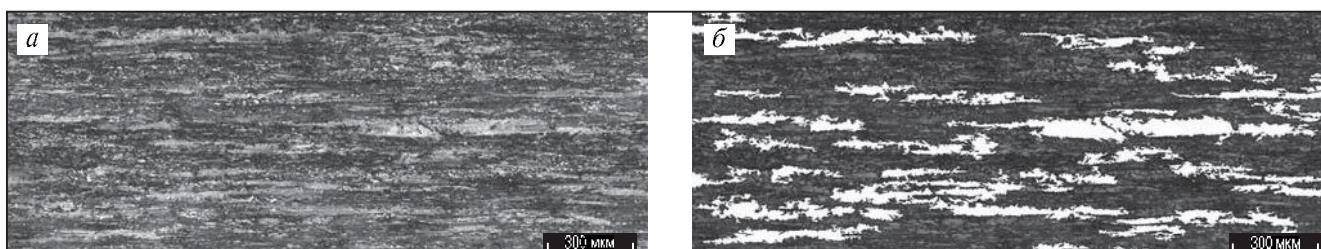


Рис. 3. Панорамное изображение структуры после цветного травления при увеличении  $\times 200$  в поляризованном свете (а) и распознанная структура на анализаторе изображения Thixomet (б)

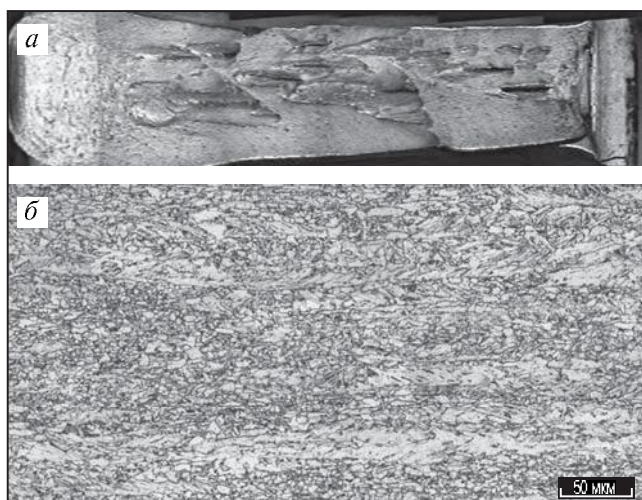


Рис 4. Поверхность излома образца после ИПГ (а) и соответствующая ему микроструктура бейнита (б), продольное сечение

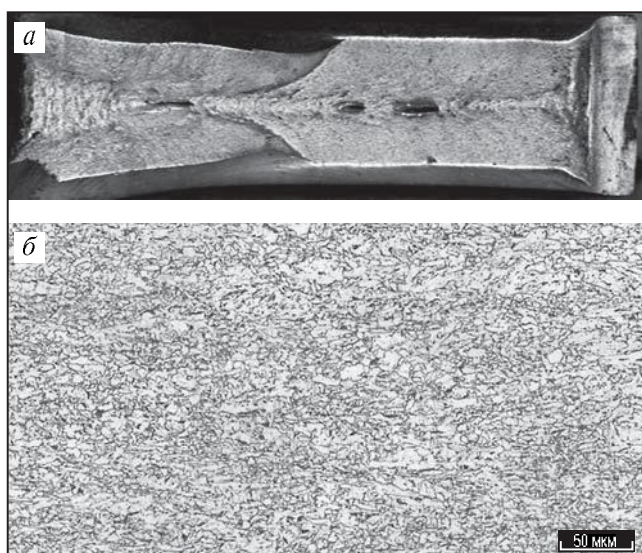


Рис 5. Поверхность излома образца после ИПГ (а) и соответствующая ему микроструктура бейнита (б), поперечное сечение

дует учитывать, что контрастность изображения в поляризованном свете снижается при повышении увеличения;

— определение границ областей бейнита реечной морфологии в режиме «автоматических измерений» с использованием соответствующего модуля анализатора изображений Thixomet (рис. 3, а, б);

— использование разнообразных метрических параметров бейнитных областей с реечной морфологией, вытянутых в направлении прокатки (см. рис. 3), для оценки их влияния на свойства стали.

Исследования показали, что неоднородность структуры и протяженность продольных межфазных гра-

ниц оказывают негативное влияние на характер разрушения при испытании падающим грузом (ИПГ), а именно: приводят к образованию расслоев. В ферритно-перлитных сталях такими границами являются границы между ферритом и протяженными перлитными колониями, вытянутыми в направлении прокатки, а в бейнитных сталях — границы между вытянутыми кристаллами бейнита реечной морфологии и другими структурными составляющими [4].

При однородной изотропной структуре и отсутствии протяженных межфазных границ расслоений на изломе образцов после ИПГ практически нет. Чем больше коэффициент анизотропии и протяженнее межфазные границы, тем больше расслоев образуется на изломе образцов после ИПГ (рис. 4, 5).

Таким образом, в результате проведения настоящей работы были разработаны и реализованы в виде отдельных модулей анализатора изображения Thixomet Pro методики количественной оценки микроструктурной неоднородности всех типов современных марок трубных сталей: автоматизированная методика по ГОСТ-5640 для ферритно-перлитных сталей, методика оценки структурной полосчатости с помощью эталонных шкал [2] и автоматического анализа изображений [3] для ферритно-бейнитных, метод оценки анизотропии структуры и методика оценки бейнита реечной морфологии для сталей бейнитного класса. **ИМ**

#### Библиографический список

1. Методика оценки структурной полосчатости низколегированных трубных сталей с помощью эталонных шкал ОАО ВНИИСТ. Москва, 2006.
2. Казаков А. А., Киселев Д. В., Андреева С. В. и др. Разработка методики количественной оценки микроструктурной полосчатости низколегированных трубных сталей с помощью автоматического анализа изображений // Черные металлы. 2007. № 7-8. С. 24.
3. Методика количественной оценки структурной полосчатости низколегированных трубных сталей с помощью автоматического анализа изображений ОАО ВНИИСТ. Москва, 2007.
4. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография. М.: Металлургия, 1970. — 376 с.
5. Прэнт У. К. Цифровая обработка изображений / Пер. с англ. М: Мир, 1982 (William K. Pratt. Digital Image Processing. — A Wiley. — Interscience Publication. John Wiley and Sons, 1978).
6. Малахов Н. В., Мотовилина Г. Д., Хлусова Е. И., Казаков А. А. Структурная неоднородность и методы ее снижения для повышения качества конструкционных сталей // Вопросы материаловедения. 2009. № 3(59). С. 52–64.