

лю последующего использования для оценки загрязненности неметаллическими включениями металла листового и рулонного проката, предназначенного для изготовления нефтепроводных труб.

4. Проведена аттестация программного обеспечения Thixomet PRO по результатам межлабораторных круговых измерений, выполненных в рамках очередного пересмотра стандарта ASTM E 1245-03. Относительная погрешность измерений объемной доли и площади включений для анализатора изображения Thixomet не превышает 7 и 6 % соответственно.

5. Сравнение результатов оценки, произведенной с помощью анализатора изображения, показало хорошую сходимость с результатами, полученными экспертами-металлографами.

6. Использование анализатора изображения для оценки загрязненности неметаллическими включениями низколегированных трубных сталей позволит значительно повысить объективность назначения балла. ЧМ

Библиографический список

1. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография. М.: Металлургия, 1970. — 376 с.
2. Underwood E. E. Quantitative Stereology, p. 274, Reading, MA: Adison-Wesley Publishing Company (1970).
3. Червяков А. Н. Металлографическое определение включений в стали. М.: Металлургиздат, 1962. — 248 с.

УДК

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ МИКРОСТРУКТУРНОЙ ПОЛОСЧАТОСТИ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ АВТОМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ

А. А. КАЗАКОВ, Д. В. КИСЕЛЕВ, С. В. АНДРЕЕВА, Л. С. ЧИГИНЦЕВ, С. В. ГОЛОВИН,
В. А. ЕГОРОВ, С. И. МАРКОВ*

Введение

Для оценки структуры сталей и сплавов в большинстве российских стандартов используются визуальные методы сравнения с помощью эталонных шкал. Аналогичные зарубежные стандарты, наряду с качественным описанием структуры, в том числе с помощью эталонов, часто содержат количественное описание параметров структуры, полученное с помощью стереологических измерений. Примером таких стандартов могут быть ГОСТ 5640–68 и ASTM E 1268.

Цель настоящей работы — разработка методики количественной оценки микроструктурной полосчатости низколегированных трубных сталей с помощью автоматического анализа изображений.

Методика предназначена для оценки микроструктурной полосчатости в листовом и рулонном прокате трубных сталей ферритобейнитного класса и сталей с тремя и более структурными составляющими с помощью баллов соответствующей шкалы, построенной по принципу возрастания количества полос второй фазы с учетом их сплошности и степени вытянутости ферритного зерна. Балл назначается на основе стереологических коэффициентов, найденных методом направленных секущих с помощью автоматического анализатора изображений.

Для простоты описания процедуры анализа изображений введем понятие «вторая фаза», под которой понимается собственно бейнит и другие продукты распада аустенита, отличные по цвету от феррита.

Полосчатость описывает характер взаимного расположения элементов структуры (феррита и второй фазы) низколегированных трубных сталей, точнее, степень разделения этих структурных составляющих на отдельные четко выраженные слои, образовавшиеся вытягиванием областей микросегрегации

* А. А. Казаков, Д. В. Киселев, С. В. Андреева, Л. С. Чигинцев, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет; С. В. Головин, В. А. Егоров, ООО «Институт ВНИИСТ»; С. И. Марков, ОАО «НПО ЦНИИТМАШ», Россия; kazakov@thixomet.ru.

вдоль оси деформации. На образование полосчатой структуры влияет металлургическая наследственность сляба, а именно: сегрегация примесей по его сечению, а также такие технологические факторы, как температура конца горячей деформации, степень обжата при горячей деформации и другие.

Микроструктурная полосчатость является следствием дендритной ликвации и зависит от состава стали, особенно углерода, скорости кристаллизации и режимов дальнейшей горячей обработки. Сегрегация, лежащая в основе микроструктурной полосчатости ограничена размерами дендритной ячейки, поэтому достаточно равномерно распределена по объему листа и может быть оценена стереологическими методами. Напротив, ликвационные полосы являются следствием зональной ликвации, наследуются от осевой химической неоднородности сляба и локализуются в центре листа, поэтому не подлежат оценке стереологическими методами.

Заметим, что в ГОСТ 5640–68 сравнение исследуемой микроструктуры стали с эталонами производится при увеличении $\times 100$. В современных трубных сталях, имеющих мелкое зерно (балл 11–14), вытянутость ферритного зерна часто приходится оценивать при увеличении $\times 500$ и более. Таким образом, анализ возможен только при последовательном исследовании образца при двух увеличениях. В рамках классической металлографии невозможно в окуляры микроскопа при увеличении $\times 500$ увидеть площадь, доступную для исследований при увеличении $\times 100$.

Классические металлографические исследования это всегда компромисс между изучаемой площадью и разрешением. Современные методы количественной металлографии с использованием анализатора изображения (в данной работе Thixomet PRO®, Россия) позволяет одновременно выполнить оценку полосчатости и вытянутости ферритного зерна, формируя панорамное изображение структуры большой площади и с высоким разрешением (см. предыдущие статьи раздела).

Анализ стереологических коэффициентов для оценки полосчатости структур

Для оценки полосчатости структур воспользуемся предложенными С. А. Салтыковым стереологическими коэффициентами [1], вычисление которых основано на методе направленных секущих:

1. $\bar{N}_{L\perp} / \bar{N}_{L\parallel}$, где $\bar{N}_{L\parallel}$ — среднее количество частиц второй фазы, пе-

ресеченных 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.

2. $\sigma_{NL\parallel} / \sigma_{NL\perp}$, где $\sigma_{NL\parallel}$ — среднее квадратичное отклонение количества частиц второй фазы, пересеченных секущими, параллельными оси деформации; $\sigma_{NL\perp}$ — среднее квадратичное отклонение количества частиц второй фазы, пересеченных секущими, перпендикулярными оси деформации.

3. $\sigma_{VL\parallel} / \sigma_{VL\perp}$, где $\sigma_{VL\parallel}$ — 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.

Проанализируем работоспособность этих коэффициентов на трех структурах, две из которых (рис. 1, а, б) заимствованы из книги С. А. Салтыкова [1], а третья (рис. 1, в) синтезирована из первой структуры (см. рис. 1, а). Синтезированная структура получена перераспределением второй фазы в феррите так, что полосчатость исходной структуры значительно снижена, а анизотропия отдельных зерен второй фазы осталась прежней.

Коэффициент $\bar{N}_{L\perp} / \bar{N}_{L\parallel}$, названный в стандарте ASTM E 1268 коэффициентом анизотропии, на самом деле описывает лишь вытянутость отдельных ее элементов (феррита или второй фазы) вдоль оси деформации и не отражает ни ориентировки структуры

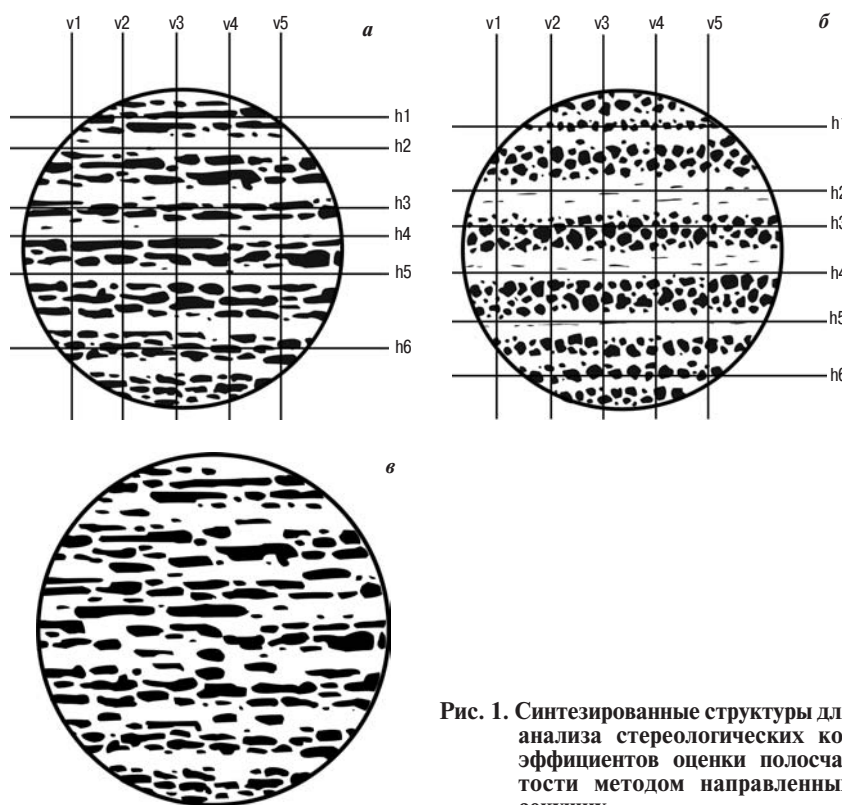


Рис. 1. Синтезированные структуры для анализа стереологических коэффициентов оценки полосчатости методом направленных секущих

в целом, ни объединения отдельных элементов структуры в полосы.

Ориентировка может выражаться некоторой общей направленностью структуры вдоль линии прокатки без ее разделения на четкие слои, для описания общей направленности служит коэффициент $\sigma_{V_{L\parallel}}/\sigma_{V_{L\perp}}$, анализ которого будет рассмотрен далее.

Покажем, что коэффициент $\bar{N}_{L\perp}/\bar{N}_{L\parallel}$ может быть использован для оценки вытянутости частиц второй фазы вдоль оси деформации и не отражает характера взаимного расположения элементов структуры, поэтому не способен описать ее полосчатость. Для этого сравним структуры 1 (см. рис. 1, а) и 3 (см. рис. 1, в), которые имеют примерно одинаковые значения коэффициента $\bar{N}_{L\perp}/\bar{N}_{L\parallel} = 3,21$ и $3,30$. Однако они абсолютно различные с точки зрения полосчатости: структура 3 имеет достаточно равномерное распределение частиц второй фазы, а структура 1 отличается значительной полосчатостью. Напротив, структура 2 (см. рис. 1, б) имеет более низкое значение коэффициента $\bar{N}_{L\perp}/\bar{N}_{L\parallel}$, чем структура 3 (1,25 против 3,30), но явно выраженную полосчатость.

Как и предполагалось ранее, коэффициент $\bar{N}_{L\perp}/\bar{N}_{L\parallel}$ характеризует только вытянутость частиц второй фазы, которая практически одинакова у структур 1 и 3 и значительно меньше у структуры 2, состоящей из равноосных частиц второй фазы.

Приведенный анализ подтверждает, что невозможно описать полосчатость структуры, используя для этого коэффициент $\bar{N}_{L\perp}/\bar{N}_{L\parallel}$, названный в ASTM E 1268-01 в качестве параметра анизотропии (рис. 2). Действительно, в американском стандарте полосчатость структуры характеризуется только ее словесным описанием.

Полосчатость описывает характер взаимного расположения элементов структуры (феррита или второй фазы), точнее, степень разделения этих структурных составляющих на отдельные слои, ориенти-

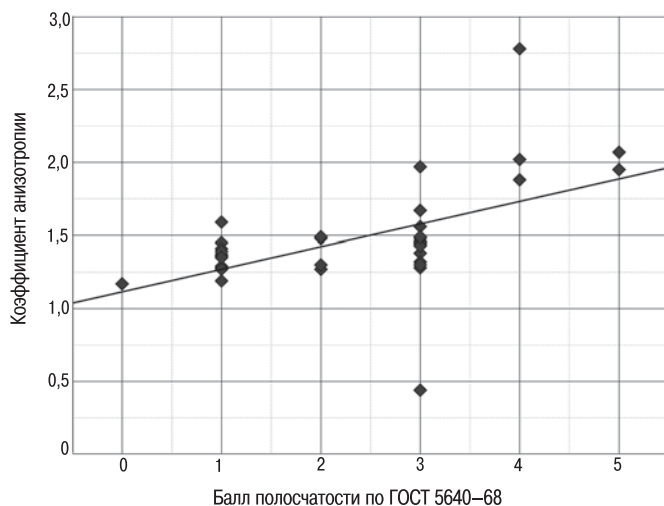


Рис. 2. Параметр анизотропии, рассчитанный для микроструктур с разным баллом по ГОСТ 5640-68

рованные вдоль оси деформации, поэтому только критерии $\sigma_{NL\parallel}/\sigma_{NL\perp}$ и $\sigma_{VL\parallel}/\sigma_{VL\perp}$, характеризующие отклонения от среднего, соответственно, количества пересечений и доли второй фазы при измерениях вдоль и поперек оси деформации могут быть рассмотрены как возможные коэффициенты полосчатости.

Рассмотрим коэффициент $\sigma_{NL\parallel}/\sigma_{NL\perp}$.

На рис. 1, б показано полосчатое расположение равноосных частиц второй фазы. Количество пересечений с секущими, параллельными оси деформации, колеблется от значения близких к нулю на секущих, проходящих по полосам феррита (h2, h4, h5), до больших значений на секущих, проходящих по зернам второй фазы (h1, h3, h6), т. е. среднее квадратичное отклонение на секущих, направленных вдоль оси деформации, будет велико. Напротив, количество пересечений с секущими, перпендикулярными оси деформации, будет примерно одинаковым на всех секущих (v1, v2, v3, v4, v5), потому среднее квадратичное отклонение будет мало. В этом случае получается большое значение коэффициента $\sigma_{NL\parallel}/\sigma_{NL\perp}$, характеризующее эту структуру как полосчатую. Коэффициент $\sigma_{NL\parallel}/\sigma_{NL\perp}$ будет приближаться к 1 для структур с однородным расположением частиц второй фазы и увеличиваться при неравномерном их расположении на секущих, направленных вдоль оси деформации. Анализ показал, что коэффициент $\sigma_{NL\parallel}/\sigma_{NL\perp}$ дает хорошие результаты в оценке полосчатости, если частицы второй фазы равноосные. В случае вытянутых частиц количество пересечений по обеим осям вдоль и поперек оси деформации будет колебаться незначительно, поэтому чувствительность коэффициента $\sigma_{NL\parallel}/\sigma_{NL\perp}$ для оценки полосчатости на таких структурах будет заметно хуже, чем на структурах с равноосными частицами второй фазы. Например, структура 1 (см. рис. 1, а) с вытянутыми частицами второй фазы, как и структура 2 (см. рис. 1, б) с равноосными частицами второй фазы имеет ярко выраженную полосчатость, однако ее коэффициент $\sigma_{NL\parallel}/\sigma_{NL\perp}$ вдвое меньше. У структуры 3 (см. рис. 1, в) коэффициент $\sigma_{NL\parallel}/\sigma_{NL\perp} = 1$, однако ее трудно назвать изотропной.

Учитывая приведенный выше анализ, можно предположить, что только коэффициент $\sigma_{VL\parallel}/\sigma_{VL\perp}$, основанный на измерениях доли второй фазы на направленных секущих вдоль и поперек оси деформации, будет однозначно характеризовать полосчатость структуры вне зависимости от морфологии частиц второй фазы. Действительно, этот коэффициент закономерно снижается от структуры 1 к структуре 3: 6,73; 4,32; 3,72. При проверке работы коэффициента на фотоэталонах ГОСТ 5640-68 получили следующие результаты: $\sigma_{VL\parallel}/\sigma_{VL\perp} = 1,3$; 1,62; 2,58; 2,82; 3,17 и 4,25 соответственно для баллов 0, 1, 2, 3, 4 и 5.

Таким образом, коэффициент $\sigma_{VL\parallel}/\sigma_{VL\perp}$ является единственным из известных, который адекватно

описывает полосчатость второй фазы и не зависит от вытянутости составляющих этой фазы вдоль оси деформации. Назовем его коэффициентом полосчатости.

Таким образом, методика расчета коэффициентов полосчатости и анизотропии основана на статистически точных математических соотношениях, известных из стереологии и реализованных в автоматических анализаторах изображений.

Древо решений для назначения балла

Рассчитанные коэффициенты полосчатости и анизотропии могут быть использованы для оценки структурной полосчатости баллами соответствующих шкал, построенных по принципу возрастания количества полос второй фазы с учетом их сплошности и степени вытянутости ферритного зерна. Эти шкалы соответствуют словесному описанию и фотоэталонам, разработанным ранее [2].

Древо решений, используемое при назначении балла, представлено на рис. 3.

За основу выбран коэффициент полосчатости, предельные значения которого возрастают от нулевого балла ($\sigma_{VL\parallel}/\sigma_{VL\perp} < k_1$) до пятого ($\sigma_{VL\parallel}/\sigma_{VL\perp} \geq k_5$).

В структурах, соответствующих баллу 0 и части балла 1, полосчатость и общая направленность структуры отсутствуют, поэтому они объединены одним и тем же предельным значением коэффициента $\sigma_{VL\parallel}/\sigma_{VL\perp} < k_1$.

Если в таких структурах имеется вытянутость второй фазы вдоль линии прокатки ($\bar{N}_{L\perp} / \bar{N}_{L\parallel} (2) \geq k_6$), то они относятся к баллу 1 (рис. 4, структура со звездочкой). Другим признаком балла 1 служит общая направленность структуры в целом при отсутствии полос — $k_2 > \sigma_{VL\parallel}/\sigma_{VL\perp} \geq k_1$.

Структуры, соответствующие баллам 2–5, отли-

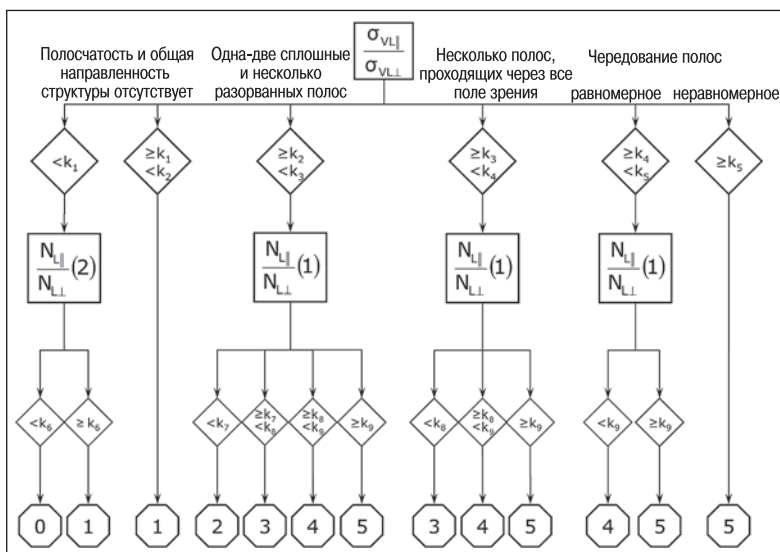


Рис. 3. Древо решений для назначения балла полосчатости

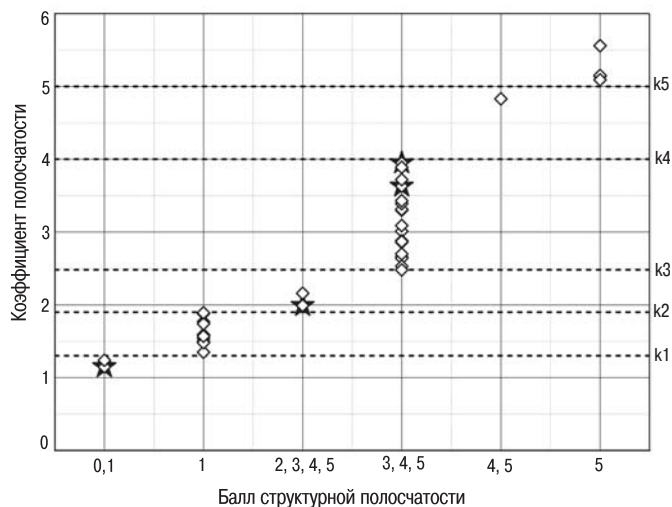


Рис. 4. Результаты распознавания реальных микроструктур с использованием коэффициента полосчатости

чаются друг от друга коэффициентом полосчатости, что выражается следующими неравенствами:

$k_3 > \sigma_{VL\parallel}/\sigma_{VL\perp} \geq k_2$ — одна-две сплошные и несколько разорванных полос (балл 2);

$k_4 > \sigma_{VL\parallel}/\sigma_{VL\perp} \geq k_3$ — несколько полос, проходящих через все поле зрения (балл 3);

$k_5 > \sigma_{VL\parallel}/\sigma_{VL\perp} \geq k_4$ — равномерное чередование полос (балл 4);

$\sigma_{VL\parallel}/\sigma_{VL\perp} \geq k_5$ — неравномерное чередование полос (балл 5).

На рис. 4 показаны результаты работы алгоритма по распознаванию реальных структур в соответствии с вышеописанным алгоритмом. После оценки структуры по коэффициенту полосчатости следует проверить анизотропию ферритного зерна. Предельная доля вытянутого ферритного зерна, оцененная соответствующим значением коэффициента анизотропии $\bar{N}_{L\perp} / \bar{N}_{L\parallel} (1)$, повышается от k_7 для балла 2 до k_9 для балла 4. Изменение коэффициента анизотропии ферритного зерна от доли вытянутых зерен в исследуемой структуре в зависимости от вытянутости единичного зерна представлено на рис. 5.

Переназначение балла производят в том случае, если в исследуемой структуре коэффициент анизотропии ферритного зерна превышает предельное значение, допустимое для соответствующего балла (см. структуры на рис. 4 со звездочками):

$$k_8 > \frac{\bar{N}_{L\perp}}{\bar{N}_{L\parallel}} (1) \geq k_7 \text{ — балл 3;}$$

$$k_9 > \frac{\bar{N}_{L\perp}}{\bar{N}_{L\parallel}} (1) \geq k_8 \text{ — балл 4;}$$

$$\frac{N_{L\perp}}{N_{L\parallel}} (1) \geq k9 \text{ — балл 5.}$$

Предельные значения коэффициентов полосчатости, а также анизотропии ферритного зерна и второй фазы для соответствующих баллов от нулевого до пятого получены методом экспертных оценок.

Подготовка образцов к исследованиям

Отбор производился в соответствии с ГОСТ 5640–68. Для выявления микроструктуры применяли реактив Маршалла, состоящий из двух частей: часть А — 5мл концентрированной H_2SO_4 + 8 г кристаллов шавелевой кислоты + 100 мл H_2O ; часть В — 30%-ный раствор перекиси водорода H_2O_2 . Эти части перемешиваются в соотношении А : В = 1 : 1 непосредственно перед травлением. Реактив наносили на поверхность шлифа, протирая ее ватным тампоном в течение нескольких секунд. После этого остатки реактива и продукты взаимодействия смывали потоком воды и просушивали. Использование свежеприготовленного реактива допускается только в течение одного рабочего дня. Данная методика обеспечивает надежный и воспроизводимый результат травления границ ферритного зерна наряду с травлением карбидов (цементита) второй фазы на образцах с разной структурой, в том числе с различной степенью деформации ферритного зерна. После такого травления распознавание структуры с помощью анализатора изображений не представляет затруднений.

Реализация методики с помощью анализатора изображений Thixomet PRO

Разработанная методика реализована в анализаторе изображения Thixomet PRO и в настоящее время проходит апробацию на трубных заводах и в научно-исследовательских институтах с целью последующего использования для оценки полосчатости в основном металле листового и рулонного проката, предназначенного для изготовления нефтепроводных труб.

Весь цикл измерений состоит из следующих действий:

визуальный поиск участка шлифа с наибольшим баллом через окуляры микроскопа при увеличении $\times 100$ и установка объектива с более высоким увеличением;

изготовление панорамы участка шлифа с наибольшим баллом, найденным при визуальном поиске;

детектирование второй фазы и границ ферритного зерна;

тонкая настройка распознавания границ второй фазы и ферритного зерна;

расчет коэффициентов полосчатости и коэффициентов анизотропии;

назначение балла полосчатости в соответствии с древом решений.

Далее вновь устанавливается объектив с увеличением $\times 10$, предметный столик микроскопа переводится на следующий участок шлифа с максимальным баллом и вышеприведенный цикл измерений при повышенном увеличении микроскопа повторяется. При нахождении в трех местах образца, характеризующих наибольшую структурную полосчатость, одинакового значения максимального балла, измерения прекращаются и назначается установленный в этих трех местах балл полосчатости исследуемого образца.

Поиск максимального балла, встречающегося не менее чем в трех участках шлифа, производится оператором визуально в окулярах микроскопа при увеличении $\times 100$. Для правильной идентификации второй фазы и границ ферритного зерна измерения проводят при увеличении в 4–5 раз большем, чем $\times 100$. В результате программное обеспечение позволяет построить квадратную или прямоугольную панораму площадью не менее $0,5 \text{ мм}^2$ на участках шлифа с максимальным баллом.

Шлиф устанавливают на предметном столике так, чтобы направление линии прокатки на экране монитора было горизонтальным. В противном случае это направление следует задать с помощью специального инструмента, имеющегося в анализаторе изображений. При задании линии прокатки необходимо учитывать направление полос или вытянутость отдельных элементов структуры для структур, не содержащих полос.

Если на панораме имеются «растравы» вокруг неметаллических включений или другие дефекты подготовки поверхности шлифа, не относящиеся к полосчатости структуры, то допускается их вырез из панорамы с помощью специального инструмента, имеющегося в анализаторе изображений. При этом оставшаяся для измерений площадь панорамы не должна быть меньше $0,5 \text{ мм}^2$.

Для точной установки порога дискриминации, позволяющей правильно распознать структуру, следует использовать фликер-метод, состоящий в попеременном переключении между реальным и распознанным изображением с детектированной второй фазой и границами ферритных зерен. При этом допускаются такие настройки, при которых вторая фаза детектируется наилучшим образом даже при частичном окрашивании границ ферритного зерна. Алгоритм распознавания учитывает возможность такого окрашивания и не принимает во внимание частично окрашенные границы ферритного зерна при распознавании границ второй фазы. Анализатор изображения может работать с несколькими порогами дискриминации для одновременного разделя-

го детектирования в одном и том же поле зрения второй фазы и границ ферритных зерен.

Погрешность измерений

Неправильно вырезанный образец приводит к отклонению плоскости шлифа от оси деформации и к ошибкам измерений. Следует исключать разориентировки более чем на 5 град.

Для классификации структур между баллами 0 и 1 используется коэффициент анизотропии второй фазы $\bar{N}_{\perp\perp} / \bar{N}_{\parallel\parallel}$ (2), правильность определения которого зависит от того, насколько верно установлены пороги диапазонов дискриминации при детектировании второй фазы на гистограмме по градиентам серого. Например, при передетектировании второй фазы из-за слияния соседних частиц вытянутость увеличивается, что может привести к назначению завышенного балла.

Для правильной оценки коэффициента анизотропии $\bar{N}_{\perp\perp} / \bar{N}_{\parallel\parallel}$ (2) необходимо точно указать направление линии прокатки, при этом для анализа рекомендуется выбирать такие места на шлифе, где направление полос сохраняет плоскопараллельный характер на всей исследуемой панораме. Необходимо избегать оценки расходящихся или сходящихся полос.

Для оценки доли деформированных зерен в ферритных полосах используется коэффициент анизотропии ферритного зерна $\bar{N}_{\perp\perp} / \bar{N}_{\parallel\parallel}$ (1). Правильность его расчета определяется тем, насколько верно распознаны границы ферритного зерна, что зависит от соответствующих установок порогов дискриминации, а также настроек алгоритма восстановления плохо протравленных границ. Следует использовать такие установки вышеназванных инструментов анализа изображений, при которых большинство плохо протравленных границ ферритного зерна восстановлено и распознано, но при этом не появились артефакты, приводящие к необоснованному искусственному делению зерен.

Метрологические характеристики, полученные при использовании анализатора изображения Thixomet PRO, оцененные относительной погрешностью измерений соответствующих коэффициентов при доверительной вероятности $P = 0,95$, имеют следующие значения:

для полосчатости	не более 8 %,
для анизотропии второй фазы	не более 2 %,
для анизотропии ферритного зерна	не более 2 %.

Эти характеристики получены оценкой 60 различных структур, относящихся к разным баллам структурной полосчатости, при всех возможных сочетаниях параметров настройки методики: установок порогов дискриминации второй фазы и границ ферритного зерна, настроек алгоритма восстановле-

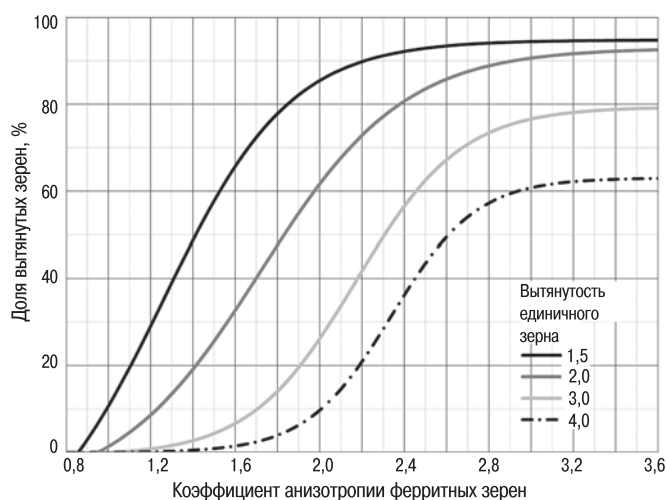


Рис. 5. Влияние доли вытянутых зерен на коэффициент анизотропии ферритных зерен (для разных определений «вытянутого зерна»)

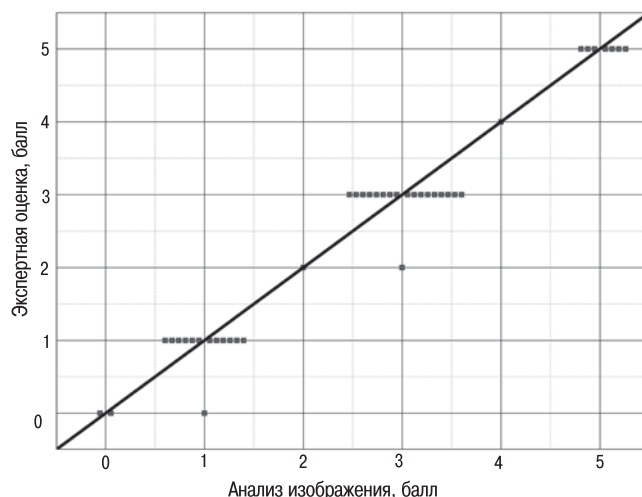


Рис. 6. Результаты сличения балла полосчатости, полученного анализатором изображения Thixomet PRO и методом экспертных оценок

ния плохо протравленных границ и наклона линии прокатки.

Результаты сличения балла полосчатости, полученного методом экспертных оценок, и результатов измерений, выполненных с помощью анализатора изображения Thixomet PRO, показывают их хорошую сходимость (рис. 6). Внешний вид интерфейса анализатора изображения Thixomet при оценке микроструктурной полосчатости представлен на рис. 7.

Выводы

1. Показано, что ни один из используемых в ASTM E 1268 и заимствованных из работ С. А. Салтыкова стереологических коэффициентов структуры не может описать ее микроструктурную полосчатость; в американском стандарте полосчатость описывается словесно.

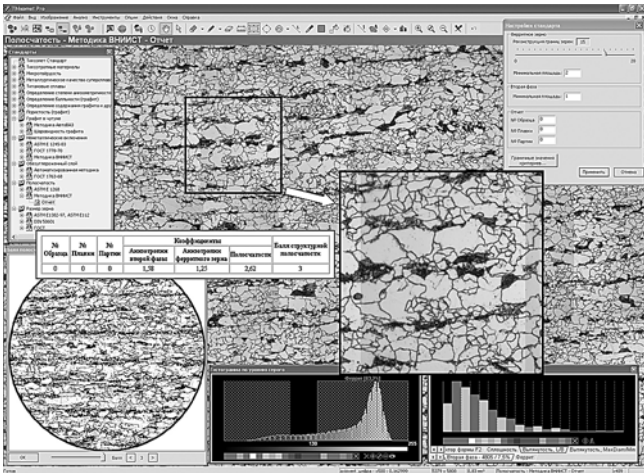


Рис. 7. Внешний вид интерфейса программного обеспечения Thixomet PRO при оценке полосчатости

2. Проведен критический анализ известных из работ С. А. Салтыкова стереологических коэффициентов, полезных для оценки полосчатости структур. Выбран параметр $\sigma_{VL\parallel}/\sigma_{VL\perp}$, названный коэффициентом полосчатости и адекватно описывающий микроструктурную полосчатость стали.

3. Разработана и реализована в виде самостоятельного модуля анализатора изображения Thixomet методика определения микроструктурной полосчатости с помощью баллов соответствующей шкалы,

построенной по принципу возрастания количества полос второй фазы с учетом их сплошности и степени вытянутости ферритного зерна. Балл назначается на основе стереологических коэффициентов, найденных методом направленных секущих при панорамных исследованиях с помощью автоматического анализатора изображений.

4. Относительная погрешность измерений коэффициентов полосчатости, анизотропии второй фазы и анизотропии ферритного зерна, на основе которых назначается балл структурной полосчатости, не превышает, соответственно, 8, 2 и 2 %.

5. Сравнение результатов оценки полосчатости, произведенной с помощью анализатора изображения, показало хорошую сходимость с результатами, полученными экспертами-металлографами. Использование анализатора изображения для оценки качества структуры низколегированных трубных сталей позволит значительно повысить объективность назначения балла микроструктурной полосчатости. **ЧМ**

Библиографический список

1. С. А. Салтыков. Стереометрическая металлография. М.: Металлургия, 1970. — 376 с.
2. Методика оценки структурной полосчатости низколегированных трубных сталей с помощью эталонных шкал. ОАО ВНИИСТ, Москва, 2006 г.

Новые разработки

УДК 621.774.72

О ДВУХ ТЕХНОЛОГИЯХ РЕДУЦИРОВАНИЯ ТРУБ С УТОНЕНИЕМ СТЕНКИ

Ф. Д. ДАВИДОВ

В настоящее время существуют две технологии производства труб редуцированием с утонением стенки: традиционная, которая применяется с 1955 г. [1–3], более полувека во всем мире, и новая технология, разработанная и экспериментально подтвержденная в 2001–2003 гг. [4–7].

Первая технология основана на применении натяжения трубы между смежными клетями редуционного стана, вторая — на общем и частных решениях объемной деформационной задачи прокатки трубы в закрытых калибрах любой формы [8].

Принципиальная разница между этими технологиями заключается в следующем.

Утонение стенки трубы при традиционной технологии осуществляется внешним воздействием, каким является натяжение трубы. В условиях непрерывной безоправочной прокатки труб единственным источником внешнего воздействия, обуславливающим натяжение трубы между смежными клетями, может быть только превышение скорости входа трубы в последующую клеть над скоростью выхода трубы из предыдущей клетки.