

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ С ПОМОЩЬЮ АВТОМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ

*А. А. КАЗАКОВ, Д. В. КИСЕЛЕВ, С. В. АНДРЕЕВА, А. А. МЯСНИКОВ, С. В. ГОЛОВИН, В. А. ЕГОРОВ**

Введение

Автор работы «Стандартная методика определения содержания включений или второй фазовой составляющей в металлах посредством автоматического анализа изображений» (ASTM E 1245-03), Джордж Ф. Вандер Вурт не без оснований с огромным интересом и признанием относится к С. А. Салтыкову, коллекционируя его книги и мечтая перевести их на английский, чтобы издать в США. Именно С. А. Салтыковым, работавшим в Ереванском политехническом институте, впервые в мире в середине прошлого века была создана наука о количественной интерпретации трехмерной структуры материалов на основе обработки информации, полученной на двумерных изображениях, — стереология. В 1970 г. С. А. Салтыков опубликовал уже третью редакцию своей книги «Стереометрическая металлография» [1], когда на Западе вышла первая в области количественной металлографии книга профессора Технического университета в Атланте (США, шт. Джорджия) Ирвина Андервуда [2].

Несмотря на такой значительный приоритет в теории, на сегодняшний день Россия существенно отстает от передовых стран Запада в описании структуры материалов с использованием количественной металлографии. Такое отставание создает проблемы несовместимости отечественных и зарубежных стандартов и отрицательно отражается на объективности оценки качества структуры материалов при входном и выходном контроле на внутреннем российском рынке. К сожалению, в настоящее время в России нет ни одного отечественного стандарта, регламен-

тирующего качество структуры материалов и основанного на стереологических измерениях с помощью автоматического анализа изображений. Для оценки структуры сталей и сплавов в большинстве российских стандартов используются визуальные методы сравнения с помощью эталонных шкал. В этом смысле ГОСТ 1778–70 «Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений» является классическим примером такого стандарта, где, как, например, в методе Шб, используется визуальная оценка сравнением наиболее загрязненного неметаллическими включениями поля зрения диаметром 1,2 мм с соответствующими эталонными шкалами.

Целью настоящей работы является разработка методики количественной оценки загрязненности низколегированных трубных сталей неметаллическими включениями баллами, эквивалентными баллам ГОСТ 1778–70, с помощью автоматического анализа изображений.

Методика предназначена для оценки загрязненности неметаллическими включениями листового и рулонного проката, используемого для производства нефтепроводных труб, а также для контроля качества труб и деталей трубопроводов в процессе их изготовления и последующей эксплуатации. Она описывает процедуру стереологических измерений, результатом которых является полученный с помощью автоматического анализа изображений балл, эквивалентный баллу ГОСТ 1778–70, и балл, назначенный с помощью измеренных значений объемного содержания с учетом максимального размера неметаллических включений, обнаруженных на поле с максимальной загрязненностью.

В ГОСТ 1778–70 сравнение с эталонными шкалами производится при увеличении $\times 100$. Поскольку при таком увеличении трудно или невозможно отличить оксиды от сульфидов, а также определить их

* А. А. Казаков, Д. В. Киселев, С. В. Андреева, А. А. Мясников, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет; С. В. Головин, В. А. Егоров, ООО «Институт ВНИИСТ», Россия; kazakov@thixomet.ru.

точные метрические характеристики, то для исследования неметаллических включений в стали, как и рекомендуется в ASTM E 1245, следует использовать более высокие увеличения вплоть до $\times 500$ и выше. Иными словами, чтобы «взглянуть» на ГОСТ 1778–70 «глазами» ASTM E 1245, следует иметь высокое разрешение, соответствующее увеличению $\times 500$, но при этом оценивать поле зрения, видимое в окуляры микроскопа при увеличении $\times 100$. Это задача неразрешима в рамках классической металлографии, так как в микроскоп невозможно увидеть большую площадь с хорошим разрешением. Современные методы количественной металлографии с использованием анализатора изображения Thixomet PRO[®] позволяют проводить измерения при высоком увеличении (например, $\times 500$), а необходимую площадь, соответствующую размеру поля зрения, видимого в окуляры микроскопа при увеличении $\times 100$, собрать последовательной прецизионной склейкой «на лету» смежных полей зрения. Таким образом можно получить панорамное изображение структуры сколь угодно большой площади и с высоким разрешением.

Разделение включений по типам

Исследования, выполненные с помощью термодинамического моделирования и микрорентгеноспектрального анализа, показали, что основными продуктами раскисления трубных сталей являются алюминаты кальция различного состава (от гексаалюминатов до эквимольных соединений $Al_2O_3 \cdot CaO$), соединения на основе герцинита $Al_2O_3 \cdot FeO$, магнезиальная шпинель $Al_2O_3 \cdot MgO$ и другие. Такие разнообразные по составу включения имеют весьма схожие внешние признаки с силикатами недеформирующимися (СП) и силикатами хрупкими (СХ), силикатами пластичными (СП) или оксидами строчечными (ОС). Поэтому, основываясь только на внешнем сходстве, а не на составе, будет выполнена оценка вышеперечисленных неметаллических включений — продуктов раскисления трубных сталей алюминием и силикокальцием в соответствии с типами включений, которые предусмотрены ГОСТ 1778–70. Описание алгоритма идентификации включений различных типов, основанного на их разных внешних признаках, приведено ниже.

Оценку эталонных шкал ГОСТ 1778–70 с помощью стереологических измерений, предусмотренных ASTM E 1245, проводят измерением на сканированных копиях изображений этих шкал объемного процента неметаллических включений в поле зрения эталона, а также их количество в поле зрения, метрические характеристики и характер взаимного расположения. Полученные данные используют для разделения включений по типам, предусмотренным ГОСТ.

Вначале, сравнивая включения между собой по уровню серого и с нетравленной матрицей, отделяют

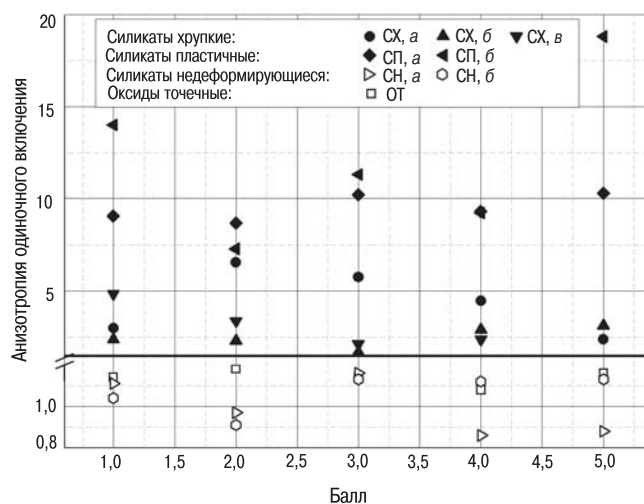


Рис. 1. Выделение строчечных включений по анизотропии отдельного включения

сульфиды от включений кислородной группы, отнеся к последним все кислородсодержащие включения (оксиды и силикаты). Это разделение проводят, подобрав соответствующие диапазоны порогов дискриминации для сульфидов и включений кислородной группы. Затем включения кислородной группы следует разделить по типам.

Из всех включений выделяют все строчечные включения, объединив их в группы по характеру взаимного расположения отдельных включений с учетом вытянутости группы включений в строчке. При соединяя к этим включениям другие, теперь уже единичные строчечные включения (силикаты хрупкие и силикаты пластичные), их выделяют по признаку анизотропии отдельных включений (рис. 1). Все эти включения единичные и объединенные в группы оцениваются вместе как строчечные включения.

Из оставшихся включений выделяют крупные включения размером более 30 мкм (рис. 2) или мелкие, но такие, которых в поле зрения не более 8 штук (рис. 3). Эти включения отнесем к силикатам недеформирующимся, тогда остальные включения будут оксидами точечными.

Максимальный размер силикатов недеформирующихся (шкала б) для баллов 1–2 практически совпадает с размером оксидов точечных выше балла 3. Эти включения могут быть разделены только по их количеству в поле зрения, если они встречаются на шлифе отдельно. Если в одном поле зрения присутствуют и силикаты недеформирующиеся балла 1–2 и оксиды точечные балла 4–5, то разделить их невозможно, и все они будут оценены как оксиды точечные. Аналогичные проблемы имеются и при визуальном сравнении с эталонными шкалами, так как различить силикаты недеформирующиеся и оксиды точечные, имеющие одинаковый размер, практически невозможно.

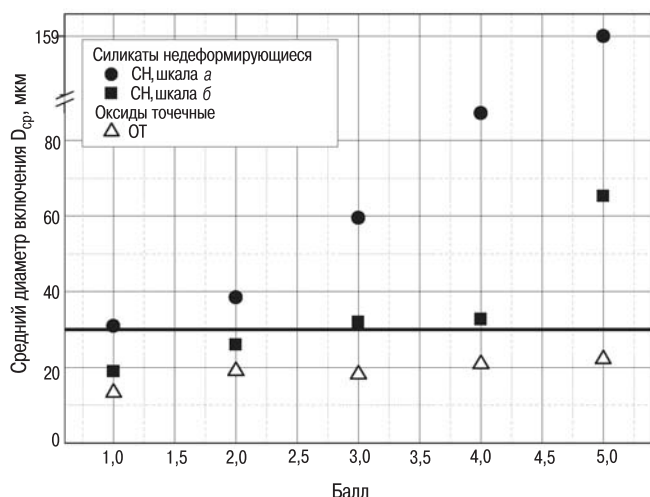


Рис. 2. Разделение силикатов недеформирующихся и оксидов точечных по их размеру (для балла 3–5)

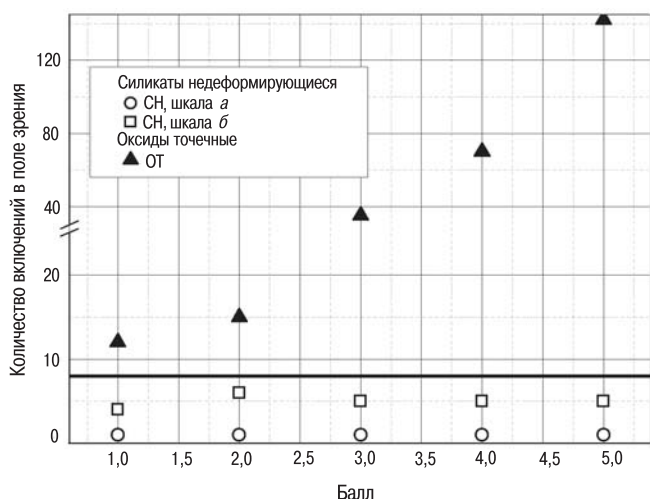


Рис. 3. Разделение силикатов недеформирующихся и оксидов точечных по их количеству в поле зрения (для балла 1–2)

Таким образом, разделяют все включения в соответствии с требованиями ГОСТ. Следующий этап — назначение балла на основе стереологических измерений объемного процента включений и максимального размера для каждого из найденных типов неметаллических включений.

Градуировочные кривые для назначения балла

Для того чтобы определить градуировочную кривую, связывающую баллы ГОСТ 1778–70 с объемным процентом включений по ASTM E 1245, рассмотрим зависимости, построенные на основе результатов «оцифровки» сканированных копий эталонных шкал, принимая во внимание зависимости, положенные в основу создания этих шкал [3].

Для силикатов недеформирующихся диаметр единичных включений, согласно теории, заложен-

ной в создание эталонов, равен 20, 25, 35, 55 и 90 мкм для баллов 1, 2, 3, 4 и 5 соответственно [3], откуда можно рассчитать объемный процент включений в поле зрения диаметром 800 мкм. Эта зависимость, приведенная на рис. 4, описывает только шкалу а. Тем не менее оставим эту кривую в качестве градуировочной, так как в заводской практике часто для назначения балла вместо стандартной шкалы используют прямые измерения диаметра включений.

Для всех остальных типов включений в соответствии с зависимостями, положенными в основу создания эталонных шкал, суммарная площадь всех включений в поле зрения должна возрастать от балла к баллу в геометрической прогрессии со знаменателем, равным 2.

Введем следующие обозначения:

A_j — площадь j -го включения в поле зрения, мкм²;

N — число включений в поле зрения;

B — балл, эквивалентный баллу ГОСТ 1778–70;

V_v — объемная доля включений в поле зрения;

d — диаметр поля зрения (1,2 мм для метода ШБ ГОСТ 1778–70);

A_{\max} — площадь включения максимального размера.

Тогда общий член геометрической прогрессии с первым членом $0,5 \cdot 10^{-3}$ мм² для сульфидов будет равен

$$\sum_{j=1}^N A_j = 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 2^{B-1}. \quad (1)$$

С учетом того, что

$$\sum_{j=1}^N A_j = V_v \frac{\pi d^2}{4},$$

получаем следующую формулу пересчета объемного процента сульфидов в соответствующий балл, эквивалентный баллу ГОСТ 1778–70:

$$B = 1 + \log_2 \frac{V_v \pi d^2}{0,2}. \quad (2)$$

Как следует из рис. 4, теоретическая кривая, построенная по уравнению (2), неудовлетворительно описывает точки, полученные при «оцифровке» эталонных шкал сульфидов, особенно для баллов 3 и 4. Найдем такую функцию, которая наилучшим образом описывает эти экспериментальные точки и будем ее использовать для расчета балла:

$$B = 0,94 \ln \frac{V_v - 0,09}{0,108}. \quad (3)$$

Для всех строчечных включений и включений типа «оксиды точечные» формула общего члена геомет-

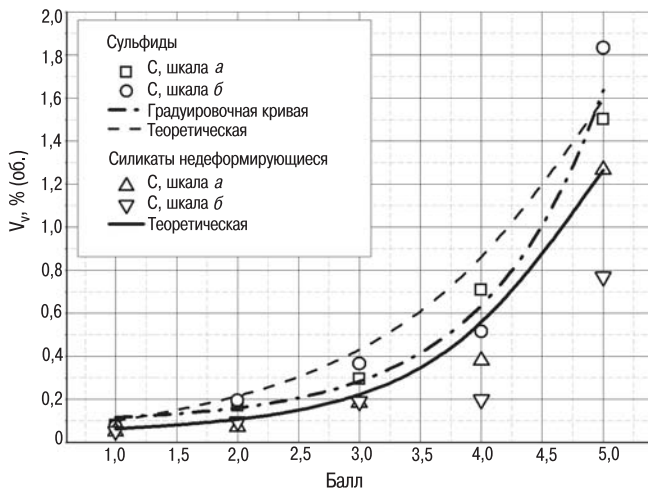


Рис. 4. К обоснованию градуировочной кривой для назначения балла по сульфидам и силикатам недеформирующимся (на основе объемного процента)

рической прогрессии с первым членом $0,27 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^2$ будет равна

$$\sum_{j=1}^N A_j = 0,27 \cdot 10^{-3} \cdot 2^{B-1}. \quad (4)$$

Отсюда получаем:

$$B = 1 + \log_2 \frac{V_v \pi d^2}{0,108}. \quad (5)$$

Из рис. 5 следует, что теоретическая кривая проходит лишь по нижней, границе экспериментальных точек. Поэтому найдем кривую, которая наилучшим образом описывает все точки «оцифрованных» эталонных шкал и будем ее использовать для расчета балла:

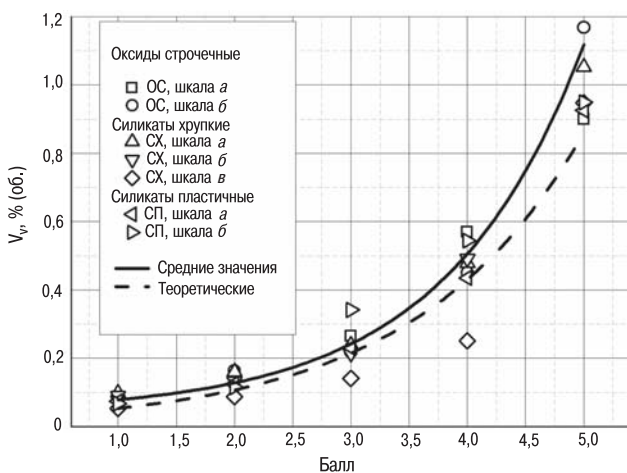


Рис. 5. К обоснованию градуировочной кривой для назначения балла по силикатам хрупким, силикатам пластичным и оксидам строчечным (на основе объемного процента)

$$B = 1,2 \ln \frac{V_v - 0,04}{0,107}. \quad (6)$$

Известно, что причиной разрушения металла может стать не только и не столько содержание, сколько максимальный размер отдельных неметаллических включений. В большинстве эталонных шкал ГОСТ максимальный размер значительно увеличивается с увеличением балла (рис. 6, 7). Для учета этого обстоятельства при назначении балла, введем проверку соответствия назначенного по объемному содержанию балла предельной максимальной площади включений, предусмотренной для этого балла.

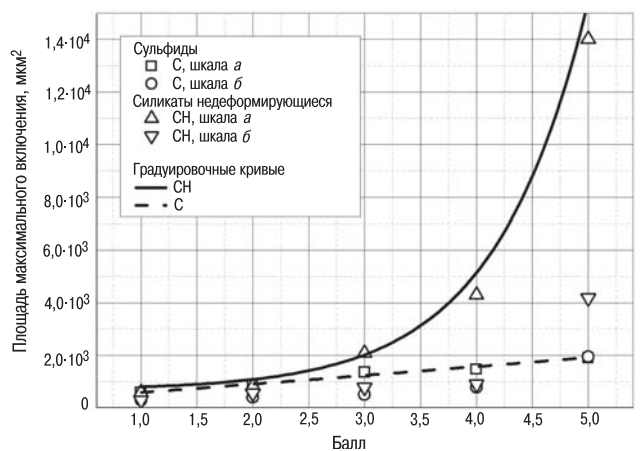


Рис. 6. К обоснованию градуировочной кривой для назначения балла по сульфидам и силикатам недеформирующимся (на основе максимальной площади единичных включений)

Для силикатов недеформирующихся и сульфидов кривые предельной максимальной площади единичных включений рассчитываются, соответственно, по следующим уравнениям (см. рис. 6):

$$B = 37 \cdot \exp \frac{A_{\text{макс}}}{0,83} + 673, \quad (7)$$

$$B = 329 A_{\text{макс}} + 267. \quad (8)$$

Для силикатов хрупких и силикатов пластичных кривая предельной максимальной площади единичного включения (см. рис. 7) рассчитывается по уравнению:

$$B = 156 \cdot \exp \frac{A_{\text{макс}}}{0,83} + 657. \quad (9)$$

При переназначении балла по максимальной площади единичного включения не нужно принимать во внимание оксиды точечные и оксиды строчечные, так как эти включения слишком малы и равномерно распределены по полю зрения, чтобы стать причиной разрушения.

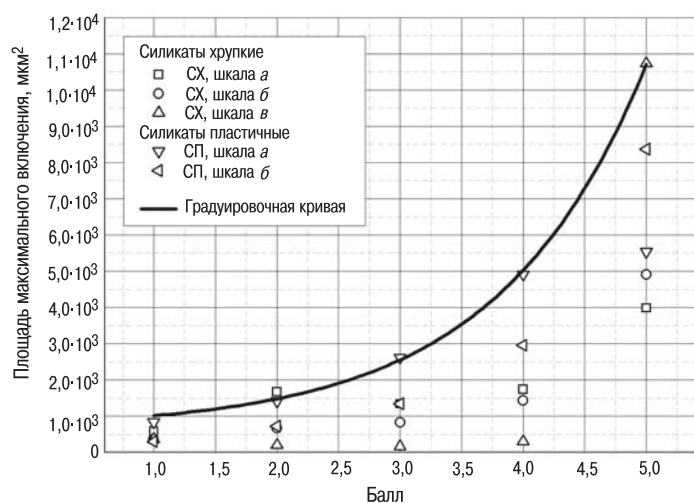


Рис. 7. К обоснованию градуировочной кривой для назначения балла по силикатам хрупким и силикатам пластичным (на основе максимальной площади единичных включений)

Таким образом, на основе результатов стереологических измерений объемного процента и размера включений, используемых в ASTM E 1245-03, можно объективно назначать балл по ГОСТ 1778–70, при этом измерения следует проводить на площади поля зрения, оговоренной ГОСТ, но с разрешением, оговоренным ASTM.

Подготовка образцов к измерениям

Отбор проб производят в соответствии с ГОСТ 1778–70. При этом площадь поверхности образцов должна обеспечивать изготовление шлифов площадью не менее 200 мм² каждый.

Процесс приготовления шлифов должен гарантировать высокое качество их поверхности, необходимое для обработки анализатором изображений. Шлифы тщательно промывают водой от остатков полировальных суспензий и протирают спиртом. На поверхности металла не должно оставаться разводов от спирта, частиц бумаги или ваты. Не допускается наличие царапин шириной более 1 мкм. Оценка включений проводится на нетравленных шлифах.

Реализация методики помощью анализатора изображения 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 загрязненности неметаллическими включениями основного металла листового и рулонного проката, предназначенного для изготовления нефтепроводных труб.

Весь цикл измерений включает следующие действия:

- визуальный поиск участка шлифа с наибольшим баллом загрязненности по каждому типу включений через окуляры микроскопа при увеличении $\times 100$ и установка объектива с более высоким увеличением;

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

- детектирование включений;

- разделения включений по типам;

- назначение балла для каждого из найденных типов включений в соответствии с градуировочными кривыми.

Далее вновь устанавливается объект с увеличением $\times 10$, предметный столик микроскопа переводится на следующий участок шлифа с максимальным баллом и цикл измерений при повышенном увеличении повторяется.

Образец устанавливают таким образом, чтобы его продольная ось, совпадающая с направлением деформации, располагалась вдоль оси x предметного столика.

Следует проверить центровку источника света в микроскопе и отрегулировать уровень освещенности таким образом, чтобы изучаемое поле зрения освещалось равномерно. Если, несмотря на принятые меры, неравномерность освещенности сохраняется, то затемненная часть поля зрения не должна мешать детектированию наиболее светлых неметаллических включений (сульфидов).

Увеличение в системе должно обеспечивать достаточное разрешение, чтобы правильно идентифицировать включения. Необходимо использовать объективы с увеличением от $\times 20$ до $\times 50$, что соответствует размеру пикселя от 0,6 до 0,2 мкм. Более низкое увеличение для проведения измерений не допускается. Увеличение $\times 100$ используется при наблюдении в окуляры микроскопа только для поиска наиболее загрязненного поля зрения. Следует пользоваться одним и тем же объективом для всех измерений образцов внутри одной и той же плавки.

Установка порогов дискриминации по уровню серого для отдельного детектирования сульфидов и включений кислородной группы производится таким образом, чтобы детектировались все включения, в том числе мелкие, без увеличения размеров крупных включений. Выбранные пороговые установки следует опробовать на включениях по нескольким полям зрения перед началом анализа. Пороговый интервал для включений кислородной группы имеет более низкие численные значения уровня серого, в то время как интервал для сульфидов несколько выше. Эти установки следует уточнять, используя фликер-метод для нескольких, случайно выбранных полей зрения.

Если все-таки не удастся детектировать мелкие включения без передетектирования крупных, то анализатор изображений Thixomet позволяет ввести

второй диапазон порогов дискриминации отдельно для мелких включений того же типа. Возникающее при этом передетектирование крупных частиц не будет принято во внимание при расчете границ включений. Таким образом находится альтернатива, оговоренная в ASTM E 1245, что являются неизбежной проблемой при измерениях разновеликих включений.

Измерение стереологических параметров

Для оценки объемной доли неметаллических включений в стали на каждой панораме измеряется площадь всех детектированных включений отдельно для кислородной группы, в том числе строчечных включений (СХ, ОС, СП), крупных единичных включений (СН), мелких точечных включений (ОТ), и сульфидов. При этом измеряются только включения, которые остаются внутри тестовой окружности диаметром, равным диаметру поля зрения в методе Ш6 ГОСТ 1778–70 (1,2 мм). Для минимизации краевого эффекта при измерениях следует избегать попадания включений на границы этой тестовой окружности. При анализе всех панорам, изготовленных на наиболее загрязненных полях зрения, сохраняются только наибольшие значения объемной доли и максимальной площади отдельных включений раздельно по разным типам (кислородной группы и сульфидам), в том числе раздельно для всех разновидностей включений кислородной группы (СХ, ОС, СП), СН, ОТ.

Любые стереологические измерения предполагают равномерное распределение «второй» составляющей в металлической матрице, поэтому, строго говоря, экзогенные включения не могут быть оценены так же, как вышерассмотренные эндогенные. Тем не менее, учитывая специфику данной методики, предназначенной для оценки металла ответственного назначения, будем учитывать экзогенные включения и поры наравне с эндогенными как включения кислородной группы.

Обработка результатов с помощью программного обеспечения

На каждой i -й панораме, изготовленной при увеличении от $\times 200$ до $\times 500$ в форме окружности диаметром, равным диаметру поля зрения в методе Ш6 ГОСТ 1778–70, рассчитывается объемная доля включений каждого типа, которая равна доле включений по площади, делением суммы площадей всех детектированных включений данного типа на площадь панорамы:

$$V_{Vi} = A_{Ai} = \frac{\sum_{j=1}^{N_i} A_j}{A_T}, \quad (10)$$

где A_{Ai} — доля включений по площади в текущей i -й панораме; V_{Vi} — объемная доля включений в текущей

j -й панораме; N_i — количество включений в текущей i -й панораме; A_T — площадь панорамы, равная площади поля зрения в методе Ш6 ГОСТ 1778–70 (1,1304 мм²).

Для каждого образца в памяти компьютера сохраняется только максимальное измеренное значение объемной доли, выбранное из всех наиболее загрязненных полей зрения, найденных при визуальном изучении образца в окуляры микроскопа при увеличении $\times 100$. Среднее значение максимальной загрязненности для плавки рассчитывается по результатам исследования образцов, отобранных от этой плавки

$$\bar{V}_V = \bar{A}_A = \frac{\sum_{i=1}^n A_{Ai}}{n}, \quad (10)$$

где \bar{V}_V и \bar{A}_A — средние значения содержания включений по объему и по площади, соответственно, рассчитанные по максимально загрязненному полю для всех исследованных образцов; n — число измеренных образцов.

Включения кислородной группы разделяются по типам, а все измеренные значения объемной доли каждого из типов включений кислородной группы и сульфидов пересчитываются в соответствующий балл, эквивалентный баллу ГОСТ 1778–70. При этом контролируется наибольшая площадь единичного включения, которая не должна превышать предельные значения для соответствующего балла.

Погрешность измерений

Аттестация программного изображения, как средства измерений, выполнена по результатам международных межлабораторных круговых измерений (Interlaboratory «Round Robin»), проведенных в рамках очередного пересмотра стандарта ASTM E 1245. Программное обеспечение Thixomet PRO, наряду с другими шестью широко используемыми коммерческими анализаторами изображения США и Европы, принимало участие в круговых измерениях.

Типы образцов, применяемых при аттестации, представлены ниже.

1. Сульфиды в коррозионностойкой стали марки 416.
2. Сульфиды в углеродистой стали марки 1215FM B5.
3. Сульфиды в коррозионностойкой стали марки 5F.
4. Сульфиды в углеродистой стали 1215 FM B2.
5. Дельта-феррит в коррозионностойкой стали 15-7 PH.
6. Композиционный материал Al — Al₂O₃ C3.
7. Композиционный материал Al — Al₂O₃ A6.

Используя электронные изображения структур вышеприведенных образцов, измерения выполняли

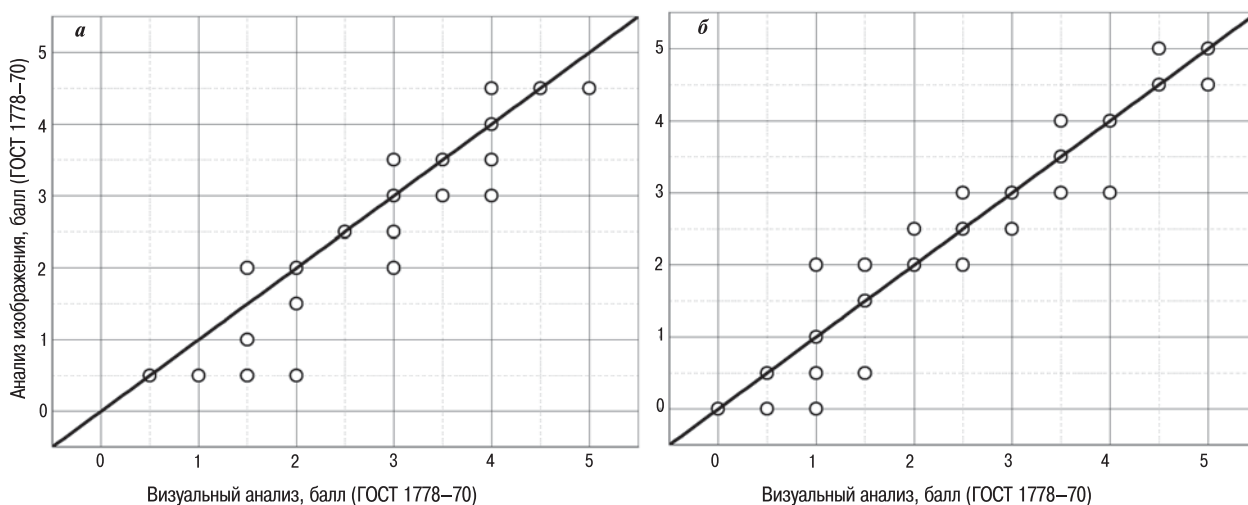


Рис. 8. Результаты сличения балла, полученного анализатором изображения Thixomet и методом экспертных оценок (а — силикаты недеформирующиеся; б — строчечные включения)

по методике, предусмотренной процедурой ASTM E 1245-00. Измерения образцов 1, 2 и 4 проводились по 25 полям зрения при увеличении $\times 1000$ (1 пиксель = 0,1045 мкм), образцов 3 и 5 — по 25 и 15 полям зрения, соответственно, при увеличении $\times 500$ (1 пиксель = 0,2115 мкм), образцов 6 и 7 — по 10 полям зрения при увеличении $\times 200$ (1 пиксель = 0,5300 мкм).

В результате аттестации рассчитаны относительные погрешности различных типов измерений при доверительной вероятности $P = 0,95$, %:

объемной доли включений	$\pm 7,2$
количества включений на 1 мм^2	$\pm 6,3$
площади включений	$\pm 5,7$
максимальной длины включений	$\pm 2,9$
расстояния между включениями	$\pm 6,5$

На основе результатов круговых измерений Государственный сертификационный испытательный центр средств измерений государственного предприятия «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» (Комите-

та РФ по стандартизации, метрологии и сертификации) выдал свидетельство № 2610-11-30/2004 от 02.03.04 г. об аттестации программного обеспечения Thixomet, как средства измерений.

Результаты сравнения балла, полученного методом экспертных оценок, и результатов измерений, произведенных с помощью анализатора изображения Thixomet PRO, на примере включений типа силикаты недеформирующиеся (рис. 8) и строчечные включения, показывали их хорошую сходимость.

Внешний вид интерфейса программного обеспечения Thixomet PRO при оценке загрязненности стали неметаллическими включениями показан на рис. 9.

Выводы

1. Разработана методика разделения неметаллических включений по типам в соответствии с методом Ш6 ГОСТ 1778–70.

2. На основе результатов «оцифровки» эталонных шкал, а также с учетом уравнений, положенных в основу их создания, обоснованы градуировочные кривые для пересчета объемного процента включений в балл, соответствующий ГОСТ 1778–70.

3. Разработана и реализована в виде самостоятельного модуля анализатора изображения Thixomet методика определения загрязненности стали неметаллическими включениями по методу Ш6 ГОСТ 1778–70 с помощью баллов соответствующих шкал.

Балл назначается на основе стереологических параметров, измеренных для каждого из найденных типов включений при панорамных исследованиях с помощью автоматического анализатора изображений. В настоящее время анализатор изображения Thixomet PRO проходит апробацию на трубных заводах и в научно-исследовательских институтах с це-

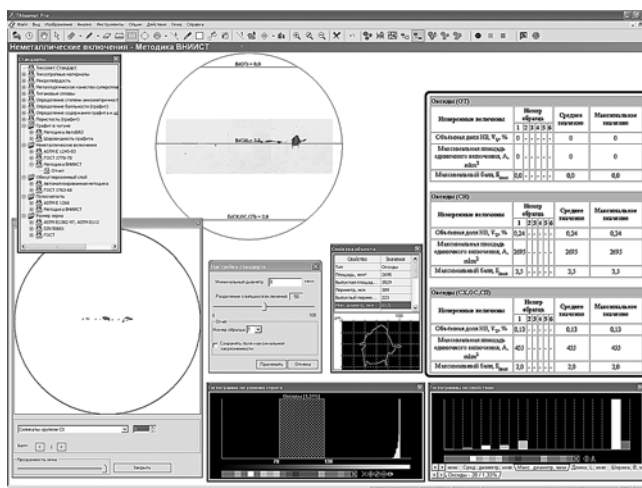


Рис. 9. Внешний вид интерфейса программного обеспечения Thixomet при оценке загрязненности стали неметаллическими включениями

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.