

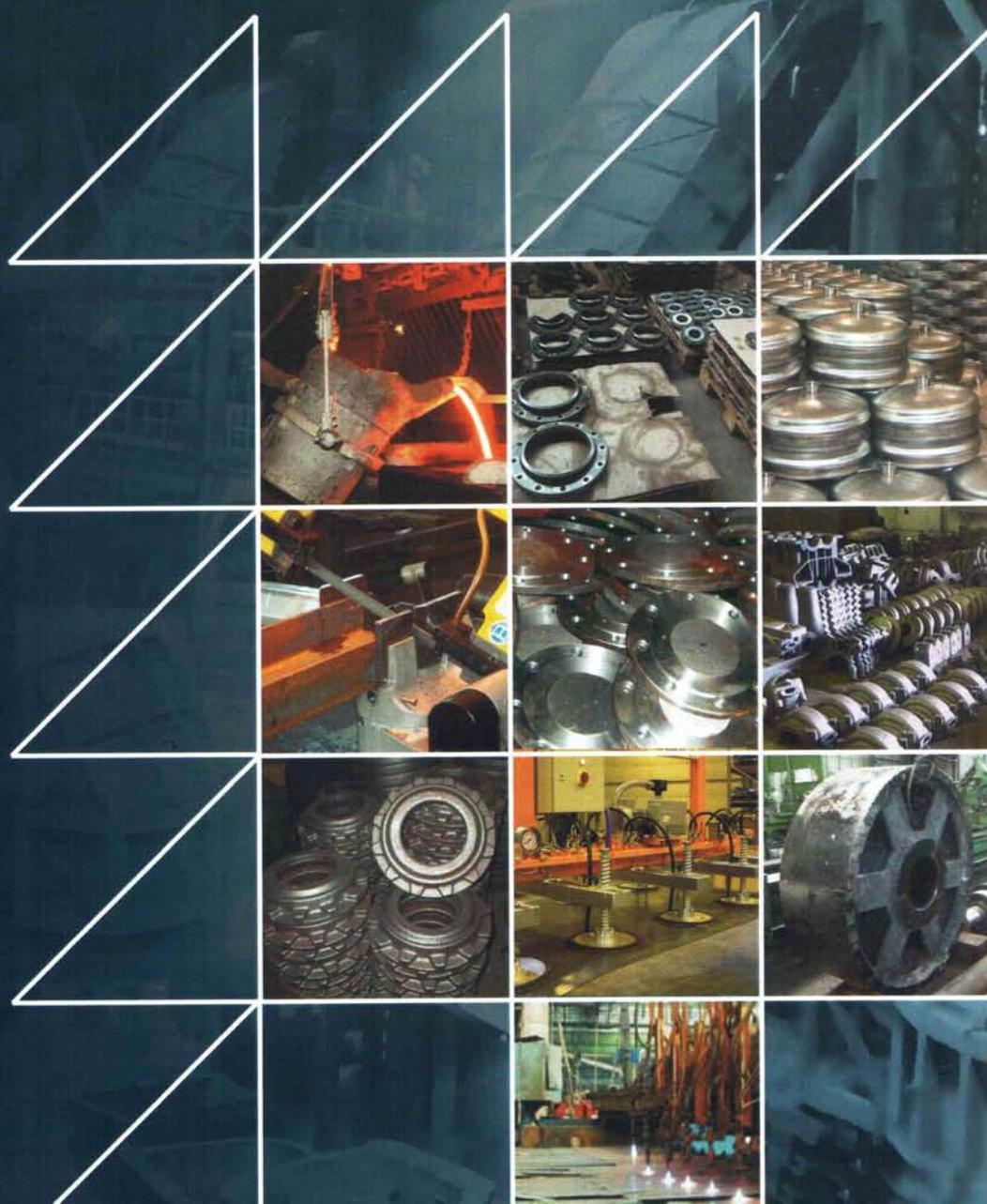
# ЗАГOTOВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ

КУЗНЕЧНО-ШТАМПОВОЧНОЕ, ЛИТЕЙНОЕ И ДРУГИЕ ПРОИЗВОДСТВА

ISSN 1684-1107

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ  
И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ  
ЖУРНАЛ

10  
2012



А.А. Казаков, Д.В. Киселев, О.В. Пахомова  
(Санкт-Петербургский государственный политехнический университет)

## Структура как основа системы качества в трубном производстве

Показано, что применяемые в настоящее время стандарты для оценки качества штрипса устарели и не могут быть использованы для описания его качества. Разработан и внедрен в действующее производство программно-аппаратный моторизованный комплекс Thixomet SmartDive для количественной оценки всех видов структурной неоднородности в современных трубных сталях: микроструктурной полосчатости, общей анизотропии, блоков речного бейнита, ликвационной полосы. Все разработанные стандарты либо уникальны и не имеют аналогов (общая анизотропия и блоки речного бейнита); либо совместимы, но превосходят оценки в действующих отечественных (ГОСТ 5640) и зарубежных (ASTM E 1268, GB/T 13298) стандартах. Установлено, что структурная неоднородность, оцениваемая объемом долей и размером протяженных областей бейнита речной морфологии, вытянутых вдоль направления прокатки, адекватно описывает механические свойства при растяжении и ударном изгибе листового проката штрипсовых сталей с пределом текучести 485...625 Н/мм<sup>2</sup>. Найденные закономерности "структура-свойства" могут послужить основой системы качества, в частности, использованы для приемосдаточного контроля металлопродукции между поставщиками и потребителями штрипса, а также для совершенствования сквозной технологии его получения.

**Ключевые слова:** трубные стали; микроструктура; механические свойства; структурная неоднородность; контроль качества стали.

*Standards currently used for quality assessment of tube plate have been out of date and cannot be used for the description of its quality. The hardware-software motorized device Thixomet Smart Drive for quantitative estimation of all types of structural heterogeneity in modern tube steels – microstructural banding, general anisotropy, blocks of bainite with lath morphology, center-line segregation – is developed and installed. All developed standards or are unique and have no analogs (general anisotropy and blocks of bainite with lath morphology); or are compatible but surpass of quality estimation operating local (GOST 5640) and foreign (ASTM E 1268, GB/T 13298) standards. It was established that structural heterogeneity estimated by volume fraction and size of extended areas of bainite with lath morphology streamlined along rolling direction adequately describes mechanical properties at tensile and impact bending tests of pipeline steels with yield strength from 485 up to 625 N/mm<sup>2</sup>. The found "structure-properties" relationships can be used as background for quality estimation system including acceptance test of steel products between suppliers and consumers of the plate, and also for the improvement of through technology of its production.*

**Keywords:** tube steels; microstructure; mechanical properties; structural inhomogeneity; quality control of steel.

При производстве труб для магистральных трубопроводов основными характеристиками, по которым проводят приемосдаточные испытания штрипса, являются механические свойства: прочность на растяжение, ударная вязкость, испытания падающим грузом (ИПГ), измеренные при комнатных и низких климатических температурах. При этом структуру учитывают размером зерна по ГОСТ 5639 и полосчатостью по ГОСТ 5640. Металлургическое качество оценивают содержанием неметаллических включений по ГОСТ 1778–70. Отметим, что все стандарты относятся к состоянию технологии 60–70-х гг. прошлого века. Однако при современном состоянии технологии производства трубных сталей ни полосчатость, ни содержание неметаллических включений не являются лимитирующим фактором, определяющим их потребительские свойства.

Полосчатость актуальна только для феррито-перлитых сталей низких категорий прочности. С внедрением системы ускоренного охлаждения после чистовой прокатки формируется не феррито-перлитная, а феррито-бейнитная или бейнитная структура, поэтому структурная полосчатость в таких сталях практически отсутствует, а дисперсность структуры характеризуется не столько размером зерна феррита, который практически невозможно выделить в феррито-бейнитных сталях, сколько дисперсностью и морфологией элемента структуры с учетом всех ее составляющих.

Эффективно проведенная внепечная обработка позволяет снизить содержание включений по ГОСТ 1778–70 ниже балла 2 или до тысячных долей в объемных процентах по

ASTM E 1245. Такое низкое содержание неметаллических включений не оказывает негативного влияния на свойства стали. Напротив, дисперсные, равномерно распределенные неметаллические включения являются основой "оксидной металлургии", разработанной Nippon Steel. Именно на таких включениях, как на подложках, образуется игольчатый феррит, обеспечивающий наилучшее сочетание прочности и вязкости разрушения сталей. Таким образом, набор структурных характеристик, применяемых в настоящее время для приемосдаточных испытаний трубных сталей, устарел и не может характеризовать потребительские свойства штрипса.

Более того, механические свойства, определенные даже на полнотолщинных образцах, не в полной мере характеризуют потребительские свойства стали. При этих испытаниях результат зависит от места пробоотбора, а следовательно, от особенностей структуры штрипса, наследуемой от сляба с учетом влияния технологии контролируемой прокатки. Учитывая, что современная технология не обеспечивает изотропную структуру, одинаковую по площади и толщине листа, разброс значений при механических испытаниях может быть значительным. Это означает, что результаты приемосдаточных испытаний не могут быть использованы для обобщения опыта и установления значимых взаимосвязей "структура-свойства", так как непонятно, к какой структуре эти свойства относятся: свойства определяют на одних образцах, а структуру – на других. Только структура непосредственно под поверхностью разрушения, адекватно "оцифрованная" по представительной площади, может быть использована для установления взаимосвязи "структура-свойства".

Известно, что структура стали определяет ее свойства. Поэтому, если правильно "оцифровать" структуру с помощью современных методов количественной металлографии, то именно структура, а не механические свойства, сможет более объективно характеризовать потребительские свойства штрипса. Для такого прогноза свойств по структуре необходима обширная база данных "структура—свойства".

Вопрос о целесообразности использования структуры в качестве выходной характеристики, позволяющей оценить потребительские свойства штрипса, уже не является дискуссионным. Известно [1], что новый толстолистовой стан введен в эксплуатацию на заводе компании Xiangtan Iron and Steel. На стане можно производить около 2 млн т. толстолистового проката до 4,8 м. Наряду с обычным сортаментом на двухклетьевом стане можно прокатывать высокопрочный лист класса X80. Концерн Siemens спроектировал и поставил все основные узлы стана, включая черновую и чистовую клетки с контрольно-измерительными приборами и автоматикой. Этот стан впервые оснащен так называемым монитором микроструктуры, изначально разработанным Siemens для станов горячей прокатки, который позволяет прогнозировать механические свойства листового проката и даже частично отказаться от соответствующих испытаний. Однако в этой публикации не раскрыты методика и детали контроля структуры и свойств сталей.

В настоящей работе решены следующие актуальные задачи:

1) разработаны методики оценки структуры для оцифровки всех форм структурной неоднородности современных трубных сталей;

2) найдены взаимосвязи "структура—свойства" для сталей разных категорий прочности для большинства механических свойств, входящих в приемосдаточные испытания.

**Разработка методики оценки микроструктурной полосчатости.** Для оценки структуры сталей и сплавов в большинстве российских стандартов применяют 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 стереологическими измерениями. Примером таких стандартов могут быть соответственно ГОСТ 5640—68 и ASTM E 1268.

Несмотря на то что стереология как наука была впервые в мире разработана С.А. Салтыковым более 50 лет назад [2], сегодня Россия значительно отстает от передовых стран Запада по использованию количественной металлографии для описания структуры материалов. Необходимость скорейшего развития отечественной количественной металлографии обоснована, по меньшей мере, двумя причинами. Во-первых, оценка качества структуры, основанная на стереологических измерениях, однозначно более объективная и точная по сравнению с визуальным методом сравнения с эталонами. Во-вторых, сегодня при интеграции России в мировую экономику необходимо преодолеть проблемы совместимости отечественных и зарубежных стандартов при взаимных поставках металлопродукции и проведении связанного с этим входного и выходного контроля металла.

*Цель этой части работы* — разработка методики количественной оценки микроструктурной полосчатости низколегированных трубных сталей в соответствии с ГОСТ 5640—68 с помощью автоматического анализа изображений.

Методика предназначена для оценки микроструктурной полосчатости в листовом и рулонном прокате трубных сталей феррито-бейнитного 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 параметров, найденных методом направленных секущих с помощью автоматического анализатора изображений [2].

Для простоты описания процедуры анализа изображений введем понятие "вторая фаза", под которой понимаются бейнит и другие продукты распада аустенита, отличающиеся по цвету от ферритной матрицы.

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 вдоль оси прокатки. 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 обжатия при горячей деформации и др.

Микроструктурная полосчатость является следствием дендритной ликвации и зависит от состава стали, особенно углерода, скорости кристаллизации и режимов дальнейшей горячей обработки стали. 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.

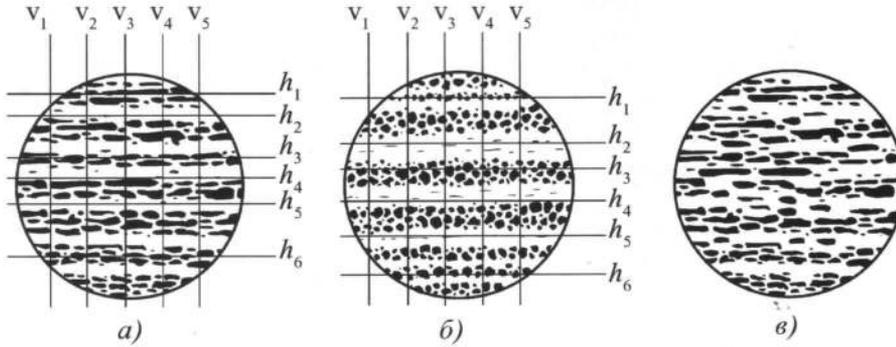
В ГОСТ 5640—68 сравнение исследуемой микроструктуры стали с эталонами производится при увеличении  $\times 100$ , а анализ вытянутости ферритного зерна предполагает использование увеличения  $\times 500$ . Такой анализ возможен только при последовательном исследовании образца при двух увеличениях. В рамках классической металлографии при увеличении  $\times 500$  невозможно увидеть площадь, доступную для исследований при увеличении  $\times 100$ .

Современными методами количественной металлографии с использованием анализатора изображения Thixomet<sup>®</sup> можно одновременно произвести оценку и полосчатости, и вытянутости ферритного зерна, проводя измерения при одном увеличении  $\times 500$ , а необходимую площадь, соответствующую размеру поля зрения при увеличении  $\times 100$ , последовательно "собрать" прецизионной склейкой "на лету" смежных полей зрения: пока предметный столик перемещается на соседнее поле зрения, предыдущее поле "пиксель в пиксель" стыкуется к полю, захваченному накануне. Так формируется панорамное изображение структуры любой большой площади, но с высоким разрешением.

Воспользуемся предложенными С.А. Салтыковым стереологическими параметрами для оценки полосчатости структур [3]. Вычисление этих параметров основано на методе направленных секущих:

$$1) \frac{\bar{N}_{L\perp}}{\bar{N}_{L\parallel}}, \text{ где } \bar{N}_{L\parallel}, \bar{N}_{L\perp} - \text{среднее количество частиц вто-}$$

рой фазы, пересеченных секущими соответственно парал-



лосчатости: структура на рис. 1, *в* имеет достаточно равномерное распределение частиц второй фазы, а на рис. 1, *а* — отличается значительной полосчатостью. Напротив, для структуры на рис. 1, *б* коэффициент  $\frac{\bar{N}_{L\perp}}{\bar{N}_{L\parallel}}$  имеет существенно более низкое значение, чем на рис. 1, *в* (1,25 против 3,30), однако структура на рис. 1, *б* имеет явно выраженную полосчатость.

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

лельными и перпендикулярными оси прокатки на единицу длины секущей;

$$2) \frac{\sigma_{N L \parallel}}{\sigma_{N L \perp}}, \text{ где } \sigma_{N L \parallel}, \sigma_{N L \perp} - \text{среднее квадратичное отклонение количества частиц второй фазы, пересеченных секущими соответственно параллельными и перпендикулярными оси прокатки};$$

клонение количества частиц второй фазы, пересеченных секущими соответственно параллельными и перпендикулярными оси прокатки;

$$3) \frac{\sigma_{V L \parallel}}{\sigma_{V L \perp}}, \text{ где } \sigma_{V L \parallel}, \sigma_{V L \perp} - \text{среднее квадратичное отклонение доли второй фазы на секущих соответственно параллельных и перпендикулярных оси прокатки}.$$

Прoанализируем работоспособность этих параметров на трех структурах, две из которых (рис. 1, *а, б*) заимствованы из работы С.А. Салтыкова [3], а третья (рис. 1, *в*) синтезирована из первой (см. рис. 1, *а*). Синтезированная структура получена перераспределением второй фазы в ферритной матрице так, что полосчатость исходной структуры значительно снижена, а анизотропия отдельных зерен второй фазы осталась прежней.

Коэффициент  $\frac{\bar{N}_{L\perp}}{\bar{N}_{L\parallel}}$ , названный в стандарте ASTM E

1268 коэффициентом анизотропии, описывает только вытянутость отдельных ее элементов (феррита или второй фазы) вдоль оси прокатки и не отражает ни ориентировки структуры 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, но для описания общей направленности служит коэффициент  $\frac{\sigma_{V L \parallel}}{\sigma_{V L \perp}}$ , анализ которого рассмотрим ниже.

Покажем, что коэффициент  $\frac{\bar{N}_{L\perp}}{\bar{N}_{L\parallel}}$  может быть использован для оценки вытянутости частиц второй фазы вдоль оси прокатки и не отражает характера взаимного расположения элементов структуры, поэтому не способен описать ее полосчатость. Для этого сравним структуры на рис. 1, *а* и *в*, которые имеют примерно одинаковые значения  $\frac{\bar{N}_{L\perp}}{\bar{N}_{L\parallel}} = 3,21$  и 3,30. При этом они абсолютно различные с точки зрения по-

лосчатости: структура на рис. 1, *в* имеет достаточно равномерное распределение частиц второй фазы, а на рис. 1, *а* — отличается значительной полосчатостью. Напротив, для структуры на рис. 1, *б* коэффициент  $\frac{\bar{N}_{L\perp}}{\bar{N}_{L\parallel}}$  имеет существенно более низкое значение, чем на рис. 1, *в* (1,25 против 3,30), однако структура на рис. 1, *б* имеет явно выраженную полосчатость.

В связи с приведенным анализом понятно, что невозможно описать полосчатость структуры в соответствии с ГОСТ 5640 с помощью коэффициента  $\frac{\bar{N}_{L\perp}}{\bar{N}_{L\parallel}}$  (параметра анизотропии) (рис. 2). В американском стандарте ASTM E 1268–01 полосчатость структуры характеризуется только ее словесным описанием: "Значение индекса анизотропии и степени ориентации не могут быть использованы для разделения того, где структура ориентирована вдоль линии деформации, а где действительно полосчатая. Это разделение может быть сделано только с помощью техники распознавания, которая лежит за пределами методов, используемых в данном ASTM", т.е. утверждается, что стереология бессильна в описании полосчатости. Как показано выше, это утверждение не соответствует действительности.

Таким образом, полосчатость описывает характер взаимного расположения элементов структуры (феррита или второй фазы), точнее, степень разделения этих структурных составляющих на отдельные слои, ориентированные вдоль оси прокатки, поэтому только критерии  $\frac{\sigma_{N L \parallel}}{\sigma_{N L \perp}}$  и  $\frac{\sigma_{V L \parallel}}{\sigma_{V L \perp}}$ , характеризующие отклонения от среднего, соответственно

рактически одинаковая у структур на рис. 1, *а* и *в* и значительно меньше у структуры на рис. 1, *б*, состоящей из равноосных частиц второй фазы.

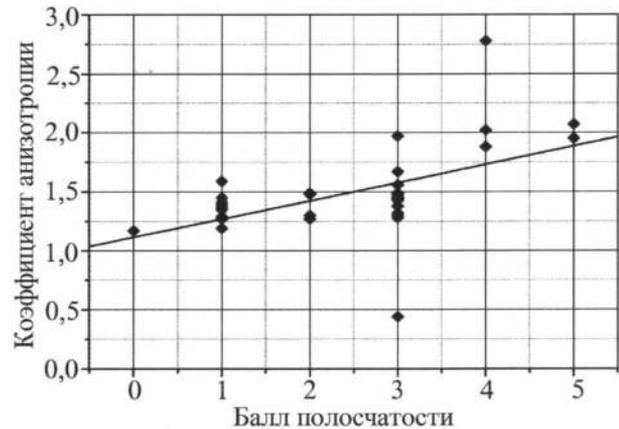


Рис. 2. Параметр анизотропии, рассчитанный для микроструктур с разным баллом полосчатости по ГОСТ 5640

количества пересечений и доли второй фазы при измерениях вдоль и поперек оси прокатки могут быть рассмотрены, как возможные коэффициенты полосчатости.

Учитывая анализ, выполненный в работе [2], можно заключить, что только коэффициент  $\frac{\sigma_{VL\parallel}}{\sigma_{VL\perp}}$ , основанный на

измерениях доли второй фазы на направленных секущих вдоль и поперек оси прокатки, будет однозначно характеризовать полосчатость структуры вне зависимости от морфологии частиц второй фазы. Этот коэффициент закономерно снижается от 1-й структуры к 3-й: 6,73; 4,32; 3,72 (см. рис. 1). Проверим его работу на фотоэталонах ГОСТ 5640–68, тогда

получим:  $\frac{\sigma_{VL\parallel}}{\sigma_{VL\perp}} = 1,33; 1,62; 2,58; 2,82; 3,17$  и  $4,25$  соответ-

ственно для баллов 0, 1, 2, 3, 4 и 5.

Таким образом, обосновано выбран коэффициент  $\frac{\sigma_{VL\parallel}}{\sigma_{VL\perp}}$

как единственный из известных, который адекватно описывает структурную полосчатость и не зависит от вытянутости отдельных структурных составляющих вдоль оси прокатки. Назовем его коэффициентом полосчатости. Методика расчета коэффициентов полосчатости и анизотропии основана на статистически точных математических соотношениях, известных из стереологии и реализованных в автоматических анализаторах изображений.

На рис. 3 показаны результаты работы анализатора изображения по распознаванию реальных структур в соответствии с описанной выше методикой. После такой оценки структуры по коэффициенту полосчатости следует проверить анизотропию ферритного зерна. Предельные значения коэффициентов полосчатости, а также анизотропии ферритного зерна и второй фазы для соответствующих баллов от 0 до 5 получены методом экспертных оценок.

Разработанная методика реализована в анализаторе изображения Thixomet PRO и применяется для оценки полосчатости структуры на многих ведущих организациях и предприятиях, занимающихся трубным производством.

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 деревом решений [2].

Далее снова устанавливается объектив  $\times 100$ , предметный столик микроскопа переводится на следующий участок шлифа с максимальным баллом и весь цикл измерений при повышенном увеличении микроскопа повторяется. Как только в трех местах образца, характеризующих наибольшую структурную полосчатость, будет найдено одинаковое значение максимального балла, измерения прекращают и назначают установленный в этих трех местах балл полосчатости исследуемого образца.

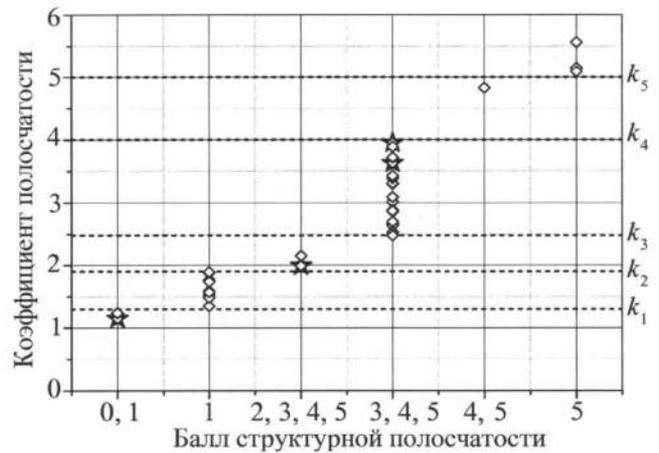


Рис. 3. Результаты распознавания реальных структур с использованием коэффициента полосчатости

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 больше, чем  $\times 100$ , поэтому программное обеспечение дает возможность построения квадратной или прямоугольной панорамы площадью не менее  $0,5 \text{ мм}^2$  на участках шлифа с максимальным баллом.

Результаты сравнения значений балла полосчатости, полученного методом экспертных оценок и с помощью анализатора изображения Thixomet, показывают их хорошую сходимость (рис. 4).

Таким образом, показано, что ни один из используемых в ASTM E 1268 и предложенных в работах С.А. Салтыкова стереологических параметров структуры, не может описать ее микроструктурную полосчатость, поэтому в американском стандарте полосчатость описывается словесно. В данной работе разработана и реализована в виде самостоятельного модуля анализатора изображения Thixomet методика

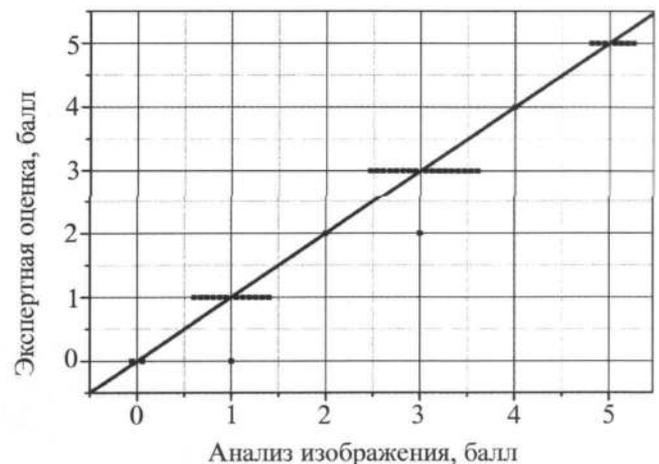


Рис. 4. Результаты сравнения балла полосчатости, полученного анализатором изображения Thixomet PRO и методом экспертных оценок

определения микроструктурной полосчатости в соответствии с ГОСТ 5640–68 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 параметров, найденных методом направленных секущих при панорамных исследованиях с помощью автоматического анализатора изображений. Сопоставление результатов оценки полосчатости, выполненной с помощью анализатора изображения, с результатами, полученными экспертами-металлографами, показало их хорошую сходимость. Применение анализатора изображения для оценки качества структуры низколегированных трубных сталей позволит значительно повысить объективность назначения балла микроструктурной полосчатости.

**Разработка метода оценки анизотропии структуры.** Современные трубные стали получают с использованием технологии термомеханической обработки, которая предусматривает применение в конце чистой прокатки эффективных систем ускоренного охлаждения. Листовой прокат в этом случае имеет практически полностью бейнитную структуру, а микроструктурная полосчатость в них отсутствует. Тем не менее в таких сталях можно наблюдать анизотропию бейнитной структуры. Стереологические методы, которые использовали для оценки феррито-перлитных и феррито-бейнитных структур, не применимы для описания сложной морфологии бейнита, поэтому для этого случая был разработан метод оценки анизотропии бейнита, основанный на текстурном анализе изображений [4].

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, т.е. 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 вероятность  $P_{d,\alpha}(i, j)$  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 [4]:

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

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

Вычисление коэффициента анизотропии состоит в следующем. Построение нескольких матриц  $P_{d,\alpha}$  для разных направлений  $\alpha$  и вычисление на основе каждой из них признака гомогенности. Коэффициент анизотропии  $K_A$  определяют как

среднеквадратичное отклонение значений  $H_{d,\alpha}$ , рассчитанных для разных направлений:

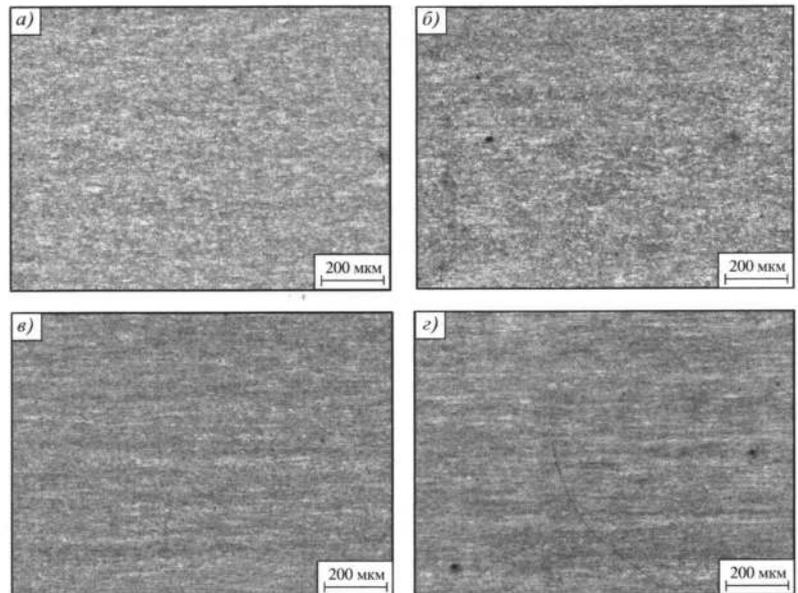
$$K_A = \sigma_{H_{d,\alpha}} \quad (2)$$

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

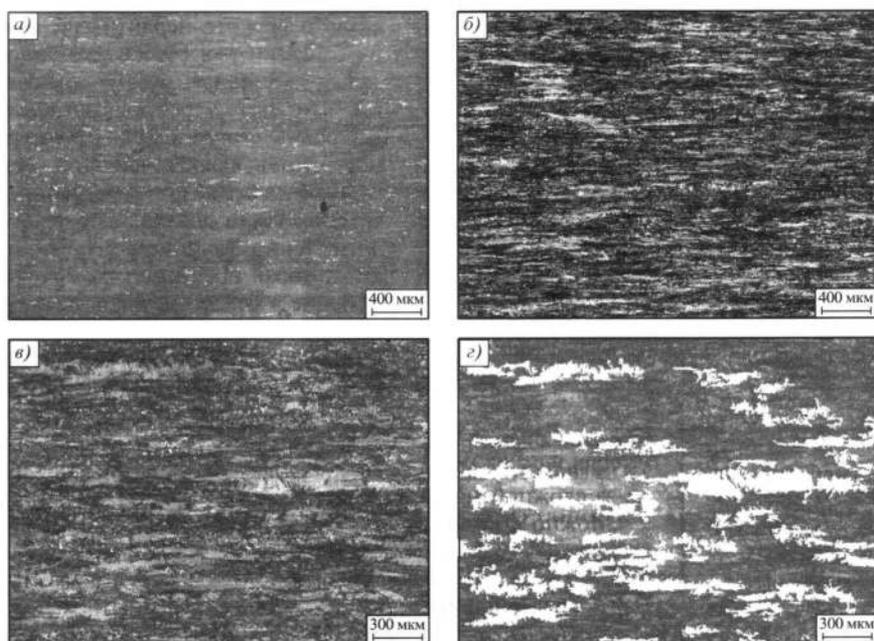
На рис. 5 представлены изображения микроструктур с различными значениями коэффициента анизотропии.

**Разработка методики оценки блоков речного бейнита.** Как показали исследования, среди разнообразных морфологических форм блоки бейнита речной морфологии, вытянутые в направлении прокатки, вносят основной вклад в общую анизотропию и значительно снижают механические свойства листовой стали в поперечном направлении [5]. Разработана методика пленочного травления с последующим анализом в поляризованном свете [6], позволяющая с помощью анализатора изображений однозначно выделять блоки бейнита такой морфологии и проводить измерения их объемного содержания и протяженности продольных межфазных границ, во многом определяющих механические свойства трубных сталей этого класса. Данная методика состоит из следующих этапов:

1. Подготовка поверхности шлифа по методике шлифподготовки горячекатаного листа из сталей феррито-бейнитного и бейнитного классов для количественных металлографических исследований [7].
2. Цветное пленочное травление для получения оптического эффекта при использовании поляризованного света [6].
3. Анализ изображений феррито-бейнитной микроструктуры. Количественный анализ структурных состав-



**Рис. 5.** Микроструктуры с различными значениями коэффициента анизотропии  $K_A$ :  
 а – 0,61; б – 1,07; в – 1,61; з – 2,02; а, б – поперечное направление; в, з – продольное направление



**Рис. 6.** Панорамное изображение структуры после цветного травления в светлом поле (*а*), в поляризованном свете (*б, в*) и распознанная структура на анализаторе изображения Thixomet (*г*):

*а, б* –  $\times 100$ ; *в, г* –  $\times 200$

ляющих проводили на моторизованном оптическом микроскопе Axiovert 200 MAT, оснащенный анализатором изображений Thixomet. Разработана методика автоматического количественного анализа феррито-бейнитных микроструктур. Суть этой методики состоит в следующем:

3.1. Построение панорамного изображения необходимой площади при требуемом увеличении травленной структуры с использованием поляризованного света (рис. 6, *а, б*). Наиболее объективными являются увеличения от  $\times 100$  до  $\times 500$ ; при этом следует учитывать, что контрастность изо-

бражения в поляризованном свете падает с повышением увеличения.

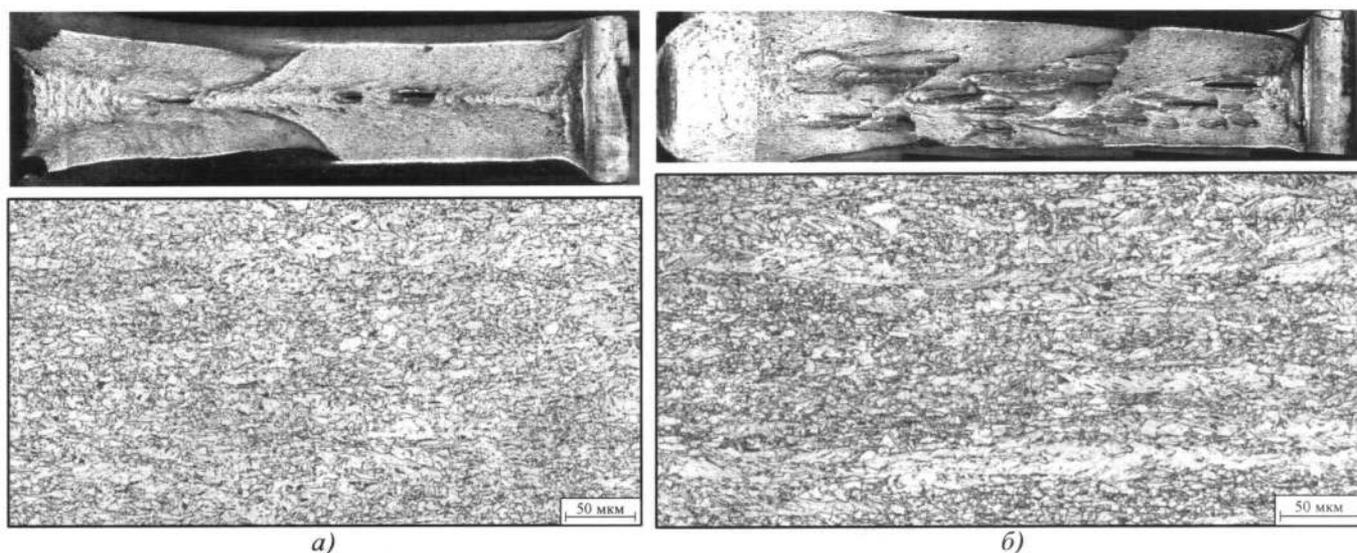
3.2. Количественный анализ выделяющихся при предложенном способе травления областей верхнего бейнита речной морфологии в режиме "автоматических измерений" с использованием соответствующего модуля анализатора изображений Thixomet (рис. 6, *в, г*).

3.3. Получив количественные оценки элементов структуры, в данном случае бейнитных областей с речной морфологией, вытянутых в направлении прокатки (см. рис. 6, *в, г*), можно оценить их влияние на свойства листовой стали.

Исследования показали, что неоднородность структуры и протяженность продольных межфазных границ оказывают негативное влияние на характер разрушения при ИПГ, а именно – приводят к образованию расслоев. В феррито-перлитных сталях такими границами являются границы между ферритом и протяженными перлитными колониями, вытянутыми в направлении прокатки, а в бейнитных сталях – границы между вытянутыми блоками бейнита речной морфологии и другими структурными составляющими [5].

Расслоения на изломе образцов после ИПГ практически отсутствуют, если структура достаточно однородна и в ней отсутствуют протяженные межфазные границы (рис. 7, *а*). Чем больше коэффициент анизотропии и протяженнее межфазные границы, тем больше расслоев образуется на изломе образцов после ИПГ (рис. 7, *б*).

**Разработка методики оценки ликвационной полосы.** Большинство известных стандартов оценки качества проката предусматривают исследование образцов, отобранных от четверти толщины листа, не учитывая центральную область. В этой области, как правило, содержатся грубые следы зо-



**Рис. 7.** Поверхность излома образца после ИПГ и соответствующая ему микроструктура бейнита:

*а* – поперечное сечение; *б* – продольное сечение

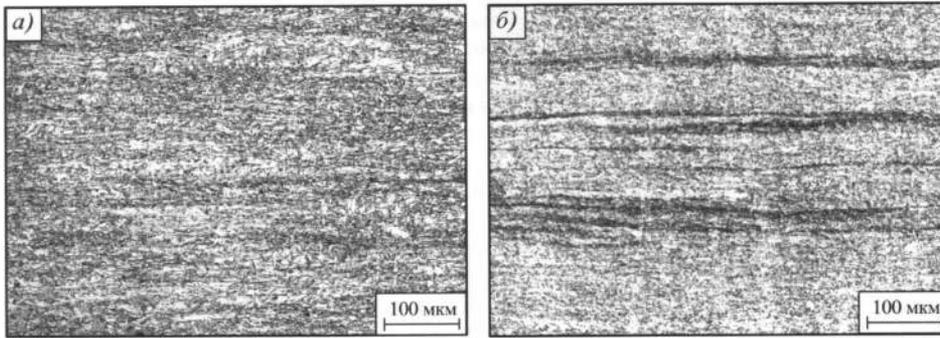


Рис. 8. Микроструктура осевой зоны:  
а – балл 1; б – балл 4

нальной ликвации, которые невозможно фрагментировать при прокатке и которые негативно влияют на механические свойства листа. Ликвационная полоса – это наиболее грубое проявление неоднородности и анизотропии в штрипсе.

Ликвационная полоса оценивается по различным методикам. Например, методика Dillingeg предусматривает визуальную оценку всей толщины листа, включая центральную зону. Назначение одного из шести классов проводят при изучении темплетов листа невооруженным глазом. Эта методика не подразумевает какой-либо детальной оценки структуры ликвационной полосы при ее изучении на травленном шлифе в оптическом микроскопе, поэтому не учитывает размеры и количество ни полос, ни неметаллических включений, декорирующих полосу. Вместе с тем, как известно, именно эти параметры ликвационной полосы являются решающими при формировании механических и антикоррозионных свойств металла в целом.

Методика GB/T 13298 предусматривает назначение класса структуры горячекатаного листа, исходя из исследования его центральной зоны при увеличении  $\times 200$ . Дополнительно структуру оценивают при увеличении  $\times 500$ , чтобы достоверно оценить неметаллические включения, декорирующие полосу. Такие включения либо широкая одиночная полоса являются основанием для назначения дополнительно штрафных 0,5 класса. Класс 1 назначают структуре со слабо различимыми прерывистыми полосами в поле зрения, класс 2 – когда таких полос не более трех, класс 3 – более трех, класс 4 – когда таких полос более 3 и они расположены близко друг к другу и равномерно.

Как показано выше, балл (класс) структуры в основном назначают качественно визуальной оценкой, в том числе невооруженным глазом, поэтому такие оценки развития ликвационной полосы неточны и субъективны.

Для повышения объективности оценки была разработана методика количественной оценки развития ликвационной полосы в листовом прокате с помощью коэффициента микроструктурной неоднородности (КМН) [8], который рассчитывается по локальному удельному превышению микротвердости в осевой зоне. Было показано, что КМН является однозначной характеристикой сегрегации всех основных легирующих и примесных элементов стали, поэтому может служить объективной количественной характеристикой развития ликвационной полосы. Однако эта методика, ввиду своей трудоемкости, применима только для исследовательских целей, для рутинного же контроля требуется разработать более простой и в то же время объективный метод оценки.

За основу были взяты эталоны методики GB/T 13298. При разработке методики оценки микроструктурной полос-

чатости феррито-перлитных и феррито-бейнитных сталей использовали метод направленных секущих [3]. Этот метод требует выделения по уровню серого темной структурной составляющей (перлита или карбидов в бейните). Современные трубные стали получают по технологии термомеханической обработки, которая предусматривает применение в конце чистовой прокатки эффективных систем ускоренного охлаждения. Листовой прокат в этом случае имеет практически полностью бейнитную структуру и выделение какой-либо составляющей не представляется возможным из-за сложной морфологии бейнита.

Можно заметить, что изображение ликвационной полосы является периодическим сигналом, для оценки параметров которого предлагается использовать спектральный анализ с использованием преобразования Фурье.

Для изображения микроструктуры центральной зоны, полученного при увеличении  $\times 200$ , вычисляются средние значения уровня серого на секущих, параллельных линии прокатки ( $M(y)$ ), колебания которых отражают наличие темных полос на изображении. С помощью дискретного преобразования Фурье рассчитывается спектр функции  $M(y)$ .

На рис. 8 приведены изображения микроструктур осевой зоны с ликвационной полосой баллов 1 и 4, а на рис. 9 – их спектры.

Методом экспертных оценок установлено, что амплитуда  $A$  гармоник в диапазоне частот  $F$  от 0 до  $0,05 \text{ мкм}^{-1}$  наилучшим образом описывает степень развития ликвационной полосы в соответствии с эталонными шкалами. Таким образом рассчитывается сумма амплитуд гармоник в данном диапазоне частот ( $L$ ).

Уравнение регрессии, используемое для назначения балла, имеет следующий вид:

$$B = 3,56 + 0,08 L. \quad (3)$$

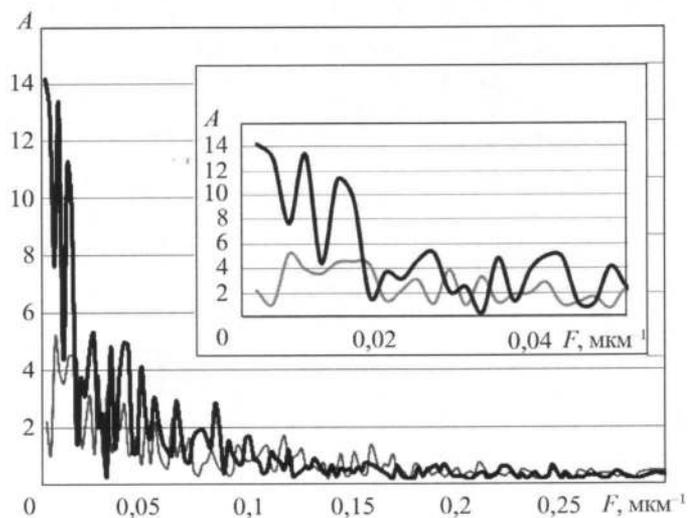


Рис. 9. Спектры функции  $M(y)$  для изображений ликвационной полосы баллов 1(—) и 4(---)

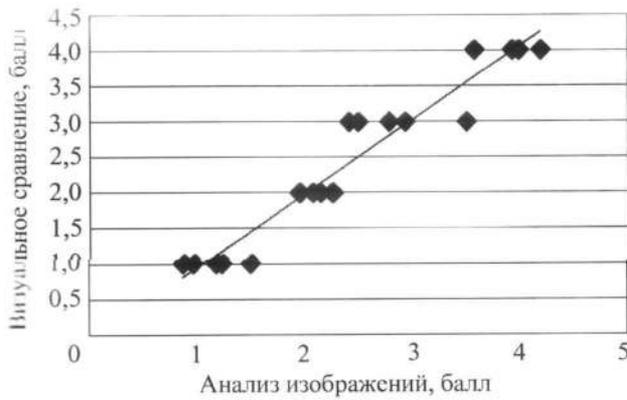


Рис. 10. Результаты сопоставления значений баллов ликвационной полосы, полученных методом сравнения с эталонами и с помощью анализа изображений

Соответствие баллов, полученных с помощью анализа изображений, результатам экспертных оценок, приведенное на рис. 10, подтверждает адекватность разработанной методики. Важно также, что балл, назначаемый таким образом, объективен, так как алгоритм анализа изображения не требует вмешательства оператора.

Таким образом, разработан пакет методов количественной оценки структурной неоднородности штрипса, охватывающий все известные типы неоднородности, фиксируемые в оптический микроскоп.

**Влияние структурной неоднородности на механические свойства грубых сталей.** Исследования проводили на марганцевых и марганцево-никелевых штрипсовых сталях классов прочности K56, K60 (X70), K65 (X80) с феррито-бейнитной структурой после контролируемой прокатки. Исследуемые стали отличались различным уровнем прочностных характеристик и работы удара, что позволило найти закономерности влияния структуры на свойства. В многоточный статистический анализ были включены все характеристики структуры, оцененные по описанным выше методикам, а также дисперсность структуры и неметаллические включения. Однако все исследованные свойства адекватно описываются только такой характеристикой неоднородности стали, как размер и количество блоков речного бейнита. Именно эта структурная неоднородность сегодня является самым слабым звеном структуры штрипса.

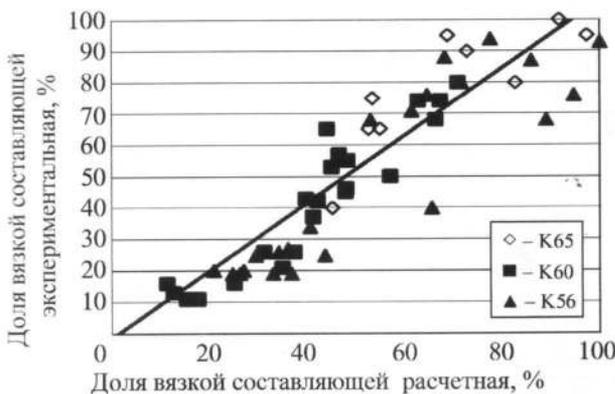


Рис. 11. Соотношение расчетных и экспериментальных значений вязкой составляющей в изломе проб ИПГ

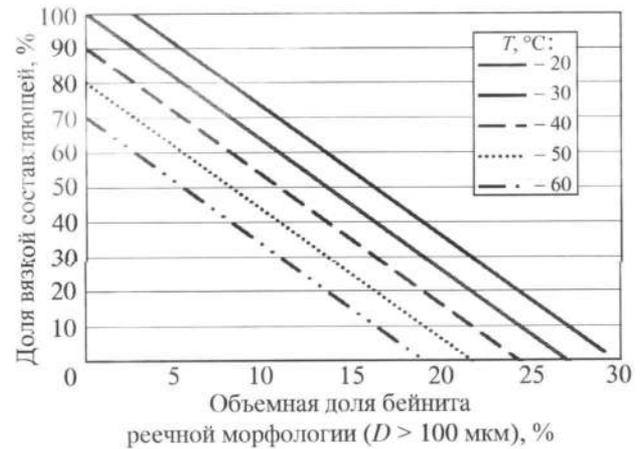


Рис. 12. Расчетные значения вязкой составляющей в изломе проб ИПГ

Ниже приведены примеры влияния объемной доли бейнита речной морфологии с блоками длиной более 100 мкм на механические свойства стали.

В результате статистического анализа всех полученных данных по трем категориям прочности было получено уравнение регрессии (4), адекватно описывающее экспериментальные данные с коэффициентом корреляции 0,9:

$$B = 129,68 + 0,99 T_{\text{исп}} - 3,71 V_{B > 100 \text{ мкм}} \quad (4)$$

где  $B$  – количество вязкой составляющей в изломе ИПГ, %;  $T_{\text{исп}}$  – температура проведения ИПГ, °C;  $V_{B > 100 \text{ мкм}}$  – объемная доля бейнита речной морфологии, %, с блоками длиной более 100 мкм.

По уравнению (4) построены графики зависимости доли вязкой составляющей от объемной доли бейнита речной морфологии ( $D > 100 \text{ мкм}$ ) при заданных температурах в диапазоне от  $-20$  до  $-60$  °C (рис. 11, 12).

Для стали категории прочности K65 получено уравнение регрессии, адекватно описывающее предел прочности  $\sigma_B$  с объемной долей блоков бейнита речной морфологии размером более 100 мкм (рис. 13, 14):

$$\sigma_B = 698,44 - 3,01 V_{B > 100 \text{ мкм}} \quad (5)$$

Для категории прочности K56 получено уравнение регрессии, связывающее ударную вязкость KCV с объемной до-

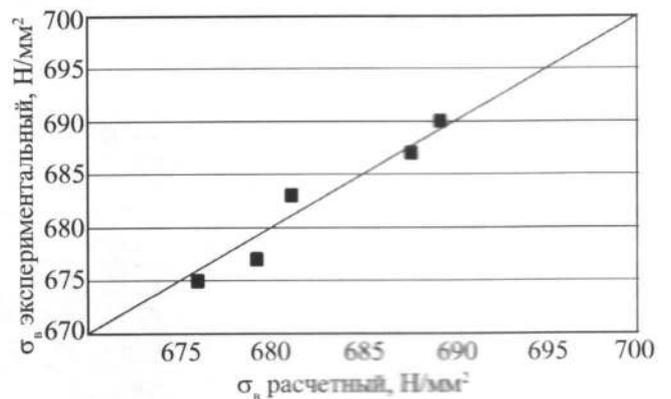


Рис. 13. Соотношение расчетных и экспериментальных значений пределов прочности для сталей категории прочности K65

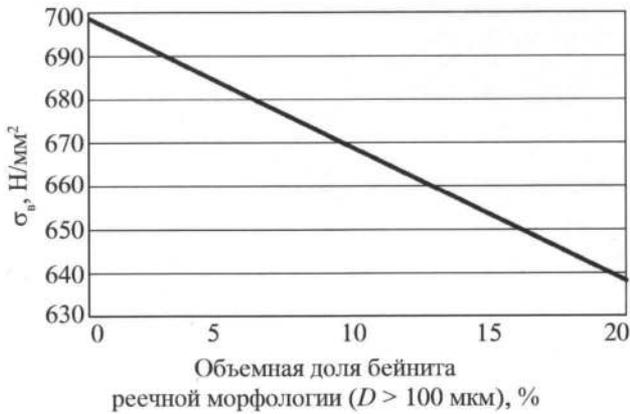


Рис. 14. Расчетные значения предела прочности для сталей категории прочности K65

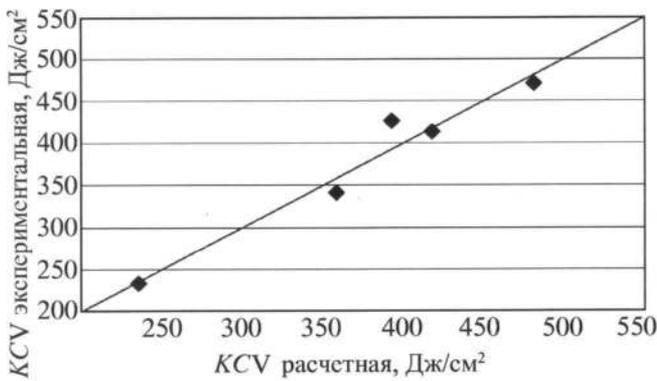


Рис. 15. Соотношение расчетных и экспериментальных значений ударной вязкости KCV для сталей категории прочности K56

лей бейнита реечной морфологии с блоками длиной более 100 мкм (рис. 15, 16):

$$KCV = 675,17 - 85,53 V_{B > 100 \text{ мкм}} \quad (6)$$

Таким образом, для повышения прочностных характеристик трубных сталей исследованных классов прочности необходимо минимизировать размер бейнитных областей реечной морфологии, причем для каждого класса прочности стали можно найти предельные размеры таких областей и соответствующую им объемную долю присутствия в структуре (см. рис. 12, 14, 16).

#### Выводы

1. Разработан и внедрен программно-аппаратный комплекс Thixomet методик количественного описания всех видов структурной неоднородности в современных трубных сталях: микроструктурной полосчатости, общей анизотропии, блоков реечного бейнита, ликвационной полосы.

2. Установлено, что структурная неоднородность, оцениваемая объемной долей и размером протяженных облас-



Рис. 16. Расчетные значения ударной вязкости для сталей категории прочности K56

тей бейнита реечной морфологии, вытянутых вдоль направления прокатки, адекватно описывает механические свойства при растяжении и ударном изгибе листового проката штрипсовых сталей с пределом текучести 485...625 Н/мм<sup>2</sup>.

3. Количественные критерии оценки структурной анизотропии феррито-бейнитных сталей могут стать важными параметрами оценки их качества при приемосдаточном контроле, а также для совершенствования технологии получения листового проката штрипсовых сталей.

4. Разработанная методика оценки структуры феррито-бейнитных сталей, наряду с созданием методов автоматизированной оценки вида излома технологических проб после динамических испытаний падающим грузом, позволит создать систему количественных критериев оценки качества листового проката штрипсовых сталей после контролируемой прокатки и стать основой системы их качества.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Новости металлургии по странам и регионам. Китай. Новый толстолистовой стан компании Xiangtan* // Черные металлы. 2010. № 12. С. 10.
2. *Салтыков С.А. Стереометрическая металлография*. М.: Металлургия, 1970. 376 с.
3. *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 // Черные металлы. 2007. № 7, 8. С. 31–37.
4. *Tuceryan M., Jain A.K. Texture Analysis* / In The Handbook of Pattern Recognition and Computer Vision (2-nd Edition), by C.H. Chen, L.F. Pau, P.S.P. Wang (eds.). World Scientific Publishing Co, 1998. P. 207–248.
5. *Структурная неоднородность и методы ее снижения для повышения качества конструкционных сталей* / Н.В. Малахов, Г.Д. Мотовилина, Е.И. Хлусова, А.А. Казаков // Вопросы материаловедения. 2009. № 3 (59). С. 52–64.
6. *Пат. 2449055 РФ. Способ исследования структуры трубных сталей*.
7. *Разработка методов оценки микроструктурной неоднородности трубных сталей* / А.А. Казаков, Е.И. Казакова, Д.В. Киселев, Г.Д. Мотовилина // Черные металлы. 2009. № 12. С. 12–15.
8. *Методика оценки ликвационной полосы листового проката* / А.А. Казаков, Л.С. Чигинцев, Е.И. Казакова, С.В. Рябшук, С.И. Марков // Черные металлы. 2009. № 12. С. 17–22.

*Александр Анатольевич Казаков, д-р техн. наук, kazakov@thixomet.ru;*  
*Даниил Владимирович Киселев;*  
*Ольга Вячеславовна Пахомова*

ООО "Издательство **Машиностроение**", 107076, Москва, Стромынский пер., 4  
 Учредитель ООО "Издательство **Машиностроение**". E-mail: [zpm@mashin.ru](mailto:zpm@mashin.ru)  
 Телефоны редакции журнала: (499) 268-47-19, 268-36-54, 268-69-19. <http://www.mashin.ru>  
 Дизайнер *Подживотов К.Ю.* Технический редактор *Жиркина С.А.* Корректоры *Сажина Л.И., Сонюшкина Л.Е.*  
 Сдано в набор 09.08.2012 г. Подписано в печать 19.09.2012 г. Формат 60×88 1/8  
 Усл. печ. л. 5,88. Уч.-изд. л. 7,54. Свободная цена.  
 Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Издательство **Машиностроение**".  
 Отпечатано в ООО "Белый ветер". 115407, Москва, Нагатинская наб., д. 54, пом. 4.