



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-42-48>
УДК 669.16

Поступила 30.04.2021
Received 30.04.2021

КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ МИКРОСТРУКТУРЫ СТАЛИ И СПЛАВОВ ДЛЯ ПЕРЕСМОТРА УСТАРЕВШИХ ГОСТ

А. А. КАЗАКОВ, Д. В. КИСЕЛЕВ, Е. И. КАЗАКОВА, ООО «Тиксомет», г. Санкт-Петербург, Россия.
E-mail: spblenal@mail.ru

Текущее состояние ГОСТ, регламентирующих качество структуры сталей и сплавов, значительно отстало от прогресса в составах и технологиях получения современных сталей и сплавов. На примере микроструктурной полосчатости стали показано, как можно преодолеть это отставание и довести разработанную в России методику до уровня межгосударственного ГОСТ.

Рассмотрены другие решенные с помощью анализатора изображений задачи количественной оценки структурных составляющих сталей и сплавов, которые могут стать основой отраслевых, национальных и межгосударственных стандартов: микроструктурная неоднородность листового проката; неметаллические включения в стали, включая автоматизацию ГОСТ 1778-70, методы оценки с использованием методики ASTM E1245 и статистики экстремальных значений, а также автоматического анализа частиц; центральная осевая неоднородность слэба; ликвационная полоса в листовом прокате; доля грубых бейнитных блоков для описания свойств современных трубных сталей; структура швов после многопроходной сварки; металлургическое качество жаропрочных никелевых сплавов; структура сплавов, обработанных в полутвердом состоянии; структура доэвтектических силуминов; неметаллические включения в алюминиевых сплавах (метод PoDFA); структура высокопрочного чугуна; распределение зерен по размерам.

Ключевые слова. Устаревшие ГОСТ, металлографические методы, структура сталей и сплавов, количественная металлография, анализ изображения.

Для цитирования. Казаков, А. А. Количественные методы оценки микроструктуры стали и сплавов для пересмотра устаревших ГОСТ / А. А. Казаков, Д. В. Киселев, Е. И. Казакова // *Литье и металлургия*. 2021. № 2. С. 42–48. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-42-48>.

QUANTITATIVE METHODS FOR ASSESSING THE MICROSTRUCTURE OF STEEL AND ALLOYS FOR REVISING OUTDATED GOST STANDARDS

A. A. KAZAKOV, D. V. KISELEV, E. I. KAZAKOVA, LLC "Tiksomet", St. Petersburg, Russia.
E-mail: spblenal@mail.ru

The current state of GOST, which regulates the quality of the structure of steels and alloys, has significantly lagged behind the progress in the compositions and technologies for obtaining modern steels and alloys. Using the example of microstructural banding of steel, it is shown how to overcome this gap and bring the methodology developed in Russia to the level of interstate GOST.

Other problems of quantitative evaluation of structural components of steels and alloys that can become the basis of industry, national and interstate standards are considered: microstructural heterogeneity of sheet metal; non-metallic inclusions in steel, including automation of GOST 1778-70, evaluation methods using the ASTM E1245 methodology and statistics of extreme values, as well as automatic particle analysis; central axial inhomogeneity of a slab; liquation strip in sheet metal; the proportion of coarse bainite blocks used to describe the properties of modern pipe steels; the structure of joints after multi-pass welding; the metallurgical quality of heat-resistant nickel alloys; the structure of alloys treated in a semi-solid state; the structure of pre-eutectic silumins; non-metallic inclusions in aluminum alloys (PoDFA method); the structure of high-strength cast iron; grain size distribution.

Keywords. Outdated GOST, metallographic methods, structure of steels and alloys, quantitative metallography, image analysis.

For citation. Kazakov A. A., Kiselev D. V., Kazakova E. I. Quantitative methods for assessing the microstructure of steel and alloys for revising outdated GOST standards. *Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 2, pp. 42–48. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-42-48>.

Многие отечественные ГОСТ, регламентирующие качество структуры стали, были разработаны еще в 70-х годах прошлого века и с тех пор не пересматривались. Между тем, с тех пор произошли радикальные изменения в составе сталей и технологии их получения, а, значит, такие же изменения произошли в их структуре.

Практически все ГОСТ основаны на субъективной визуальной оценке с помощью стандартных шкал, тогда как уже десятки лет в металлографических лабораториях на предприятиях используют автоматизированные анализаторы изображений, работающие с цифровыми камерами и способные «оцифровывать» структуру для ее количественного описания [1]. Основы стереологической металлографии были созданы в России в 50–70-х годах прошлого века С. А. Салтыковым, однако первые стандарты по количественной металлографии, базирующиеся на его работах и работах его последователей во всем мире, появились в США в начале 2000 годов, например, ASTM E1245 и ASTM E1268. Таким образом, научно-технические разработки, выполненные в России, остаются невостребованными в нашей стране, но активно используются за рубежом. Позже эти разработки возвращаются в Россию, но с уже приоритетом стандартов других стран.

Приведем один из последних примеров, когда металлографические методики, впервые разработанные в России, много позже вернулись в нашу страну из-за рубежа как переводные стандарты других стран. Эти новые ГОСТ нередко повторяют те ошибки, которые допустили западные разработчики, не в полной мере понимая техническое существо методик, изложенных в русскоязычной литературе. Речь идет об оценке микроструктурной полосчатости в стали.

ГОСТ 5640-68 предусматривает визуальную оценку полосчатости с помощью стандартных шкал, которые в этом ГОСТ приведены только для феррито-перлитных сталей, актуальных для середины прошлого века, тогда как сегодня большинство современных трубных, корабельных и арксталей имеют феррито-бейнитную или более сложную структуру. Трудно представить, как на заводах проводили прямо-сдаточные испытания этих сталей, если в документации этих испытаний ссылаются на ГОСТ 5640-68.

В 2007 г. по результатам работ с ОАО «ВНИИСТ» и многими трубными заводами специалистами ООО «Тиксомет» были разработаны стандартные шкалы для феррито-бейнитных сталей, а на основе фундаментальных стереологических подходов, следующих из критического анализа работ С. А. Салтыкова, разработана количественная методика оценки микроструктурной полосчатости с помощью автоматического анализатора изображения [2]. Заметим, что эта методика «оцифровывает» любую полосчатость, включая предусмотренную ГОСТ 5640-68 феррито-перлитную, а также феррито-бейнитную или более сложную. Важно только, чтобы структурные составляющие объединялись в полосы, отличные по уровню серого от окружающей их металлической матрицы. К сожалению, эта работа осталась без внимания, когда в 2011 г. техническим комитетом по стандартизации ТК 145 «Методы контроля металлопродукции» американский стандарт десятилетней давности ASTM E1268-01 [3] был переведен на русский язык и назван ГОСТ Р 54570-2011. «Сталь. Методы оценки степени полосчатости или ориентации микроструктур».

Детальный анализ ASTM E1268-01, опубликованный сначала в отечественной литературе [2], а позднее вместе с автором этого стандарта в США [4, 5], показал, что использованные в нем критерии не могут описать полосчатость. Как написано в стандарте, «индекс анизотропии не может различить, где структура ориентирована вдоль прокатки, а где она полосчатая». Поэтому ASTM E1268-01, несмотря на правильно выбранный метод оценки (направленные секущие), не способен количественно оценить полосчатость, поэтому ее описывали словесно. В этом смысле старый ГОСТ 5640-68, в котором есть шестиступенчатая визуальная оценка полосчатости с помощью соответствующей шкалы, является более прогрессивным стандартом, чем ASTM E1268-01 или его русский аналог ГОСТ Р 54570-2011.

После публикаций в США [4, 5] методики количественного описания полосчатости стали, разработанной в России [2], американский комитет ASTM по металлографии E-04 весной 2018 г. инициировал пересмотр ASTM E1268-01. Изменения были внесены последовательно в двух новых редакциях ASTM E1268-18 [6] и ASTM E1268-19 [7], причем в последней со ссылкой на российский приоритет этой методики. Таким образом, разработанный в России в 2007 г. метод количественной оценки полосчатости [2] стал основой ASTM E1268 в 2018–2019 гг. [6, 7].

Такая ситуация с устаревшими ГОСТ в России сложилась потому, что у нас нет государственной программы или иного механизма пересмотра стандартов. Этой работой по собственной инициативе, поддержанной заводами, занимаются профильные технические комитеты, действующие при ФГУП «ЦНИИчермет им. И. П. Бардина», у которых нет ни достаточных технических ресурсов, ни системной финансовой поддержки. Время от времени за счет долевого участия нескольких заводов инициируется пересмотр того или иного стандарта. Так, в декабре 2020 г. после двух лет публичного обсуждения со всеми заинтересованными техническими специалистами профильных предприятий и организаций был

принят, а в 2021 г. опубликован ГОСТ 5640-2020 [8], где использованы новые стандартные шкалы для феррито-бейнитных сталей и количественная методика оценки полосчатости с помощью анализа изображения, заимствованные из работ [2, 4]. К сожалению, эта методика в ГОСТ 5640-2020 введена факультативно, тогда как в ASTM E1268-19 она стала основой стандарта.

В последние 20 лет для поиска закономерностей «структура-свойства» проводятся системные исследования по оцифровке структуры сталей и сплавов различного назначения [1, 2, 4–30]. Кроме уже упомянутой полосчатости, реализованной в ASTM E1268-19 [7] и ГОСТ 5640-2020 [8], это касается количественной оценки других структурных составляющих сталей и сплавов: микроструктурной неоднородности в листовом прокате [9–11]; неметаллических включений в стали [12–17], включая не только автоматизацию ГОСТ 1778-70 [12], но новые методы оценки с использованием ASTM E1245 [13] и статистики экстремальных значений [14, 15], автоматического анализа частиц для объективной оценки их химического состава [16, 17]; центральной осевой неоднородности сляба и ликвационной полосы в листовом прокате [18, 19]; доли грубых бейнитных блоков для описания свойств современных трубных сталей [20, 21]; структуры швов после многопроходной сварки [22, 23]; металлургического качества суперсплавов [24]; структуры сплавов, обработанных в полутвердом состоянии [25]; структуры доэвтектических силуминов [26, 27]; оценки неметаллических включений в алюминиевых сплавах методом PoDFA [28], структуры высокопрочного чугуна [29]; распределения зерен по размерам [30]. Остановимся кратко на некоторых из них.

Разработана методика оценки анизотропии микроструктуры по толщине листового проката, основанная на текстурном анализе изображения [9]. Методика предусматривает оценку анизотропии на двух размерных уровнях: в ближнем и дальнем окружении, которые характеризуют вытянутость вдоль линии прокатки мелких и крупных структурных элементов соответственно. Выполнен сравнительный автоматизированный комплексный анализ микроструктурной неоднородности листового проката из низколегированных хладостойких сталей арктического применения толщиной 25, 50 и 70 мм, изготовленного по технологии термомеханической обработки с различными температурно-деформационными параметрами [10]. Полученные результаты количественной оценки микроструктурной неоднородности по толщине листового проката использованы для ее детальной интерпретации с учетом металлургической наследственности сляба и особенностей технологии двухстадийной термомеханической обработки с ускоренным охлаждением [11].

Разработана методика автоматического разделения неметаллических включений по всем типам, предусмотренным методом Ш6 ГОСТ 1778-70 [12]. На основе результатов «оцифровки» эталонных шкал, а также с учетом уравнений, положенных в основу их создания, обоснованы формулы для пересчета объемного процента включений в балл, соответствующей шкалы ГОСТ 1778-70. Таким образом, ГОСТ 1778-70 гармонизирован с ASTM E1245. Балл назначается на основе стереологических параметров, измеренных для каждого из найденных типов включений при панорамных исследованиях с помощью автоматического анализатора изображений.

Разработана методика оценки загрязненности неметаллическими включениями (НВ) ковеной обечайки из сверхкрупного слитка массой 420 т. Методика основана на отдельной оценке мелких эндогенных и крупных экзоэндогенных НВ согласно гипотезе о том, что крупные составляют не более 5% от общего числа всех найденных НВ. Для оценки мелких эндогенных НВ использован стандарт ASTM E 1245, а для крупных экзоэндогенных – модифицированный ГОСТ 1778-70 применительно к панораме всей поверхности образца площадью 300 мм². Такой подход позволил существенно повысить точность измерений загрязненности НВ в поковках из сверхкрупных слитков массой до 420 т стали 15X2НМФА кл. 1 [13].

Рассмотрены практические примеры использования методов статистики экстремальных значений, реализованной в ASTM E 2283, для оценки НВ в сталях ответственного назначения. Предложена оригинальная методика интерпретации результатов измерений, полученных по стандарту ASTM E 2283, позволяющая расширить границы его применимости на экзогенные включения. Показано, что методику ASTM E2283 можно применять не только для прогнозирования максимально возможных эндогенных НВ, но и для выявления случайных одиночных экзогенных включений среди всех обнаруженных НВ, а также для прогнозирования размеров максимально возможных экзогенных включений, если последние имеют системный источник попадания в расплав и описываются соответствующим распределением Гумбеля [14, 15].

На примере высокопрочной низколегированной стали [16] и рельсовой стали [17] показаны новые возможности автоматизированного метода анализа частиц для оценки загрязненности стали неметаллическими

включениями. Базы данных по составу включений с большим количеством анализируемых частиц в сочетании с методами термодинамического моделирования позволяют определить природу включений с учетом всего многообразия теплофизических, гидродинамических и физико-химических процессов, протекающих в жидкой и затвердевающей стали. Полученные данные по количеству и составу включений обеспечивают адекватное описание процессов раскисления и модифицирования стали по ходу технологического передела и могут быть использованы для совершенствования технологии ее производства.

Для оценки ликвационной полосы в листовом прокате использованы как прямые металлографические методы обработки изображений с помощью преобразования Фурье, так и метод микротвердости, позволяющий косвенно оценить концентрации сегрегаций, наследуемых в полосе от осевой неоднородности литой заготовки [18]. Выявлена корреляция между классом ликвационной полосы в листе и характером распределения сегрегационных точек в осевой зоне сляба. Широкая зона сегрегаций в осевой зоне сляба всегда приводит к высокому классу ликвационной полосы в листе при любой объемной доле точек сегрегации в слябе. В узкой центральной зоне осевой сегрегации сляба класс ликвационной полосы в листе линейно возрастает с увеличением объемной доли точек сегрегации [19].

Для объективной количественной оценки всех видов структурной неоднородности в современных сталях для трубопроводов разработан и установлен на десятках предприятий и компаний анализатор изображения Thixomet PRO [20]. Структурная неоднородность, оцениваемая по объемной доле и размеру вытянутых блоков бейнита реечной морфологии [21], адекватно описывает все механические свойства трубных сталей с пределом текучести от 485 до 625 Н/мм² [20].

Установлены закономерности «структура–свойства» для нижних слоев сварного соединения при многопроходной электродуговой автоматической сварке порошковой проволокой в среде защитных газов на примере штрипса категории прочности X70 (09Г2ФБЮ) толщиной до 25 мм. Объемная доля аллотриоморфного феррита измерена на панорамных изображениях под поверхностью разрушения образцов на ударный изгиб. Сформулированы требования к его доле, гарантирующей высокую ударную вязкость нижних слоев сварного соединения [22, 23].

Оценка металлургического качества паспортной шихтовой заготовки жаропрочного никелевого сплава проводится по комплексным критериям, позволяющим по уровню серого, морфологии и характера взаимного расположения распознать оксидные пленки, нитридные кластеры и шлаковые глобулы. Рейтинговый балл металлургического качества турбинных лопаток рассчитывается с учетом количества, размера и трудности удаления из расплава этих загрязнений [24].

Разработаны металлографические методы оценки структуры алюминиевых сплавов после их обработки в полутвердом состоянии: распределение пористости, концентрации кремния, фактора формы зерен α -Al по сечению литой заготовки, а также многосвязности 3D-структуры этих сплавов [25].

Разработаны методики количественной оценки микроструктуры и установлены количественные закономерности «структура-свойства» для промышленных доэвтектических медистых силуминов [26, 27]. Методики основаны на анализе панорамных изображений и позволяют оценить дисперсность дендритной структуры, размер интерметаллидных включений, объемную долю эвтектики, ее морфологию, согласующуюся со шкалой микроструктур силуминов Американского общества литейщиков, а также пористость, согласующуюся с баллом по ГОСТ 1583-93.

Разработан и реализован в виде программного модуля анализатора изображений Thixomet Pro алгоритм автоматизированного определения загрязненности алюминиевых сплавов неметаллическими включениями по методике PoDFA [28]. Адаптивный алгоритм сегментации изображений позволяет автоматически распознавать скопления включений на фоне неравномерной по освещенности металлической матрицы, включая участки с рельефом металла, как со стороны металла на границе металл – фильтр, так и в порах фильтра, заполненных металлом на глубину до 0,5 мм. Скопления включений разных типов разделены автоматически по их оптическим и морфологическим признакам. Высокопроизводительный алгоритм кластеризации, основанный на построении евклидовой карты расстояний, позволяет в режиме реального времени группировать включения даже на полноразмерных панорамных изображениях всей поверхности шлифа с учетом объединения включений по методике PoDFA.

Все эти методики реализованы в анализаторе изображения Thixomet и установлены в нескольких сотнях металлографических лабораторий России. Каждый день эти методики используются на предприятиях, но полученные результаты «оцифрованных» структур используют только в исследовательских целях, так как для их использования в приемо-сдаточных испытаниях отсутствует соответствующая нормативная база (ГОСТ).

Важной составляющей количественной металлографии является метрологическая ценность полученных результатов измерений. В России существует формальная процедура включения анализатора изображений в реестр средств измерений, основанная на измерениях объект-микрометра при разных увеличениях. Но реальные измерения микроstructures всегда связаны с более сложными измерениями, чем линейные. Поэтому измерение объект-микрометра следует использовать только для калибровки анализатора, а для оценки точности измерений микроstructures необходимо проводить межлабораторные круговые сличения, которые являются также и признанной практикой проверки работоспособности любого металлографического стандарта. Если методика измерений правильная, то результаты «оцифровки» структуры должны быть статистически одинаковыми при измерении одних и тех же изображений в любой лаборатории, оснащенной приборами и программным обеспечением, прошедшими межлабораторные круговые сличения. Организатор этих сличений рассылает в разные металлографические лаборатории изображения структур, где каждая из них «оцифровывается» согласно методике, принятой в стандарте. Далее все первичные результаты «оцифровки» от всех лабораторий поступают организатору межлабораторных круговых сличений, который их обрабатывает, определяя средние значения и доверительный интервал по каждой группе структур. Эти обобщенные результаты рассылаются всем участникам, которые сами смогут оценить метрологическую ценность полученных ими результатов «оцифровки» структуры.

Все пересмотренные или вновь создаваемые ГОСТ, посвященные количественной металлографии, должны быть проверены в межлабораторных круговых сличениях. Поэтому для каждого типа структур нужно приготовить серию их цифровых изображений, которые будут использованы для процедуры сличения.

Цифровая металлография с использованием анализаторов изображений, прошедших межлабораторные круговые сличения, существенно упростит приемо-сдаточные испытания между поставщиком и потребителем металлопродукции, когда технические эксперты будут сравнивать цифры, характеризующие качество микроstructures, а не спорить, какому баллу по их субъективному мнению соответствует данная микроstructure.

Сейчас на государственном уровне в России объявлен курс на «цифровую экономику», поэтому выполненные за последние 20 лет работы [1, 2, 4–31] по «цифровой металлографии» могли бы обрести статус отраслевых стандартов и ГОСТ, которые внесут значимый вклад в реализацию этой государственной программы.

Статья написана по материалам заявки на грант РНФ № 19–73–20075 «Цифровые технологии в металлографии для оценки структуры материалов», которая была не поддержана на конкурсе 2019 года «Проведение исследований на базе существующей научной инфраструктуры мирового уровня» Президентской программы исследовательских проектов, реализуемых ведущими учеными, в том числе молодыми учеными.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Kazakov A. A., Kiselev D.** Industrial Application of Thixomet Image Analyzer for Quantitative Description of Steel and Alloys. *Metallogr., Microstruct., Anal.*, 2016. Vol. 5. No. 4. p. 294–301, <http://dx.doi.org/10.1007/s13632-016-0289-6>.
2. Разработка методики количественной оценки микроструктурной полосчатости низколегированных трубных сталей с помощью автоматического анализа изображений. А. А. Казаков, Д. В. Киселев, С. В. Андреева и др. *Черные металлы*. 2007. № 7–8. С. 31–37.
3. ASTM E1268-01(2016), Standard Practice for Assessing the Degree of Banding or Orientation of Microstructures, ASTM International, West Conshohocken, PA. 2016. www.astm.org.
4. **Kazakov A., Kiselev D., Kazakova E., Vander Voort G. F., Chigintsev L.** Quantitative Description of Microstructural Banding in Steels. *Materials Performance and Characterization*, <https://doi.org/10.1520/MPC20160009>. ISSN 2165–3992.
5. **Kazakov A., Vander Voort G. F., Kiselev D., Kazakova E.** ASTM E1268: From Improvement to the New Standard Practice for Assessing the Degree of Banding or Orientation of Microstructures by Automatic Image Analysis, 100 Years of E04 Development of Metallography Standards, ASTM STP1607. <http://dx.doi.org/10.1520/STP1607201702063>.
6. ASTM E1268-18, Standard Practice for Assessing the Degree of Banding or Orientation of Microstructures, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, www.astm.org.
7. ASTM E1268-19, Standard Practice for Assessing the Degree of Banding or Orientation of Microstructures, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, www.astm.org.
8. ГОСТ 5640-2020 СТАЛЬ. Сталь. Металлографический метод оценки микроstructures проката стального плоского, <http://protect.gost.ru/document1.aspx?control=31&baseC=6&page=0&month=9&year=-1&search=&id=239643>.
9. Методика оценки микроструктурной неоднородности по толщине листового проката из хладостойкой низколегированной стали арктического применения / А. А. Казаков, Д. В. Киселев, О. В. Сыч, Е. И. Хлусова // *Черные металлы*. 2020. № 9. С. 11–19.

10. Quantitative Assessment of Microstructural Inhomogeneity by Thickness of Hot-Rolled Plates Made of Cold-Resistant Low-Alloy Steel for Arctic Applications / A. A. Kazakov, D. V. Kiselev, O. V. Sych, E. I. Khlusova. *CIS Iron and Steel Review*. 2020. Vol. 20. P. 41–49.
11. Количественная оценка структурной неоднородности в листовом прокате из хладостойкой низколегированной стали для интерпретации технологических особенностей его изготовления / А. А. Казаков, Д. В. Киселев, О. В. Сыч, Е. И. Хлусова // *Черные металлы*. 2020. № 11. С. 4–14.
12. 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 // *Черные металлы*. 2007. № 7–8. С. 24–31.
13. Количественная оценка неметаллических включений для поковок из сверхкрупных слитков / А. А. Казаков, А. И. Житенев, Э. Ю. Колпишон, М. А. Салынова // *Черные металлы*. 2018. № 7. С. 50–56.
14. Extension of ASTM E2283 standard practice for the assessment of large exogenous nonmetallic inclusions in super duty steels / A. A. Kazakov, A. I. Zhitenev, M. A. Salinova. *CIS Iron and Steel Review*. 2019. Vol. 18. P. 20–26.
15. **Казаков А.А., Житенев А.И., Салынова М.А.** Расширение возможностей статистики экстремальных значений для оценки природы крупных неметаллических включений в сталях ответственного назначения // *Черные металлы*. 2019. № 8. С. 46–50.
16. Исследование природы неметаллических включений в стали с помощью автоматического анализатора частиц / А. А. Казаков, Д. А. Любочко, С. В. Рябшук, Л. С. Чигинцев // *Черные металлы*. 2014. № 4 (988). С. 37–42.
17. **Kazakov A., Zhitenev A., Ryaboshuk S.** Interpretation and Classification of Non-Metallic Inclusions // *Materials Performance and Characterization*, <https://doi.org/10.1520/MPC20160040>. ISSN 2165–3992.
18. 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.
19. Assessment of central heterogeneity in slab to forecast centerline segregation in plate steel / A. A. Kazakov, E. I. Kazakova, A. A. Kur // *CIS Iron and Steel Review*. 2018. Vol. 16. P. 49–52.
20. Microstructural quantification for pipeline steel structure-property relationships / A. Kazakov, D. Kiselev, O. Pakhomova // *CIS Iron and Steel Review*. 2012. P. 4–12.
21. Investigation of the Origin of Coarse-Grained Bainite in X70 Pipeline Steels by EBSD Technique / N. Zolotarevsky, E. Kazakova, A. Kazakov, S. Petrov, S. Panpurin // *Materials Performance and Characterization*. <https://doi.org/10.1520/MPC20160031>.
22. Structural Investigation and Control of Multi-Pass Gas-Shielded Flux-Cored Arc Weldments / A. Kazakov, E. Kazakova, M. Karasev, D. Lubochko // *Materials Performance and Characterization*, <https://doi.org/10.1520/MPC20160035>.
23. Влияние структуры на свойства нижних слоев сварных швов при многопроходной электродуговой сварке стали 09Г2ФБЮ порошковой проволокой в среде защитных газов / А. А. Казаков, М. В. Карасев, Е. И. Казакова // *Сварка и диагностика*. 2017. № 4. С. 47–54.
24. **Kazakov A. A., Kiselev D. V.** Metallurgical Quality Characterization of Nickel-Based Superalloys // *CIS Iron and Steel Review*. 2007. No. 1–2. P. 40–43.
25. **Kazakov A. A., Luong N. H.** Characterization of Semisolid Materials Structure // *Mater. Character.* 2001. Vol. 46. No. 2–3. P. 155–161.
26. Quantitative Characterization of Hypoeutectic Aluminum–Silicon–Copper As-Cast Alloy Microstructures / Kazakov A., Kur A., Kazakova E., Kiselev D. // *Materials Performance and Characterization*. <https://doi.org/10.1520/MPC20160025>.
27. Разработка количественных методов оценки структуры доэвтектических силуминов для прогнозирования их механических свойств // А. А. Казаков, А. А. Кур, Д. В. Киселев, Е. Б. Лазутова // *Цветные металлы*. 2014. № 4. С. 39–43.
28. **Казаков А.А., Киселев Д.В., Кур А.А.** Автоматизированная оценка неметаллических включений в алюминиевых сплавах по методике PoDFA с помощью анализа изображений // *Цветные металлы*. 2019, № 3(915), С. 43–51.
29. **Казаков А.А., Андреева С.В., Киселев Д.В.** Количественная оценка параметров структуры высокопрочного чугуна как основа прогнозирования механических свойств // *Тр. СПбГТУ*. 2009. № 510. С. 200–208.
30. **Vander Voort G. F., Pakhomova O., Kazakov A.** Evaluation of Normal Versus Non-Normal Grain Size Distributions // *Materials Performance and Characterization*. <https://doi.org/10.1520/MPC20160001>. ISSN 2165–3992.

REFERENCES

1. **Kazakov A.A., Kiselev D. V.** Industrial Application of Thixomet Image Analyzer for Quantitative Description of Steel and Alloys. *Metallogr., Microstruct., Anal.*, 2016, Vol.5, No. 4, pp. 294–301, <http://dx.doi.org/10.1007/s13632-016-0289-6>.
2. **Kazakov A.A., Kiselev D.V., Andreeva S.V., Chigincev L.S., Golovin S.V., Egorov V.A., Markov S.I.** Razrabotka metodiki kolichestvennoj ocenki mikrostrukturnoj poloschatosti nizkolegированных trubnyh stalej s pomoshh'ju avtomaticheskogo analiza izobrazhenij [Development of a technique for quantitative assessment of microstructural banding of low-alloy pipe steels using automatic image analysis]. *Chernye metalli = Black metals*, 2007, no. 7–8, pp. 31–37.
3. ASTM E1268–01(2016), Standard Practice for Assessing the Degree of Banding or Orientation of Microstructures, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org.
4. **Kazakov A.A., Kiselev D.V., Kazakova E.I., Vander Voort G.F., Chigintsev L.** Quantitative Description of Microstructural Banding in Steels. *Materials Performance and Characterization*, <https://doi.org/10.1520/MPC20160009>. ISSN 2165–3992.
5. **Kazakov A.A., Vander Voort G.F., Kiselev D.V., Kazakova E.I.** ASTM E1268: From Improvement to the New Standard Practice for Assessing the Degree of Banding or Orientation of Microstructures by Automatic Image Analysis” 100 Years of E04 Development of Metallography Standards, ASTM STP1607. <http://dx.doi.org/10.1520/STP1607201702063>.
6. ASTM E1268-18, Standard Practice for Assessing the Degree of Banding or Orientation of Microstructures, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, www.astm.org.
7. ASTM E1268-19, Standard Practice for Assessing the Degree of Banding or Orientation of Microstructures, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, www.astm.org.

8. GOST5640-2020. STAL. Stal'. Metallograficheskij metod ocenki mikrostruktury prokata stal'nogo ploskogo [State Standart 5640-2020. STEEL. Steel. Metallographic method for evaluating the microstructure of flat steel rolled products].
9. **Kazakov A.A., Kiselev D.V., Sych O.V., Hlusova E.I.** Metodika ocenki mikrostrukturnoj neodnorodnosti po tolshhine listovogo prokata iz hladostojkoj nizkolegirovannoj stali arkticheskogo primenenija [Methods for assessing the microstructural heterogeneity in thickness of sheet products made of cold-resistant low-alloy steel for Arctic applications]. *Chernye metally = Black metals*, 2020, no. 9, pp. 11-19.
10. **Kazakov A.A., Kiselev D.V., Sych O.V., Khlusova E.I.** Quantitative Assessment of Microstructural Inhomogeneity by Thickness of Hot-Rolled Plates Made of Cold-Resistant Low-Alloy Steel for Arctic Applications, *CIS Iron and Steel Review*, 2020, Vol. 20, pp. 41-49.
11. **Kazakov A.A., Kiselev D.V., Sych O.V., Hlusova E.I.** Kolichestvennaja ocenka strukturnoj neodnorodnosti v listovom prokate iz hladostojkoj nizkolegirovannoj stali dlja interpretacii tehnologicheskikh osobennostej ego izgotovlenija [Quantitative Assessment of Structural Inhomogeneity in Cold-Resistant Low-Alloy Steel Sheets for Interpretation of the Technological Features of Its Manufacturing]. *Chernye metally = Black metals*, 2020, no. 11, pp. 4-14.
12. **Kazakov A.A., Kiselev D.V., Andreeva S.V., Mjasnikov A.A., Golovin S.V., Egorov V.A.** Razrabotka metodiki kolichestvennoj ocenki zagryzannosti nizkolegirovannyh trubnyh stalej nemetallicheskimii vkljuchenijami s pomoshh'ju avtomaticheskogo analiza izobrazhenij [Development of a method for quantitative assessment of contamination of low-alloy pipe steels with non-metallic inclusions using automatic image analysis]. *Chernye metally = Black metals*, 2007, no. 7-8, pp. 24-31.
13. **Kazakov A.A., Zhitenev A.I., Kolpishon Je. Ju., Salynova M.A.** Kolichestvennaja ocenka nemetallicheskih vkljuchenij dlja pokovok iz sverhkrupnyh slitkov [Quantification of nonmetallic inclusions for extra large ingot forgings]. *Chernye metally = Black metals*, 2018, no.7, pp. 50-56.
14. **Kazakov A.A., Zhitenev A.I., Salynova M.A.** Extension of ASTM E2283 standard practice for the assessment of large exogenous nonmetallic inclusions in super duty steels. *CIS Iron and Steel Review*, 2019, vol. 18, pp. 20-26.
15. **Kazakov A.A., Zhitenev A.I., Salynova M.A.** Rasshirenie vozmozhnostej statistiki jekstremal'nyh znachenij dlja ocenki prirody krupnyh nemetallicheskih vkljuchenij v staljah otvetstvennogo naznachenija [Expanding the capabilities of extreme value statistics for assessing the nature of large non-metallic inclusions in critical steels]. *Chernye metally = Black metals*, 2019, no. 8, pp.46-50.
16. **Kazakov A.A., Ljubochko D.A., Rjaboshuk S.V., Chigincev L.S.** Issledovanie prirody nemetallicheskih vkljuchenij v stali s pomoshh'ju avtomaticheskogo analizatora chastic [Investigation of the nature of non-metallic inclusions in steel using an automatic particle analyzer]. *Chernye metally = Black metals*, 2014, no. 4 (988), pp. 37-42.
17. **Kazakov A.A., Zhitenev A., Ryaboshuk S.** Interpretation and Classification of Non-Metallic Inclusions. *Materials Performance and Characterization*. <https://doi.org/10.1520/MPC20160040>. ISSN 2165-3992.
18. **Kazakov A.A., Chigincev L.S., Kazakova E.I., Rjaboshuk S.V., Markov S.I.** Metodika ocenki likvacionnoj polosity listovogo prokata [Methodology for evaluating liquation strip of sheet metal]. *Chernye metally = Black metals*, 2009, no. 12, pp. 17-22.
19. **Kazakov A.A., Kazakova E.I., Kur A.A.** Assessment of central heterogeneity in slab to forecast centerline segregation in plate steel. *CIS Iron and Steel Review*, 2018, vol. 16, pp. 49-52.
20. **Kazakov A.A., Kiselev D.V., Pakhomova O.** Microstructural quantification for pipeline steel structure-property relationships. *CIS Iron and Steel Review*, 2012, pp. 4-12.
21. **Zolotarevsky N., Kazakova E., Kazakov A., Petrov S., Panpurin S.** Investigation of the Origin of Coarse-Grained Bainite in X70 Pipeline Steels by EBSD Technique. *Materials Performance and Characterization*, <https://doi.org/10.1520/MPC20160031>.
22. **Kazakov A., Kazakova E., Karasev M., Lubochko D.** Structural Investigation and Control of Multi-Pass Gas-Shielded Flux-Cored Arc Weldments. *Materials Performance and Characterization*, <https://doi.org/10.1520/MPC20160035>.
23. **Kazakov A.A., Karasev M.V., Kazakova E.I.** Vlijanie struktury na svojstva nizhnih sloev svarnyh shvov pri mnogoprohodnoj jelektrodugovoj svarke stali 09G2FBJu poroshkovej provolokoj v srede zashhitnyh gazov [Influence of the structure on the properties of the lower layers of welded joints in multipass electric arc welding of steel 09G2FBYU with flux-cored wire in a shielding gas environment]. *Svarka i diagnostika = Welding and diagnostics*, 2017, no.4, pp. 47-54.
24. **Kazakov A. A., Kiselev D. V.** Metallurgical Quality Characterization of Nickel-Based Superalloys. *CIS Iron and Steel Review*, 2007, no. 1-2, pp. 40-43.
25. **Kazakov A. A., Luong N.H.** Characterization of Semisolid Materials Structure. *Mater. Character.*, 2001, vol. 46, no. 2-3, pp. 155-161.
26. **Kazakov A., Kur A., Kazakova E., Kiselev D.** Quantitative Characterization of Hypoeutectic Aluminum-Silicon-Copper As-Cast Alloy Microstructures. *Materials Performance and Characterization*. <https://doi.org/10.1520/MPC20160025>.
27. **Kazakov A.A., Kur A.A., Kiselev D.V., Lazutova E.B.** Razrabotka kolichestvennyh metodov ocenki struktury dojevtkticheskikh siluminov dlja prognozirovanija ih mehanicheskikh svojstv [Development of quantitative methods for assessing the structure of hypoeutectic silumins to predict their mechanical properties]. *Cvetnye metally = Non-ferrous metals*, 2014, no. 4, pp. 39-43.
28. **Kazakov A.A., Kiselev D. V., Kur A.A.** Avtomatizirovannaja ocenka nemetallicheskih vkljuchenij v aljuminievyh splavah po metodike PoDFA s pomoshh'ju analiza izobrazhenij [Automated assessment of non-metallic inclusions in aluminum alloys by PoDFA method using image analysis]. *Cvetnye metally = Non-ferrous metals*, 2019, no. 3(915), pp. 43-51.
29. **Kazakov A.A., Andreeva S.V., Kiselev D.V.** Kolichestvennaja ocenka parametrov struktury vysokoprochnogo chuguna kak osnova prognozirovanija mehanicheskikh svojstv [Quantitative Assessment of the Structure Parameters of Ductile Iron as a Basis for Predicting Mechanical Properties]. *SPbGTU Publ.*, 2009, no. 510, pp. 200-208.
30. **Vander Voort G. F., Pakhomova O., Kazakov A.** Evaluation of Normal Versus Non-Normal Grain Size Distributions. *Materials Performance and Characterization*. <https://doi.org/10.1520/MPC20160001>. ISSN 2165-3992.