а внутренние слои со структурой аустенита существенно расширяются в объеме. Это является причиной поверхностных продольных разрывов. При прокатке поверхностные трещины только усугубляются, образуя глубокую сетку, неисправимый зачисткой дефект. Поэтому оптимальной температурой для горячего посада НЛЗ из стали Т84S является $T \leq 600$ °С после полного окончания процесса рекалесценции.

Литература

1. Астапенко, И. В. Современные методы применения численного моделирования для решения технологических проблем горячей прокатки / И. В. Астапенко // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XXIV Междунар. науч.-техни. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 25–26 апр. 2024 г. : в 2 ч. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель, 2024. – С. 12–18.
2. Численное моделирование процесса прокатки трубы D 88,9 × 8 на редукционно-растяжном стане трубопрокатного агрегата ТПА 21/168 ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» / М. В. Оборов, И. А. Панковец, М. Н. Верещагин, И. В. Астапенко // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2016. – № 3 (1395). – С. 82–86.
3. Савченко, С. А. Оценка эффективности режимов гомогенизирующего отжига подшипниковых марок сталей на ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» / С. А. Савченко, В. И. Возная, И. В. Астапенко // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2021. – № 2 (85). – С. 52–61.
4. Астапенко, И. В. Применение искусственного интеллекта в металлургии: прогнозирование динамики охлаждения стали ШХ-15 / И. В. Астапенко, А. И. Астапенко // Проблемы современного образования в техническом вузе : материалы IX Междунар. науч.-метод. конф., Гомель, 23–24 окт. 2025 г. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель, 2026. – С. 21–23.

КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ МИКРОСТРУКТУРЫ СФЕРОИДИЗИРОВАННОЙ СТАЛИ ШХ-15 МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

А. И. Астапенко

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О.Сухого», Республика Беларусь

Научный руководитель И. В. Астапенко

Представлены результаты исследования микроструктуры сфероидизированной стали ШХ-15 методами машинного обучения. Исследования проведены на катанке диаметром 6,5 мм. Методами машинного обучения выполнен количественный анализ размеров зерен и расстояний между ними. Определено распределение размеров и расстояний по всей площади исследуемого изображения.

Ключевые слова: подшипниковая сталь, сфероидизированная структура, мелкодисперсный перлит, машинное обучение.

Цель работы – провести количественный анализ микроструктуры катанки сфероидизированной шарикоподшипниковой стали ШХ-15 методами машинного обучения.

Поставленная цель достигается решением следующих задач: разрабатываемый алгоритм идентификации параметров зерновой структуры разбит на несколько этапов, которые выполняются последовательно:

– предварительная обработка SEM-изображений (нормализация, фильтрация, подавление шума);

– выделение глобулей цементита методом *Laplacian of Gaussian* (*LoG*);

– определение координат центров и эквивалентных диаметров глобулей;

– вычисление количественных признаков: диаметр, расстояние до ближайшего соседа, локальная плотность;

– формирование векторного представления микроструктуры для последующего анализа.

Методика исследования. Для анализа количественных данных и классификации микроструктур применены методы и алгоритмы классического машинного обучения:

– k-NN (k-ближайших соседей) – для классификации зон микроструктуры (центр/край) и оценки степени сходства структур;

– k-means – для кластеризации микроструктур по степени сфероидизации и выявления скрытых групп;

– PCA (метод главных компонент) – для снижения размерности и визуализации многомерных признаков;

– нормализация и стандартизация признаков – для корректной работы алгоритмов и повышения устойчивости классификации.

Объектом исследования в работе является микроструктура катанки сфероидизированной шарикоподшипниковой стали ШХ-15.

Катанка диаметром 6,5 мм прокатывается в линии катанки из непрерывнолитой заготовки 250 × 300 или 140 ×140 мм согласно универсальной схеме калибровки, применяемой для прокатки сортовых и арматурных профилей.

Для получения равномерной микроструктуры был разработан усовершенствованный режим поточной термообработки, способствующий снижению карбидной неоднородности: начальное поэтапное охлаждение водой (расход воды – 150–480 $м^3$/ч) до 870 °С в зоне виткообразователя и последующее охлаждение воздухом на роликовом конвейере вентиляторами с требуемой для диаметра 6,5 мм мощностью подачи воздуха [1].

Начальная температура охлаждения в зоне виткообразователя была принята равной 870 ± 20 °С (выше точки A_{c3} (A_{cm})) как наиболее эффективная для формирования мелкодисперсной структуры без образования заметной карбидной сетки и закалочных структур при разных скоростях охлаждения [2]. Были отобраны образцы и с помощью электронного микроскопа TESCAN VEGA GMS с энергодисперсионным микроанализатором AztecLive Automated Ultim Max 6 получены изображения микроструктуры.

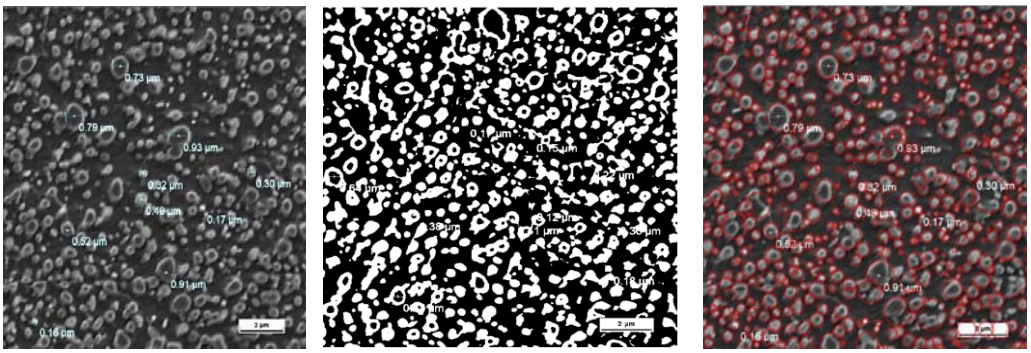
На втором этапе катанка была подвергнута циклическому сфероидизирующему отжигу маятникового типа с двумя циклами – нагрев/охлаждение [3]. Были отобраны образцы и получены изображения сфероидизированной микроструктуры.

На следующем этапе была выполнена обработка изображений. Исходные данные – фотографии сфероидизированной стали (рис. 1, *а*): светлые округлые карбидные глобулы на более темной матрице. Снимки хранятся в формате PNG с глубиной шестнадцать бит. Для обработки и вывода изображений используется линейное растяжение контраста от минимальной к максимальной яркости кадра. Масштаб задается по линейке на изображении: шестьдесят пять пикселей соответствуют двум микрометрам; все размеры и расстояния переводятся в микрометры через этот коэффициент.

Выделение глобул строится на морфологическом преобразовании white top-hat («белая шляпа»). Для каждой точки оценивается локальный фон в окрестности заданного радиуса; из яркости вычитается этот фон, и остаются только участки, за-

метно светлее окружения. Обработка выполняется в двух масштабах – с малым и большим радиусом окрестности, после чего берется больший отклик, чтобы одновременно учитывать мелкие и более крупные включения.

Далее изображение слегка сглаживается для подавления зернистого шума СЭМ и бинаризуется порогом Оцу: алгоритм по гистограмме яркостей разделяет кадр на фон и объекты с наилучшим контрастом между классами; порог слегка занижают, чтобы не пропустить менее яркие глобулы (рис. 1, *б*). Маску очищают от слишком мелких связных областей, одиночного шума и мелких разрывов внутри глобул морфологическими операциями открытия и закрытия; отбраковывают чрезмерно крупные пятна (рис. 1, *в*).

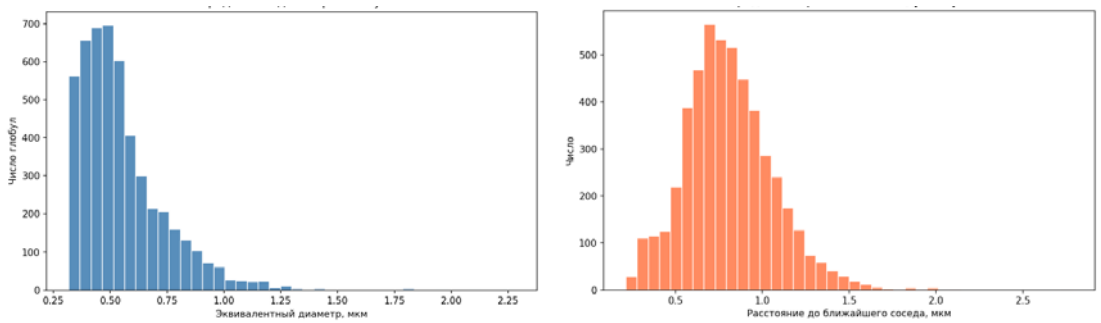


а) *б*) *в*)

Рис. 1. Этапы обработки изображений:
а – исходное; *б* – метод Оцу; *в* – сегментирование

Слипшиеся глобулы разделяют сегментацией по водоразделам: строим карту расстояния от каждого пикселя объекта до фона, находят локальные максимумы как центры включений и проводят границы по «гребням» между соседними максимумами.

Для каждой области по методике [4] вычисляют площадь, эквивалентный диаметр (диаметр круга той же площади), координаты центроида и при необходимости – округлость контура (рис. 2, *а*). Расстояние до ближайшего соседа в поле зрения определяют по центроидам всех глобул на кадре (рис. 2, *б*).



а) *б*)

Рис. 2. Количественная оценка микроструктуры:
а – распределение диаметров глобулей, мкм;
б – распределение расстояний между глобулами, мкм

Таким образом, в результате исследования выполнено следующее:

1. Разработана методика и алгоритм обработки сфероидизированной микроструктуры стали ШХ-15.

2. Построена модель обработки данных и проведено ее машинное обучение.

3. Получены количественные результаты обработки данных по размеру глобулей и расстоянию между их центрами.

Литература

1. Исследование факторов, способствующих снижению карбидной неоднородности в подшипниковых марках стали / И. А. Панковец, С. А. Савченко, В. И. Ввозная [и др.] // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2021. – № 77 (7). – С. 804–810. – DOI 10.32339/0135-5910-2021-7-804-810
2. Особенности формирования мелкодисперсной структуры бунтового проката подшипниковой стали / С. А. Савченко, И. А. Ковалева, И. В. Астапенко, А. Б. Сычков // Черные металлы. – 2024. – № 4. – С. 32–38. – DOI 10.17580/chm.2024.04.05
3. Совершенствование технологии сфероидизирующего отжига бунтового проката из подшипниковой стали / С. А. Савченко, И. А. Ковалева, И. В. Астапенко, А. Б. Сычков // Вестник Магнитогорского государственного технического университета имени Г. И. Носова. – 2025. – Т. 23, № 1. – С. 62–72. – DOI 10.18503/1995-2732-2025-23-1-62-72
4. Астапенко, И. В. Применение искусственного интеллекта в металлургии: прогнозирование динамики охлаждения стали ШХ-15 / И. В. Астапенко, А. И. Астапенко // Проблемы современного образования в техническом вузе : материалы IX Междунар. науч.-метод. конф., Гомель, 23–24 окт. 2025 г. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель, 2026. – С. 21–23.

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ АНАЛИЗА ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ НА КАЧЕСТВО ПРОКАТА

А. И. Астапенко

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Научный руководитель И. В. Астапенко

Представлены результаты исследования, методами машинного обучения, влияния технологических параметров непрерывной разливки на качество непрерывнолитых заготовок сечением 250 × 300 мм и 300 × 400 мм из рельсовых марок стали (Э76Ф, R350HT). Выполнен анализ влияния на центральную пористость и осевую ликвацию температуры разливки, тока электромагнитного перемешивания стали в кристаллизаторе, скорости разливки и номера ручья.

Ключевые слова: непрерывнолитая заготовка, электромагнитное перемешивание; центральная пористость, осевая ликвация, температура и скорость разливки, машинное обучение.

Цель работы – провести, методами машинного обучения, анализ влияния технологических параметров непрерывной разливки на качество непрерывнолитых заготовок из рельсовых марок стали.

Поставленная цель достигается решением следующих задач:

– сбор технологических данных МНЛЗ-3;

– очистка данных и устранение пропусков;