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;

– преобразование диапазонов параметров;
– формирование количественных признаков;
– нормализация и кодирование категориальных данных.

В процессе разработки технологии плавки и разливки рельсовых сталей Э76Ф и R350HT [1] был разработан технологический режим разливки, обеспечивающий получение требуемых качественных показателей. Основные параметры разливки изменялись в диапазонах, представленных в таблице.

Диапазоны изменения технологических параметров разливки

Номер ручья	Температура разливки *T*, °С	Скорость разливки υ, м/с	Ток ЭМП, А
1	1472,5–1490,0	0,3–0,9	450–550
2			
3			
4			

При освоении производства использована технология выплавки, внепечной обработки, разливки непрерывнолитой заготовки для высокоуглеродистых сталей, имеющая ограничения в части содержания алюминия [2]. Разливка по каждому корелируемому режиму завершалась отбором образцов. Оценка качественных показателей отобранных образцов осуществлялась по методике [3]. После окончания производственных мероприятий выполнен сбор массива данных и дальнейшая их обработка по методике [4].

Подготовка данных. Объектом анализа послужил массив производственных данных непрерывной разливки рельсовой заготовки ($n = 160$ наблюдений). Исходная таблица содержала многоуровневую структуру заголовков; выполнена нормализация наименований и извлечение технологических признаков: средняя температура и ее размах, скорость разливки, ток электромагнитного перемешивания по ручьям, режим мягкого обжатия, номер ручья. Целевые показатели – бинарные метки брака по центральной пористости и осевой ликвации при пороге ≥ 2 балла (в соответствии с действующей заводской классификацией). Нерелевантные и дублирующие поля исключены. С учетом ограниченного объема выборки – отказ от фиксированного разбиения «обучение-тест»; применена повторяющаяся стратифицированная k-fold-кросс-валидация (5 фолдов × 10 повторов) для устойчивой оценки качества.

Моделирование. Задача сформулирована как бинарная классификация двух независимых дефектов. Для центральной пористости использован Random Forest (A_base, без аугментации); для осевой ликвации – Extra Trees с робастной предобработкой признаков (winsorization) и SMOTE внутри обучающих фолдов. Гиперпараметры заданы умеренно жестко (ограниченная глубина деревьев) во избежание переобучения на малой выборке. Порог отнесения к классу «брак» определен по out-of-fold-предсказаниям: для пористости – по F0.5, для ликвации – по F1. По результатам моделирования определена степень влияния параметров разливки на качественные показатели непрерывнолитой заготовки (рис. 1).

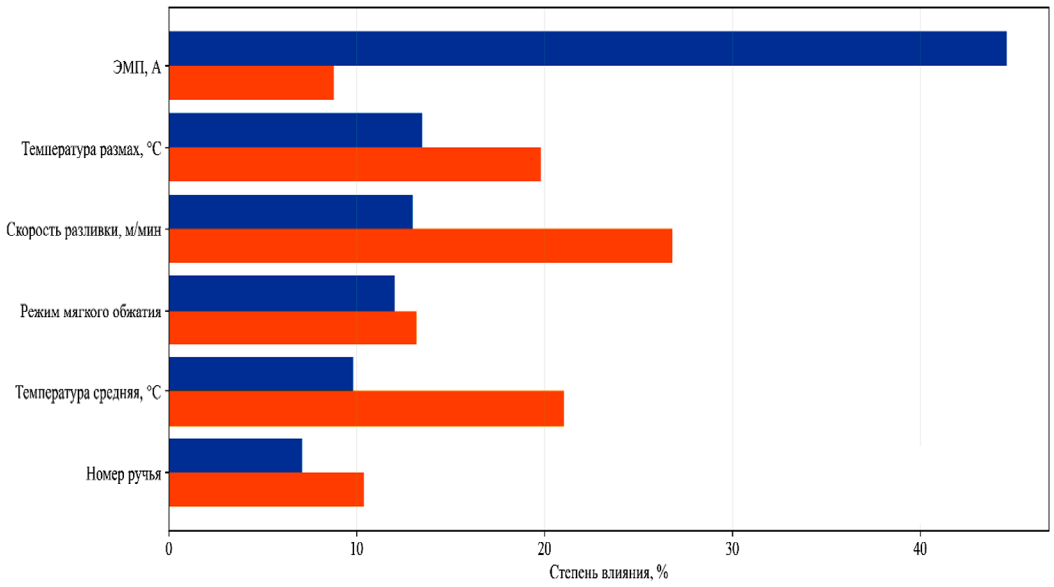


Рис. 1. Степень влияния параметров разливки
на качественные показатели:
– осевая ликвация, %; – центральная пористость, %

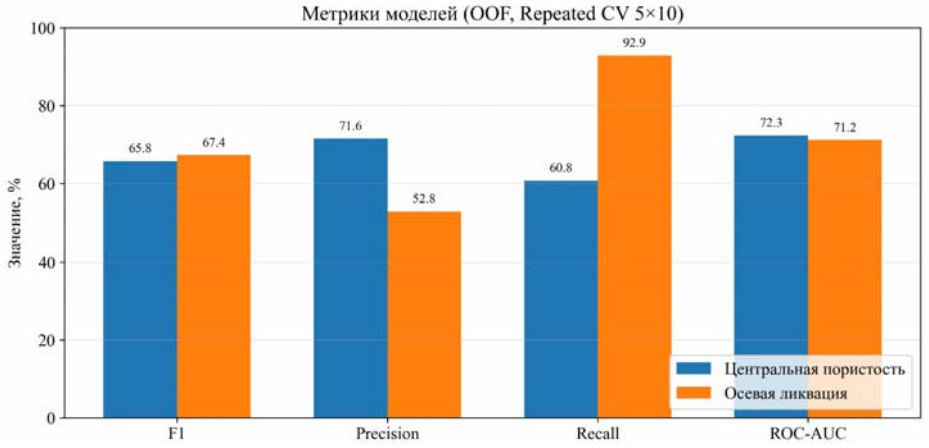
Оценка результатов исследования. Качество моделей оценено по метрикам precision, recall, F1 и ROC-AUC на OOF-выборке. Для центральной пористости: F1 ≈ 0,66; Precision ≈ 0,72; Recall ≈ 0,61; ROC-AUC ≈ 0,72. Для осевой ликвации: F1 ≈ 0,67; Precision ≈ 0,53; Recall ≈ 0,93; ROC-AUC ≈ 0,71.

Центральная пористость. Для ее прогнозирования использована модель случайного леса (Random Forest). Обучение выполнено на 160 разливках; брак учитывался при оценке от 2 баллов. По результатам перекрестной проверки модель в целом верно определяет наличие или отсутствие дефекта в около 66 % случаев. Среди заготовок, которые модель относит к браку, верный прогноз дается в 72 % случаев; выявляется 61 % всех реальных дефектов. Интегральная предсказательная способность модели – 72 % (ROC-AUC).

Осевая ликвация. Для ее прогнозирования использована модель Extra Trees (экстра-деревья) с робастной обработкой признаков и балансировкой классов в обучающей выборке. Совокупная точность классификации – около 67 %; модель обнаруживает 93 % реальных случаев ликвации. Среди заготовок, отмеченных моделью как дефектные, верно классифицировано 53 %. Интегральная предсказательная способность – 71 % (ROC-AUC).

Интерпретируемость обеспечена анализом важности признаков (feature importances): для ликвации доминируют ЭМП и режим мягкого обжатия, для пористости – скорость разливки и температурный размах. Модели позиционируются как система раннего предупреждения по параметрам разливки и не заменяют контроль качества готовой непрерывнолитой заготовки (рис. 2).

Применение методов машинного обучения в обработке данных непрерывной разливки рельсовой стали позволило установить количественные зависимости между технологическими параметрами и формированием внутренних дефектов непрерывнолитых заготовок.



а) *б*)

Рис. 2. Сравнение моделей по ключевым метрикам:
а – F1; Precision; *б* – Recall; ROC-AUC

Построенные модели показали высокую точность прогноза осевой ликвации и центральной пористости и выявили ключевые факторы, определяющие качество заготовки. Полученные результаты подтверждают возможность использования искусственного интеллекта как инструмента оптимизации режимов разливки и повышения стабильности качества рельсовой продукции.

Литература

1. Путеев, В. С. Разработка технологии производства рельсовой заготовки / В. С. Путеев, И. О. Писаренко // Сталь. – 2024. – № 9. – С. 8–14.
2. Савченко, С. А. Влияние гомогенизирующего отжига непрерывнолитой заготовки на уровень карбидной сегрегации в бунтовом прокате из подшипниковой стали / С. А. Савченко, И. А. Ковалева, И. В. Астапенко // Металлург. – 2025. – № 6. – С. 17–21.
3. Савченко, С. А. Влияние гомогенизирующего отжига непрерывнолитых заготовок на структуру и механические свойства бунтового проката из подшипниковой стали ШХ15 / С. А. Савченко, И. А. Ковалева, И. В. Астапенко // Сталь. – 2025. – № 8. – С. 45–50.
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.