АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК ПРИ ГОРЯЧЕМ ПОСАДЕ НА КАЧЕСТВО ПРОКАТА

В. М. Бубнов

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

Научный руководитель И. В. Астапенко

Представлены результаты исследования методами машинного обучения причин образования дефектов «сетчатые трещины» при нагреве с горячего посада непрерывнолитых заготовок сечением 250 × 300 мм из стали Т84S. Установлено влияние явления рекалесценции на образование дефектов из-за разного температурного расширения внешних и внутренних слоев в диапазоне температур перехода γ-железа в α-железо, сопровождаемого выделением тепловой энергии.

Ключевые слова: сетчатые трещины, рекалесценция, непрерывнолитая заготовка, горячий посад, перлитная колония.

Объектом исследования является технологический процесс нагрева непрерывнолитых заготовок (далее – НЛЗ) сечением 250 × 300 мм из стали Т84S в условиях стана 850.

Цель работы – определение причин образования дефекта «сетчатые трещины» при прокатке НЛЗ 250 × 300 мм на круг Ø 160 мм с горячего посада в условиях стана 850.

Поставленная цель достигается решением следующих задач:

– обработка исходных данных;

– разработка модели и ее машинное обучение. Проведение численного исследования по данным натурного эксперимента по методикам [1, 2];

– анализ результатов и формулирование выводов.

Непрерывнолитые заготовки 250 × 300 мм производятся по штатной технологической схеме с учетом марки стали, применяемой для прокатки сортовых и арматурных профилей. С загрузочных решеток НЛЗ нагреваются в методической печи до температуры 1245–1265 °С и прокатываются на реверсивном стане 850 [3].

При освоении проката Ø 160 мм из стали Т84S (аналог: автоматная сталь 13Г) был выполнен горячий посад НЛЗ 4-х плавок. При этом после первых двух плавок произошла аварийная ситуация и НЛЗ не садили в печь, оставляя их на решетках. Далее посад и прокатку продолжили, но НЛЗ за 2 ч простоя остыли в среднем на 80°. При этом первые плавки, прокатанные по штатному режиму, практически полностью были отправлены в брак из-за сетчатых продольных трещин, а плавки с подстуженными НЛЗ прокатаны почти без брака (см. таблицу). Разницы в режимах нагрева и прокатки по всем плавкам не было. Основным отличием были температура и время до посада.

Исходные данные

Температура блюмов	Время до посада	Результат
720–750 °С	~20 мин	Сетчатые трещины по всем штангам
620–660 °С	~100 мин	Минимальное количество поверхностных дефектов

Исходная выборка данных составила 92 записи – по 20–30 записей с каждой плавки. Метка качества задана на уровне плавки. Для каждой плавки построен технологический профиль как медианное значение параметров по ручьям: температура посада, время от окончания разливки до посада, время выдержки в нагревательной печи, пауза и длительность прокатки, суммарное время прокатки и доля паузы; отдельно учтены показатели химического состава (углерод, марганец, кремний, углеродный эквивалент) (рис. 1).

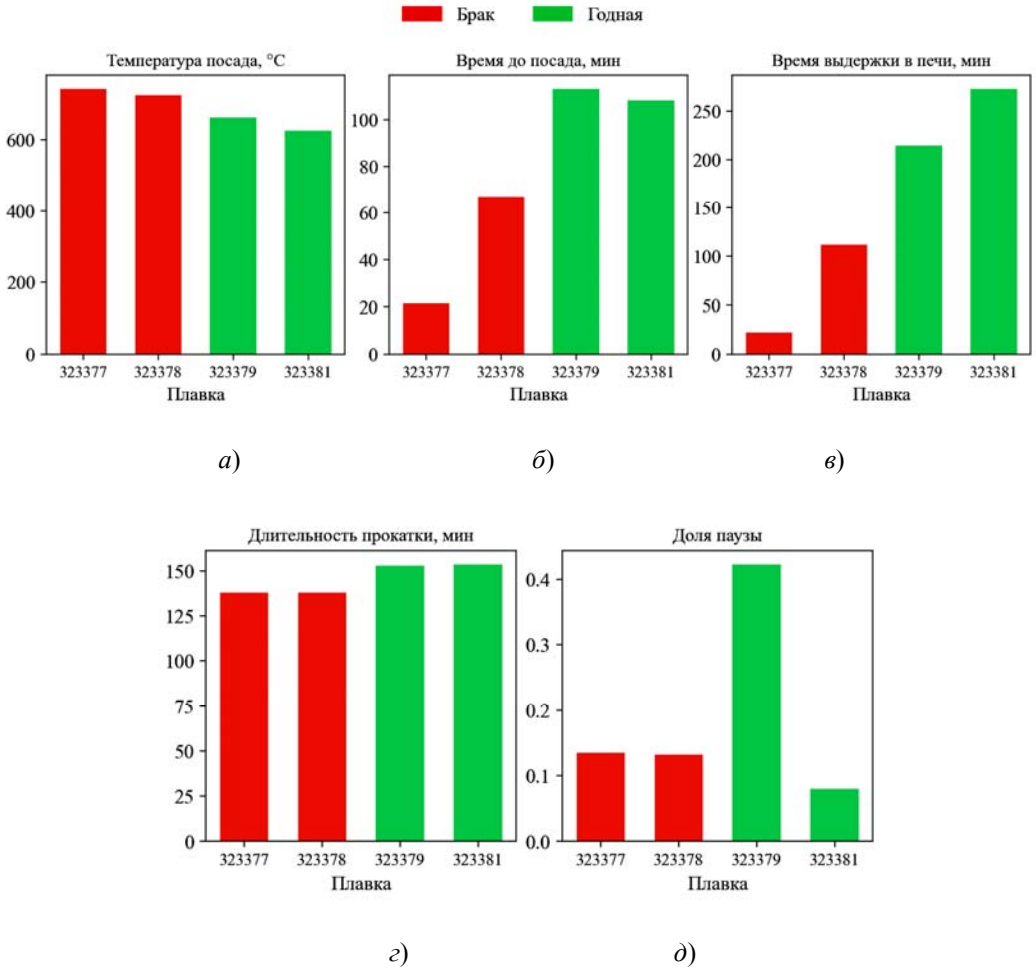
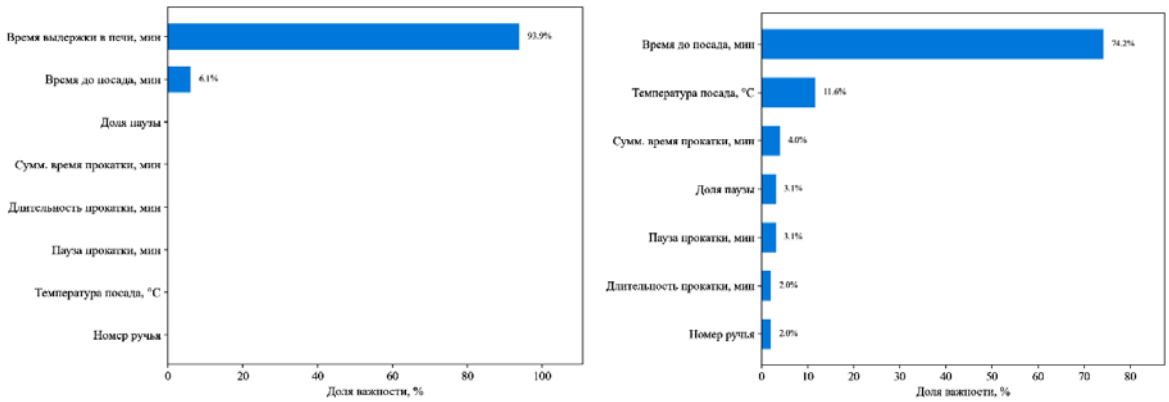


Рис. 1. Медианные профили плавок:
а – температура посада; *б* – время до посада; *в* – время выдержки в печи; г – длительность прокатки; *д* – доля паузы

Основное сравнение бракованных и годных партий выполнено на уровне плавок методом Mann-Whitney. В связи с малым объемом выборки (две плавки в каждой группе) основной акцент сделан на величине различий: стандартизованной разнице медиан, выраженной через отношение к межквартильному размаху, и направлении отклонения параметров. Дополнительно проведено сравнение по всем 92 записям; эти результаты рассматриваются как вспомогательные, поскольку строки одной плавки имеют общую метку качества и не являются статистически независимыми. По химическому составу существенных различий между группами не выявлено.

Для независимой проверки статистических выводов использована модель случайного леса на процессных признаках без включения химии, согласно методике [4]. Качество оценивалось по совокупности out-of-fold предсказаний. Получены следующие значения: сбалансированная точность – 0,713, F1-мера – 0,750, ROC-AUC – 0,742. Значимость признаков определена методом перестановочной важности. Поскольку время выдержки в печи оказывало доминирующее влияние и перекрывало близкие по смыслу параметры, дополнительно построена модель без этого признака; полученное ранжирование факторов сопоставлено со статистическим. Химия в модель не включалась: при добавлении показателей состава сбалансированная точность снизилась с 0,71 до 0,39. Машинное обучение применялось не для прогноза новых плавок, а для подтверждения согласованности выводов, полученных статистическими методами.

Анализ показывает общий технологический контраст между бракованными и годными партиями. Бракованные плавки характеризовались более коротким циклом обработки: меньшим временем в печи (медиана – 67 мин по сравнению с 244 мин у годных), меньшим временем до посада (44 и 111 мин соответственно), меньшей паузой перед прокаткой, при этом температура посада была выше (734 и 645 °C) (рис. 2, *а*).



а) *б*)

Рис. 2. Степень влияния технологических параметров на образование дефектов:
а – с учетом времени выдержки в печи; *б* – без учета времени выдержки в печи

Наиболее выраженные отличия относятся к паузе перед прокаткой, времени в печи и температуре посада. Модель без признака «время в печи» выделяет те же группы параметров: время до посада, температуру посада и показатели прокатки (рис. 2, *б*). Химический состав не проявил себя как основной фактор различия. Таким образом, брак двух рассмотренных партий по совокупности данных связан преимущественно с режимом нагрева и прокатки, а не с составом металла.

Установлено путем численного моделирования и анализа данных методом машинного обучения, что в диапазоне температур 600–650 °C происходит изменение коэффициента линейного расширения и теплоемкости стали. Это напрямую связано с перестроением кристаллической решетки γ-железа в α-железо при распаде аустенита. Это явление (рекалесценция) сопровождается выбросом тепловой энергии и существенным изменением объема стали: внешние слои расширяются незначительно,

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);