

Металловедение и термическая обработка

Physical metallurgy and heat treatment

Научная статья

УДК 669.1

DOI: 10.14529/met260203

КАЧЕСТВО КОЛЕСНОЙ СТАЛИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВТОРИЧНОГО МЕТАЛЛОСЫРЬЯ: КОНТРОЛЬ И СНИЖЕНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ

А.К. Петросян¹, petrosyan98.archi@yandex.ru

М.О. Алимова², mariya.alimova@tmk-group.com

¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,
Москва, Россия

² ПАО «ТМК», Москва, Россия

Аннотация. Статья посвящена комплексному решению актуальной научно-технологической проблемы повышения качества колесной стали при возрастающей доле использования вторичного металло сырья. В условиях ужесточения требований ГОСТ 10791–2011 к прочности и чистоте металла содержание неметаллических включений (НВ) становится ключевым ограничивающим фактором надежности железнодорожных колес. Работа систематизирует современные представления о природе, механизмах формирования и эволюции НВ на всех стадиях металлургического передела: от раскисления расплава до затвердевания непрерывнолитых заготовок.

Авторами предложена интегрированная методология контроля загрязненности стали, основанная на сочетании автоматического анализа частиц (АФА) в СЭМ-ЭДС, многомерного кластерного анализа химического состава включений, статистики экстремальных значений и термодинамического моделирования равновесий. Такой подход позволяет не только классифицировать типы включений (корунд, шпинели, алюминаты кальция, сульфиды и оксисульфиды), но и прогнозировать вероятность появления критически опасных частиц в объеме металла.

Особое внимание уделено физико-химическим механизмам образования оксидных включений при алюминиевом раскислении, их росту, коалесценции и взаимодействию с фронтом кристаллизации в различных структурных зонах непрерывнолитой заготовки. Показано, что наиболее неблагоприятные скопления НВ формируются в переходной и центральной эквИАКСИАЛЬНОЙ зонах, что обосновывает необходимость адресного входного контроля НЛЗ.

Ключевым технологическим инструментом снижения вредного влияния НВ является модифицирование стали кальцием. На основе термодинамического анализа и производственных экспериментов установлено оптимальное соотношение $[Ca]/[Al] = 0,23–0,31$, обеспечивающее преобразование остроугольного корунда в глобулярные алюминаты кальция с плакирующим слоем CaS.

Разработана оптимизированная схема внепечной обработки (ковш-печь + вакуумная дегазация) и непрерывной разливки с электромагнитным перемешиванием, позволяющая снизить содержание серы, кислорода и водорода, уменьшить долю опасных включений на 60–70 % и повысить выход годного металла до 99 % и выше.

Результаты работы имеют прямое промышленное значение для производства высоконадежных железнодорожных колес из переработанного металло сырья и могут быть использованы при разработке новых регламентов контроля качества стали.

Ключевые слова: колесная сталь, неметаллические включения, вторичное металло сырье, модифицирование кальцием, внепечная обработка, контроль качества, автоматический анализ частиц, кластерный анализ, статистика экстремальных значений

Для цитирования: Петросян А.К., Алимова М.О. Качество колесной стали при использовании вторичного металло сырья: контроль и снижение неметаллических включений // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2026. Т. 26, № 2. С. 28–36. DOI: 10.14529/met260203

QUALITY OF WHEEL STEEL WHEN USING SECONDARY METAL RAW MATERIAL: CONTROL AND REDUCTION OF NON-METALLIC INCLUSIONS

A.K. Petrosian¹, petrosyan98.archi@yandex.ru

M.O. Alimova², mariya.alimova@tmk-group.com

¹ National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russia

² PJSC "TMK", Moscow, Russia

Abstract. The article addresses a comprehensive scientific and technological solution to the pressing problem of improving wheel steel quality under conditions of an increasing share of secondary metal raw materials in steelmaking. In the context of stricter requirements of GOST 10791–2011 for strength and metal cleanliness, the content of non-metallic inclusions (NMIs) becomes a key limiting factor for the reliability and fatigue resistance of railway wheels. The paper systematizes modern concepts regarding the nature, formation mechanisms, and evolution of NMIs throughout all stages of metallurgical processing, from melt deoxidation to solidification of continuously cast billets.

The authors propose an integrated methodology for controlling steel contamination based on a combination of automated particle analysis (APA) using SEM-EDS, multivariate cluster analysis of inclusion chemistry, extreme value statistics, and thermodynamic modeling of phase equilibria. This approach enables not only classification of inclusion types (corundum, spinels, calcium aluminates, sulfides, and oxysulfides) but also prediction of the probability of occurrence of critically dangerous particles in the bulk material.

Special attention is given to the physicochemical mechanisms of oxide inclusion formation during aluminum deoxidation, their growth and coalescence, and their interaction with the solidification front in different structural zones of continuously cast billets. It is shown that the most unfavorable accumulation of NMIs occurs in the transition and central equiaxed zones, justifying targeted incoming inspection of billets.

A key technological tool for mitigating the harmful effects of NMIs is calcium modification of steel. Based on thermodynamic analysis and industrial experiments, the optimal $[Ca]/[Al]$ ratio of 0.23–0.31 was established, ensuring transformation of angular corundum into globular calcium aluminates coated with CaS.

An optimized ladle-furnace treatment combined with vacuum degassing and electromagnetic stirring during continuous casting was developed. This technology reduces sulfur, oxygen, and hydrogen levels, decreases hazardous inclusions by 60–70 %, and increases the yield of acceptable metal to 99 % and above.

The results have direct industrial relevance for manufacturing high-reliability railway wheels from recycled metal and can be applied in developing advanced steel quality control standards.

Keywords: wheel steel, non-metallic inclusions, secondary metal oxide, calcium modification, off-kiln processing, quality control, automatic particle analysis, cluster analysis, extreme value statistics

For citation: Petrosian A.K., Alimova M.O. Quality of wheel steel when using secondary metal raw material: Control and reduction of non-metallic inclusions. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2026;26(2):28–36. (In Russ.) DOI: 10.14529/met260203

Введение

Производство высокопрочной колесной стали для железнодорожного транспорта предъявляет все более жесткие требования к чистоте металла от неметаллических включений (НВ) [1, 2]. За последние десятилетия требуемый предел прочности колесной стали увеличился на 300 МПа и составляет 1000 МПа согласно ГОСТ 10791–2011, что существенно снизило допустимый уровень загрязненности металла включениями. Содержание серы должно быть не более 0,025 %, что в 5 раз строже требований для обычной конструкционной стали.

Одновременно с повышением требований к качеству возрастает доля использования вторичного металлосырья (лома, стружки, железнодорожного лома) при выплавке колесной стали. Экономическая целесообразность и экологические требования требуют переработки до 40–50 % металла из вторичного источника, однако это существенно осложняет достижение требуемого уровня чистоты от неметаллических включений.

Неметаллические включения оказывают значительное отрицательное влияние на технологические, эксплуатационные и сдаточные характеристики колесной стали [3]. Они яв-

ляются центрами инициирования усталостных трещин, снижают ударную вязкость, вызывают анизотропию свойств [4]. Крупные включения размером более 140 мкм в соответствии с теорией Мураками [4] становятся источниками хрупкого разрушения.

Классификация неметаллических включений по металлургической природе

Классификация включений по В.И. Явойскому разделяет НВ на три категории.

– Первичные НВ – формируются при температурах плавления (1700–1800 °С) в результате пересыщения расплава при введении раскислителей. Основные типы: корунд (Al_2O_3), магнезиальная шпинель ($\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$), герцинит ($\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) [3, 5].

– Вторичные НВ – образуются при охлаждении жидкой стали от температуры плавления до ликвидуса за счет движения равновесных изотерм [3, 6].

– Третичные НВ – формируются в процессе затвердевания стали из-за ликвации серы и кислорода. Основные типы: сульфиды марганца (MnS), сульфиды кальция (CaS), оксисульфиды кальция [6].

Физико-химические основы формирования неметаллических включений

Механизм образования оксидных включений при раскислении

При введении алюминия в переокисленный расплав происходит быстрое пересыщение по кислороду [5]. Образование оксидных включений имеет три последовательные стадии, которые представлены на рис. 1.

Стадия 1 – зарождение новой фазы: при пересыщении $S \approx 10\text{--}100$ происходит гомогенное образование зародышей корунда. Критический радиус зародыша определяется формулой

$$r^* = \frac{2\sigma V_m}{RT \ln S},$$

где σ – поверхностное натяжение ($\sim 1,0\text{--}1,2$ Дж/м²); V_m – молярный объем включения; R – газовая постоянная; T – абсолютная температура.

При типичных условиях $r^* \approx 100\text{--}500$ нм.

Стадия 2 – диффузионный рост: после преодоления энергетического барьера начинается диффузионный рост включения, ограниченный подводом реагентов:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{D(C_\infty - C_e)}{r(C_\infty - C_0)}.$$

Интегрирование показывает квадратичную зависимость размера от времени: $r^2 \approx kt$. За 2–3 мин размер достигает 5–20 мкм [3, 5].

Стадия 3 – коалесценция: после выравнивания концентраций (через 2 мин) происходит укрупнение за счет столкновений частиц [3, 5]. Продувка аргоном с газовыми пузырями 1–5 мм, движущимися со скоростью 20–50 см/с, существенно усиливает этот процесс [5].

Влияние включений на механические свойства стали

Концентрация напряжений вокруг включений.

Напряженное состояние вокруг жесткого сферического включения описывается упругим решением [5]:

$$\sigma_r(r) = \sigma_\infty \left(1 + \frac{2}{3} \left(\frac{R}{r} \right)^3 \right).$$

Для остроугольных включений (корунд, магнезиальная шпинель) коэффициент концентрации напряжений достигает 3–5.

Согласно теории Мураками [4], критический размер включения для высокопрочной колесной стали ($\sigma = 1000$ МПа) составляет $d_{\text{crit}} = 140$ мкм.

При превышении этого размера вероятность усталостного разрушения возрастает экспоненциально [4].

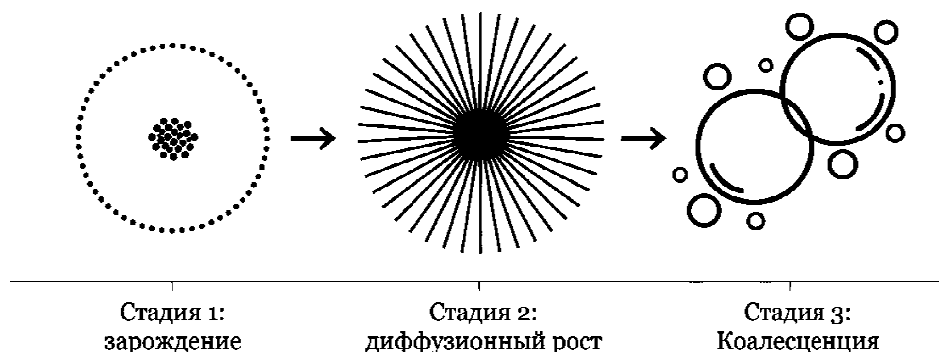


Рис. 1. Стадии образования оксидных включений
Fig. 1. Stages of formation of oxide inclusions

Внутренние напряжения при охлаждении

Оксидные включения имеют коэффициент расширения α_{inc} на 20–40 % меньший, чем сталь ($\alpha_{steel} \approx 12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) [5]. При охлаждении на $\Delta T \approx 1500^\circ\text{C}$ возникают растягивающие напряжения: $\sigma_{thermal} \approx 200\text{--}300 \text{ МПа}$.

Это может привести к разрушению адгезии и образованию опасных микропор на границе раздела.

Инновационные методы контроля и анализа*Автоматический анализ частиц (АФА)*

Метод АФА использует сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) с энергодисперсионным спектрометром (ЭДС). Процесс включает:

- 1) сканирование поверхности образца по регулярной сетке (шаг 0,5–1 мкм);
- 2) автоматическую локализацию включений при достижении электронным пучком;
- 3) рентгеноспектральный микроанализ каждого включения;
- 4) одновременное измерение размеров и трехмерной морфологии.

Результат: база данных с координатами, размерами и полным химическим составом каждого включения (500–5000 частиц) [7]. Данный метод позволяет преодолеть ограничения традиционных методов оценки, определенных в ГОСТ 1778–70 и ASTM E45.

Кластерный анализ составов неметаллических включений

На основе данных АФА применяется метод k-средних, автоматически группирующий включения в однородные кластеры, что показано на рис. 2.

Каждый кластер соответствует определенному типу включения. При анализе колесной стали обычно выявляется 4–6 типов:

- корунд (Al_2O_3) – чистые оксидные включения;
- магнезиальная шпинель ($\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$);
- герцинит ($\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$);
- алюминаты кальция ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) – модифицированные;
- сульфиды марганца (MnS);
- оксисульфиды кальция ($\text{CaO} \cdot \text{CaS}$).

Статистика экстремальных значений (EVS)

Статистика экстремальных значений прогнозирует размеры наибольших включений в объеме стали, что представлено на рис. 3.

Распределение Гумбеля применяется согласно теории Эмбрехтса:

$$F(x) = \exp\left(-\exp\left(-\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right).$$

Эмпирическое распределение часто соответствует степенному закону (Парето):

$$P(d > d_0) = \left(\frac{d_0}{d_{\max}}\right)^\alpha.$$

На основе этого рассчитывается вероятность обнаружения опасных включений размером $> 40 \text{ мкм}$.

Комплексная методология

На блок-схеме продемонстрирован интегрированный подход к контролю включений (рис. 4).

Предлагаемый подход включает [7]:

- 1) представительный пробоотбор на разных этапах процесса;
- 2) анализ НВ методом АФА (не менее 500 включений);

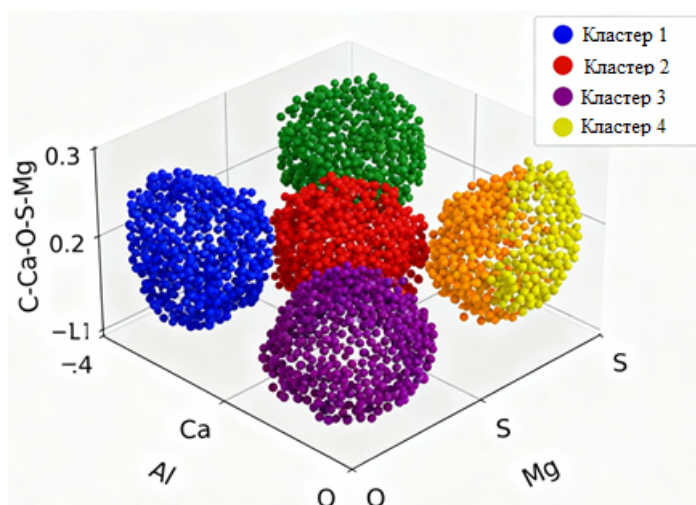


Рис. 2. Кластерный анализ
Fig. 2. Cluster analysis

Кривые распределения экстремальных значений Гумбеля и Вейбулла для прогнозирования максимального размера включения

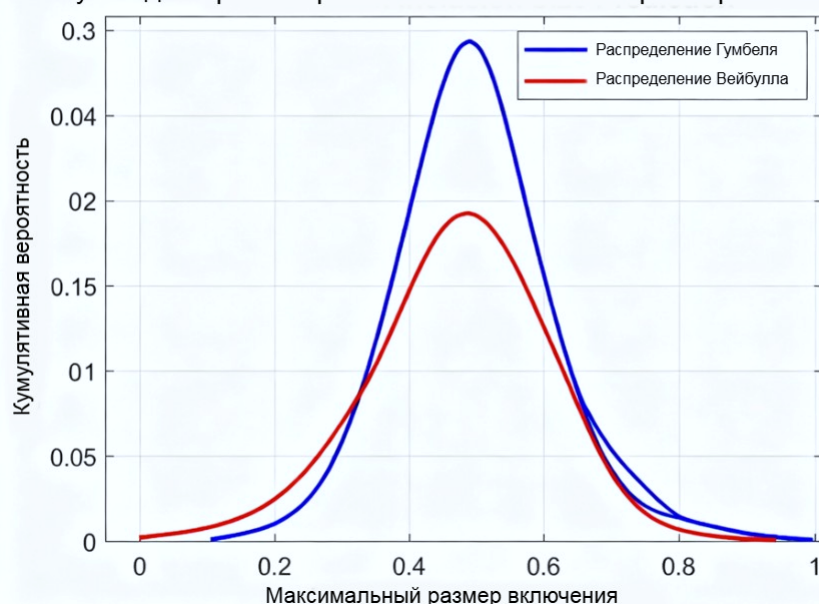


Рис. 3. Статистика экстремальных значений
Fig. 3. Extreme value statistics



Рис. 4. Блок-схема
Fig. 4. Block diagram

- 3) классификацию кластерным анализом;
- 4) применение статистики экстремальных значений;
- 5) интерпретацию результатов с термодинамическим моделированием [6];
- 6) корреляцию с механическими свойствами стали.

Затвердевание и распределение включений

Структурные зоны непрерывнолитой заготовки

При затвердевании в кристаллизаторе МНЛЗ формируются четыре структурные зоны, которые показаны на рис. 5.

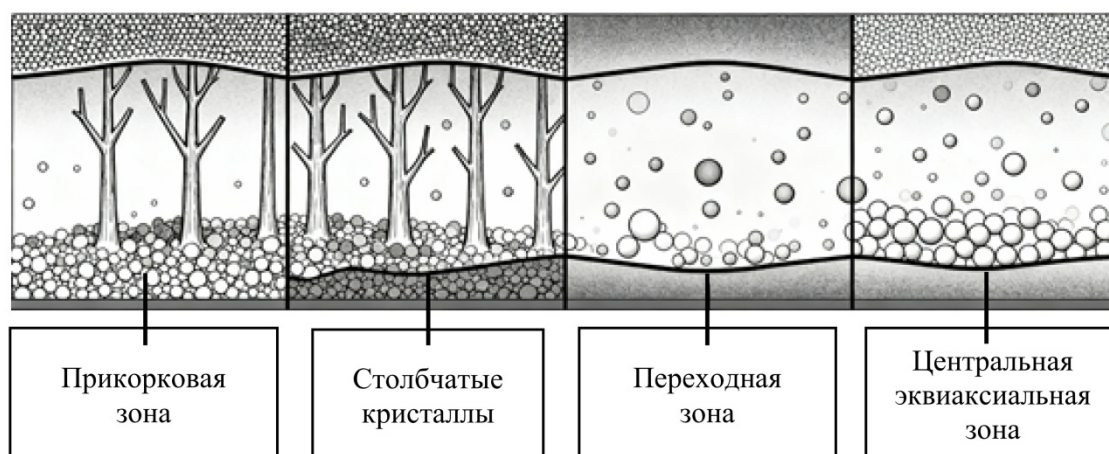


Рис. 5. Структурные зоны
Fig. 5. Structural zones

Зона 1 – узкая прикорковая зона (0,5–2 мм): экстремально высокий температурный градиент ($G \approx 100\text{--}300\text{ К/мм}$) и скорость затвердевания ($v \approx 100\text{--}300\text{ мм/мин}$). Включения быстро вмораживаются. Размер кристаллитов: 10–50 мкм.

Зона 2 – столбчатые кристаллы (10–30 мм): градиент снижается ($G \approx 10\text{--}50\text{ К/мм}$) [8, 9]. Рост кристаллов направлен параллельно максимальному градиенту. Начинается взаимодействие НВ с фронтом.

Зона 3 – переходная зона (5–10 мм): концентрационное переохлаждение расплава. Образуются вторичные ветви дендритов.

Зона 4 – центральная эквиаксиальная зона (20–40 мм): разориентированные кристаллиты. Наиболее сложное распределение НВ.

Взаимодействие включений с фронтом кристаллизации

Поведение НВ при затвердевании определяется их размером относительно междендритного расстояния λ_1 (обычно 50–200 мкм).

Малые включения ($d < \lambda_1$): могут свободно перемещаться в жидкой фазе, но захватываются фронтом кристаллизации благодаря высокой смачиваемости (контактный угол $\theta \approx 0^\circ$).

Крупные включения ($d > \lambda_1$): отторгаются от фронта под действием гидродинамических потоков и концентрируются в центре заготовки, формируя особо опасный центральный дефект.

Критический размер отторжения определяется следующим образом:

$$d_{\text{крит}} = \frac{2\pi T_i(T_m - T_i)}{3\mu v}.$$

Образование третичных сульфидных включений

При затвердевании сера ликвирует в междендритные пространства, где образуются третичные сульфиды марганца (MnS) [6]. Размер зависит от локального времени затвердевания:

$$\tau = \frac{\lambda_2^2}{\beta D_S},$$

где λ_2 – расстояние между ветвями второго порядка; β – коэффициент ликвации; D_S – коэффициент диффузии серы.

С увеличением λ_2 размеры третичных сульфидов возрастают, негативно сказываясь на свойствах стали.

Модифицирование кальцием

Механизм преобразования включений

Введение кальция инициирует последовательные превращения первичного корунда.

Этап 1: на поверхности Al_2O_3 образуется гексаалюминат кальция $\text{CaO} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$ (C_6A) путем поверхностной диффузионной реакции [10]. Фаза имеет кубическую структуру со слегка заостренной морфологией.

Этап 2: с увеличением концентрации кальция образуется биалюминат кальция $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ (C_2A) с улучшенными смачивающими свойствами.

Этап 3: при оптимальных соотношениях Ca/Al образуется моноалюминат кальция $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (CA), обычно плакированный сульфидом кальция CaS [10, 11]. Получается округлая глобулярная морфология, существенно снижающая вредное воздействие.

Оптимальное соотношение Ca/Al

Из термодинамического анализа и экспериментальных данных, описанных в работе, выявлено оптимальное соотношение:

$$\lg[\text{Ca}] = 0,701 \cdot \lg[\text{Al}] - 0,709 \pm 0,125,$$

что соответствует $[\text{Ca}]/[\text{Al}] = 0,23\text{--}0,31$ с оптимумом при 0,27.

При $[\text{Ca}]/[\text{Al}] < 0,23$: недостаточно кальция для полного модифицирования.

При $[\text{Ca}]/[\text{Al}] > 0,31$: избыток кальция образует крупные включения CaO (20–50 мкм).

Кинетика модифицирования

Скорость преобразования корунда описывается экспоненциальным законом согласно

$$n(t) = n_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right),$$

где $\tau \approx 8\text{--}12$ мин. Модифицирование максимально эффективно в течение первых 25 мин внепечной обработки. После этого скорость снижается.

Технология внепечной обработки

Оптимизированный процесс обработки на установке ковши-печь

Операция 1 – снижение интенсивности продувки аргоном: уменьшение барботажа сохраняет защитный слой шлака, предотвращает вторичное окисление и обеспечивает десульфурацию [7]. Результаты:

– содержание серы: $\leq 0,002\%$ (при норме $\leq 0,025\%$);

– кислород: $\leq 20\text{ ppm}$;

– азот: $\leq 50\text{ ppm}$.

Операция 2 – введение кальция: использование силикокальция марки SiCa30 в виде порошковой проволоки [10]. Критические параметры:

– оптимальное соотношение $[\text{Ca}]/[\text{Al}] = 0,23\text{--}0,31$;

Таблица 1
Table 1

Параметр	Базовая технология	Оптимизированная
Содержание серы, %	0,008–0,012	0,002
Водород, ppm	2–3	≤ 1
Кислород, ppm	25–30	≤ 15
Азот, ppm	70–80	≤ 50
Выход годного, %	97–98	99+
Дефекты по УЗК, %	2–3	< 1
Снижение дефектов НВ, %	–	60–70

Таблица 2
Table 2

Метод	Преимущества	Ограничения
ГОСТ 1778 (визуально)	Быстро, дешево	Не показывает состав
ASTM E1245	Объективная оценка размеров	Требует много времени
АФА + кластеризация	Полная информация о составе	Требует оборудование
АФА + EVS	Прогностический анализ риска	Нужны большие выборки

- правильный момент введения (спустя 5–10 мин после раскисления);
- скорость введения: 0,1–0,2 кг/мин;
- время экспозиции: первые 25 мин.

Операция 3 – вакуумная дегазация: выдержка под глубоким вакуумом (до 1 мбар) с интенсивной продувкой аргоном (15–20 мин) [7].
Результаты:

- водород: ≤ 1 ppm;
- кислород: ≤ 15 ppm.

Непрерывная разливка со спецсредствами

Применение электромагнитного перемешивания (ЭМП) с напряженностью 0,1–0,2 Т согласно [7] обеспечивает:

- вынос газовых пузырей и включений;
- выравнивание температуры по сечению заготовки;
- подавление волновых процессов в кристаллизаторе;
- улучшение макроструктуры и качества поверхности.

Входной контроль непрерывнолитых заготовок

Методика включает согласно рекомендациям:

- отбор образцов из четырех радиальных позиций (расстояния 0,25, 0,5, 0,75, 0,95 радиуса);
- анализ НВ методом АФА (не менее 500 включений);
- классификацию по кластерной системе;
- применение статистики экстремальных значений;
- определение допустимого уровня загрязненности.

Результаты и практическое применение

При применении разработанных методик получены следующие результаты согласно экспериментальным данным (табл. 1).

Сравнение методов контроля приведено в табл. 2.

Выводы

1. Использование вторичного металло сырья требует специальных мер по контролю неметаллических включений, что подтверждается экспериментальными данными [12, 13].

2. Комплексная методика оценки (АФА + кластерный анализ + статистика экстремальных значений) обеспечивает объективную информацию о составе и размерах НВ, необходимую для оптимизации технологии [7].

3. Модифицирование кальцием при оптимальном соотношении $[Ca]/[Al] = 0,23–0,31$ преобразует хрупкие оксиды в благоприятные глобулярные алюминаты кальция [10, 11].

4. Места сопряжения структурных зон непрерывнолитых заготовок наиболее загрязнены НВ, что обосновывает необходимость входного контроля НЛЗ согласно теории за твердевания.

5. Применение оптимизированной технологии позволяет снизить загрязненность ко лесоной стали на 60–70 % и повысить выход годного металла до 99+ %, что соответствует требованиям ГОСТ 10791–2011.

Список литературы

1. Молчанов В.Г., Попов Э.М. Конструкционные материалы для железнодорожного подвижного состава. Москва: РЖД, 2010. – 256 с.
2. Курдюмов А.В., Пикун М.В., Бахтияров Р.А. Плавка и затвердевание сплавов цветных металлов. М.: Metallurgia, 1968. 228 с.
3. Гуляев Б.Б. Теория литейных процессов. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1976. 214 с.
4. Murakami Y., Endo M. Effects of defects, inclusions and inhomogeneities on fatigue strength // International Journal of Fatigue. 1994. Vol. 16 (3). P. 163–182.
5. Kaufman L., Bernstein H. Computer Calculation of Phase Diagrams with Special Reference to Refractory Metals. New York: Academic Press, 1970. 334 p.
6. Turkdogan E.T. Fundamentals of Steelmaking. London: The Institute of Materials, 1996. 331 p.
7. Zhang L., Thomas B.G. State of the art in the control of inclusions during steel ingot casting // Metallurgical and Materials Transactions B. 2006. Vol. 37. P. 733–761. DOI: 10.1007/s11663-006-0057-0
8. ГОСТ 10791–2011. Колеса цельнокатаные. Технические условия. М.: Стандартиформ, 2011.
9. ГОСТ 1778–70. Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений. М.: Стандартиформ.
10. Wang C.Y., Beckermann C. Prediction of Columnar to Equiaxed Transition during Diffusion-Controlled Dendritic Alloy Solidification // Metallurgical and Materials Transactions A. 1994. Vol. 25. P. 1081–1093. DOI: 10.1007/BF02652282
11. Повышение чистоты металла при внепечной обработке карбидом кальция / С.Б. Ерошкин, К.Э. Прудов, О.В. Попов и др. // Сталь. 2007. № 12. С. 26–28.
12. Крагельский И.В. Трение и износ. 2-е изд., доп. и перераб. М.: Машиностроение, 1968. 480 с.
13. Мchedlishvili V.A. Термодинамика и кинетика раскисления стали. М.: Metallurgia, 1978. 287 с.

References

1. Molchanov V.G., Popov E.M. *Konstruktsionnye materialy dlya zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava* [Structural Materials for Railway Rolling Stock]. Moscow: Russian Railways, 2010. 256 p. (In Russ.)
2. Kurdyumov A.V., Pikunov M.V., Bakhtiarov R.A. *Plavka i zatverdevanie splavov tsvetnykh metallov* [Melting and solidification of non-ferrous metal alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1968. 228 p. (In Russ.)
3. Gulyaev B.B. *Teoriya liteynykh protsessov* [Theory of foundry processes]. Leningrad: Mashinostroenie, Leningrad branch, 1976. 214 p. (In Russ.)
4. Murakami Y., Endo M. Effects of defects, inclusions and inhomogeneities on fatigue strength. *International Journal of Fatigue*. 1994;16(3):163–182.
5. Kaufman L., Bernstein H. *Computer Calculation of Phase Diagrams with Special Reference to Refractory Metals*. New York: Academic Press, 1970. 334 p.
6. Turkdogan E.T. *Fundamentals of Steelmaking*. London: The Institute of Materials, 1996. 331 p.
7. Zhang L., Thomas B.G. State of the art in the control of inclusions during steel ingot casting. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2006;37:733–761. DOI: 10.1007/s11663-006-0057-0
8. *GOST 10791–2011. Stal' dlya zheleznodorozhnykh koles. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [State Standard 10791–2011. Steel for railway wheels. General specifications]. Moscow: Standartinform, 2011. (In Russ.)
9. *GOST 1778–70. Steel. Metallographic methods for the determination of nonmetallic inclusions*. Moscow: Standartinform. (In Russ.)
10. Wang C.Y., Beckermann C. Prediction of Columnar to Equiaxed Transition during Diffusion-Controlled Dendritic Alloy Solidification. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 1994;25:1081–1093. DOI: 10.1007/BF02652282

11. Eroshkin S.B., Prudov K.E., Popov O.V., Kuklev A.V., Sosnin V.V. Purification of metal in ladle treatment with calcium carbide. *Steel in Translation*. 2007;37(12):1021–1023. DOI: 10.3103/S0967091207120133

12. Kragel'skiy I.V. *Trenie i iznos* [Friction and Wear]. 2nd ed., supplemented and revised. Moscow: Mashinostroyeniye, 1968. 480 p. (In Russ.)

13. Mchedlishvili V.A. *Termodinamika i kinetika raskisleniya stali* [Thermodynamics and kinetics of steel deoxidation]. Moscow: Metallurgiya, 1978. 287 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Петросян Артур Карленович, аспирант кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих промышленных технологий Института экотехнологий и инжиниринга, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва, Россия; petrosyan98.archi@yandex.ru.

Алимова Мария Олеговна, главный специалист, ПАО «ТМК», Москва, Россия; mariya.alimova@tmk-group.com.

Information about the authors

Artur K. Petrosian, Postgraduate Student of the Department of Energy Efficient and Resource Saving Industrial Technologies, Institute of Ecotechnologies and Engineering, National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russia; petrosyan98.archi@yandex.ru.

Mariya O. Alimova, Chief Specialist, PJSC “TMK”, Moscow, Russia; mariya.alimova@tmk-group.com.

Статья поступила в редакцию 09.12.2025

The article was submitted 09.12.2025