

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) федерального
государственного автономного образовательного учреждения высшего образования
"Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС"

Иванов Денис Игоревич

**АНАЛИЗ ПРИЧИН РАННЕГО ВЫХОДА ИЗ СТРОЯ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
КОЛОСНИКОВ ОБЖИГОВЫХ ТЕЛЕЖЕК ИЗ СТАЛИ 40Х24Н12СЛ С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ
РАЗРАБОТКОЙ ТЕХНОЛОГИИ ВЫПЛАВКИ, РАЗЛИВКИ И ТЕРМООБРАБОТКИ КОЛОСНИКОВ
ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ИМИ ПОВЫШЕННОГО ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО РЕСУРСА**

Специальность 2.6.3 – «Литейное производство»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, доцент
Кожухов А.А.

Старый Оскол– 2022

Общая характеристика работы

Актуальность исследования. На сегодняшний день отечественные горно-металлургические предприятия, в производственной линии которых применяются обжиговые машины, находятся в постоянной рыночной конкуренции. В условиях нарастающего объёма мирового производства и высокой ценовой конкуренции необходимо применять технологии, позволяющие сокращать издержки производства и увеличивать прибыль.

Повышенные издержки производства во многом обусловлены низкой стойкостью колосников, работающих при повышенных температурах для обеспечения требуемой производительности. Повышение температуры и скорости термоциклирования снижают эксплуатационные свойства обжиговых машин, что в целом снижает технико-экономические показатели производства данного металлургического передела. При этом, рентабельность от увеличения производительности путем ужесточения условий эксплуатации обжиговых машин не сопоставимо выше дополнительных расходов на их обслуживание и ремонты, что обуславливает сегодняшний тренд на наращивания объёмов производства предприятиями отрасли.

Одна из самых расходных статей амортизации обжиговых машин – колосники обжиговых тележек (принимающие на себя основную тепловую нагрузку). Также, при выходе из строя колосников происходят простои оборудования, необходимые для замены телег и последующего ремонта колосникового поля.

Повышение эксплуатационного ресурса колосников является основным направлением на пути снижения себестоимости высокотемпературно-упрочнённых окисленных окатышей и увеличения коэффициента использования обжиговых машин, именно по этой причине отечественные предприятия ведут непрерывные поиски новых материалов и поставщиков.

В недавнем прошлом на отечественных обжиговых машинах наиболее массово применялись колосники из стали 40Х24Н12СЛ, изготавливаемые по ГОСТ 977-88. Колосники этой марки стали обладали достаточным эксплуатационным ресурсом и приемлемой стоимостью, и до недавнего времени, были одной из основных альтернатив зарубежным аналогам из чугуна и стали.

Однако, в связи с изменившимися условиями эксплуатации (изменения температурного режима обработки окатышей в сторону высоких температур, изменения качества обжигаемого материала и др.) эксплуатационный ресурс отечественных колосников из стали 40Х24Н12СЛ резко снизился. За последние годы это привело к отказу от использования отечественных колосников частью предприятий (АО «Стойленский ГОК», ОАО «ОЭМК», АО «Лебединский ГОК», ОАО «Михайловский ГОК» и др.) в пользу зарубежных аналогов или более дешёвых отечественных альтернатив (таких как чугун ЧХ32), где это технологически приемлемо. При этом, зарубежные аналоги, имеющие более высокий эксплуатационных ресурс, обладают большей стоимостью, а отечественные производители альтернатив колосникам из стали 40Х24Н12СЛ не предлагают в связи с отсутствием удачных попыток модернизации этой марки стали.

Исходя из изложенного, актуальным является исследование процессов дефектообразования при эксплуатации и технологии изготовления колосников обжиговых тележек отечественного производства из стали 40Х24Н12СЛ для совершенствования технологии изготовления на всех этапах (от плавки и разливки до термообработки) для достижения ими приемлемого эксплуатационного ресурса (не менее 3-х лет) в современных, более агрессивных, условиях эксплуатации. При этом, изыскания необходимо проводить таким образом, чтобы принятые меры и решения не приводили к росту себестоимости детали до уровня зарубежных аналогов, для сохранения конкурентоспособности отечественных производителей.

Цель работы. Корректировка технологии изготовления колосников обжиговых тележек на этапах выплавки, разливки и термообработки из оптимизированной по химическому составу стали 40Х24Н12СЛ для исключения возможности образования усадочных раковин и повышения стойкости колосников против межкристаллитной коррозии на основе анализа причин выхода их из строя и технологии их изготовления, с целью достижения колосниками эксплуатационного ресурса не менее 3-х лет.

Средства и методы достижения цели. Анализ причин выхода из строя литых колосников включает в себя:

- о Статистический анализ брака (включая макроанализ) колосников на производстве для выявления полного перечня возможных дефектов и его сегментирования;
- о Микроанализ, металлографический анализ отбракованных колосников для определения первопричин дефектообразования;
- о Моделирование процессов эксплуатации колосников (в том числе с усадочными раковинами) для определения степени влияния современных условий эксплуатации, литой структуры и усадочных раковин на эксплуатационный ресурс.

После установления первопричин дефектообразования в литых колосниках из стали 40Х24Н12СЛ во время эксплуатации на предыдущем этапе (это: усадочные раковины и межкристаллитная коррозия (образование карбидной сетки М23С6 на базе карбида хрома Cr23C6)), изыскание мероприятий по исключению возможности образования этих дефектов:

- о Оптимизация технологии выплавки и разливки, позволяющая исключить образование усадочных раковин;
- о Оптимизация технологии термообработки после литья в комплексе с корректировкой химического состава стали 40Х24Н12СЛ для воспроизводимости результатов термообработки, позволяющая повысить стойкость колосков против межкристаллитной коррозии.

Научная новизна.

1. Установлены основные виды дефектов, приводящих к преждевременному массовому выходу колосников из строя: межкристаллитная коррозия (65,5%) и усадочные раковины (34,5%). Доказано, что высокотемпературное разрушение рабочих поверхностей колосников из стали 40Х24Н12СЛ протекает по механизму межкристаллитной коррозии. Определена степень влияния качества литой структуры колосников после термообработки (балла карбидной сетки) на склонность колосников к межкристаллитной коррозии и размеров усадочных раковин на эксплуатационный ресурс колосников.

Установлены закономерности протекания межкристаллитной коррозии, коробления и изломов колосников из стали 40Х24Н12СЛ в современных, агрессивных условиях эксплуатации конвейерных обжиговых машин в том числе на основании сопоставления результатов от моделирования условий эксплуатации колосников методом конечных элементов и от статистического, микро- и макроанализа колосников на производстве.

2. Объяснены закономерности протекания дефектообразования в колосниках из стали 40Х24Н12СЛ во время эксплуатации на обжиговых машинах с помощью ПК ANSYS. Доказана применимость заданных граничных условий в методе конечных элементов для получения графических и количественных результатов точно соответствующих реальным данным. С применением модели доказаны предположения о закономерностях протекания дефектообразования.

Подтверждено, что одной из основных причин, приводящих к преждевременному выходу колосников из строя являются усадочные раковины критического диаметра ($\phi \geq 5$ мм). При наличии дефектов в виде усадочных раковин наблюдается неоднозначный отклик различных частей литой заготовки на деформационные воздействия, что дополнительно усугубляется не равномерными температурными условиями эксплуатации колосников.

3. Разработан комплекс корректировок технологии изготовления колосников из стали 40Х24Н12СЛ, позволяющий увеличить срок их службы в современных условиях эксплуатации как минимум до 3-х лет за счет исключения возможности образования усадочных раковин и повышения стойкость колосников против МКК, включающий в себя:

- о на этапе плавки – корректировку химического состава стали (для воспроизводимости результатов термообработки и оптимизации технико-экономических параметров плавки),
- о на этапе разливки – оптимизацию технологии литья колосников за счет изменения схемы формовки и расположения прибылей в комплексе с повышением температуры разливки и возможности применения безопасной формовки, что позволило исключить возможность образования усадочных раковин и улучшить технико-экономические параметры технологии изготовления колосников на данном этапе,
- о на этапе термообработки – применение разработанной технологии термообработки для получения кондиционной литой структуры, позволяющей достичь высокой стойкости колосников против межкристаллитной коррозии.

Практическая значимость.

1. Разработана и внедрена в производство импортозамещающая технология получения колосников обжиговых тележек, обеспечивающая повышенный эксплуатационный ресурс колосников из стали 40X24H12СЛ (в том числе частично превосходящий зарубежные аналоги, признанные эталоном).

2. Применена математическая модель (по методу конечных элементов) для определения степени воздействия усадочных раковин на эксплуатационный ресурс колосников. Корреляция этих данных с полученными на производстве – позволила установить критические параметры усадочных раковин. Применение математической модели позволило установить температурный градиент в колосниках при эксплуатации, объясняющий локальный характер межкристаллитной коррозии на базе карбида хрома Cr₂₃C₆.

3. Определены минимальные требования к кондиционной литой структуре стали после термообработки по карбидной фазе (балу карбидной сетки) позволяющие исключить склонность колосников к межкристаллитной коррозии при новых условиях эксплуатации.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на 3-х конференциях, результаты работы отражены в 3-х публикациях в журналах, входящих в перечень ВАК, авторские права закреплены патентом № 2708728.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из 5-и глав с выводами и 15-и приложений. Работа изложена на 248-и страницах форматов А3-А4, содержит 33-и таблицы, 32-е формулы, 52-а рисунка. Библиографический список включает 109-ть наименований.

1. Содержание работы

1.1 Обзор и анализ литературных источников по теме исследования

Рассмотрены общие сведения о колосниках обжиговых тележек из стали 40X24H12СЛ (характеристика, требования, основные существующие параметры контроля качества). Описано влияние особенностей современных условий эксплуатации колосников на их эксплуатационный ресурс. Описана применяемая технология выплавки и литья колосников.

Выполнен литературный обзор на предмет успешных попыток модернизации стали 40X24H12СЛ и поиск её аналогов (в т.ч. зарубежных). Сделаны выводы: об отсутствии успешных попыток модернизации стали 40X24H12СЛ, об отсутствии отечественных аналогов и о большой успешности зарубежных, родственных по химсоставу. На основании литерного обзора обоснована актуальность модернизации технологии изготовления стали 40X24H12СЛ на этапах плавки, разлива и термообработки, ввиду недостаточности существующих условий и требований (в ГОСТ, в документации у заказчиков и производителей), которые не менялись с 1990 годов при постоянно усложняющихся условиях эксплуатации.

1.2 Методика исследования

Объектом теоретических исследований являлись: влияние технологии изготовления колосников и условий их эксплуатации на ресурс детали (срок непрерывной эксплуатации), а также первопричины дефектов колосников и механизмы их возникновения и протекания. На следующем этапе теоретические исследования были направлены для изыскания методов модернизации технологии изготовления колосников из стали 40X24H12СЛ на этапах выплавки, разлива и термообработки для исключения возможности образования в них усадочных раковин и повышения их стойкости против МКК при эксплуатации (мероприятий, приводящих к повышению гарантированного срока службы колосников до 3-х лет).

Объектами экспериментального исследования являлись:

- Виды дефектов колосников (определение первопричин выхода из строя) по факту выполнения статистического анализа колосников во время эксплуатации на производстве.
- Модернизированная технология выплавки и разлива колосников: плавка стали по скорректированному химическому составу и разлива стали по скорректированной технологии. Экспериментально определены: температура разлива $t_{\text{лик.ж.}}$ на уровне 1560±20° при коэффициенте массы литниково-питающей системы $k = 2.1$, безопасная формовка в ХТС на 6-ть деталей (отказ от формовки в стопку) с обязательным нанесением на полуформы антипригарной цирконового краски;

- Режим термообработки детали после литья для достижения кондиционной литой структуры, увеличивающей стойкость детали против МКК – экспериментально подобрано время выдержки при закалке и отпуске: закалка при 1100°C (выдержка 80 мин) с охлаждением на воздухе и отпуск при 900°C длительностью 150 мин;
- Опробования выполненных корректировок – по факту определения оптимизационных мероприятий на всех этапах изготовления колосников (плавки, разливки, термообработки) из скорректированной по химическому составу стали 40X24H12СЛ – промышленные опробования колосников в современных, агрессивных условиях эксплуатации на протяжении не менее 3-х лет для определения достоверности и оптимальности выполненной модернизации технологии их изготовления.

Все приведенные в работе исследования микроструктуры колосников выполнены на анализаторе изображений, состоящем из металлографического микроскопа MEIUTECHNOIM 7200, телевизионной камеры и компьютера с программой анализа изображения ТНХОМЕТПРО. Для травления шлифов применялся раствор «Марбле» (20 г медного купороса, 100 см³ соляной кислоты, 100 см³ этилового спирта).

Анализ химического состава выполнялся в Промышленной Лаборатории по контролю производства ДЦ-1 и ФЛЦ ПАО «НЛМК» г. Липецк.

Моделирование по методу конечных элементов включая модель влияния литейных дефектов на эксплуатационный ресурс колосника в процессе эксплуатации и модель влияния современного режима эксплуатации на градиент температур по сечению детали выполнено в программе ANSYS.

1.3 Исследование причин раннего выхода из строя колосников обжиговых тележек

Для установления первопричин дефектообразования колосников из стали 40X24H12СЛ, изготовленных по стандартной технологии (по ГОСТ 977-88), выполнены статистические исследования во время эксплуатации разных партий колосников от разных поставщиков (в т.ч. отечественных и зарубежных), на обжиговых машинах ОК-306 АО «Лебединский ГОК» и Outotec 768 АО Стойленский ГОК».

Все поставщики прошли входной контроль без замечаний. Испытания длились 36 месяцев, отслеживались и документировались все выходы из строя колосников с целью достоверно установить эксплуатационный ресурс каждой партии. Все выходы из строя сегментировались по видам дефектов.



Рисунок 1. Отбракованные колосники с ОК-306
Обозначения: а – коррозионное разрушение (12 мес. эксплуатации),
б – коррозионное разрушение и короблению (18 мес. эксплуатации),
в – излом и коррозионное разрушение (7 мес. эксплуатации)

Анализ причин выхода из строя показал, что основные виды дефектов: (рис. 1): коробление (21,3%), трещинообразование (13,2%) и локальная межкристаллитная коррозия (65,5%). Потери на угар далее не рассматривались ввиду малой значимости – из-за низкой стойкости колосников против описанных выше дефектов (в среднем – менее 1 года).



Рисунок 2. Излом
1 – усадочная раковина



Рисунок 3. Коробление
а – разрезанный для поиска усадочных раковин,
б – усадочная раковина в замковой части

Установлено, что **трещинообразование с изломом** замковой части (рис. 2) и **коробление** колосника (рис. 3) всегда сопровождаются усадочной раковинной в теле колосника. Стоит отметить, что коробление при эксплуатации (рис. 3) всегда протекало с изгибом «вверх», в сторону максимальных температур (к горелкам).

Исходя из предположения, что причиной коробления и изломов колосников являются усадочные раковины – были выполнены дополнительные исследования по определению размеров усадочных раковин по следующей методике: выборочно, из колосников подверженных короблению и изломам, отбирались колосники для поиска усадочных раковин (разрезом), найденные пустоты замерялись, фиксировалось среднее значение диаметра (рис. 4).

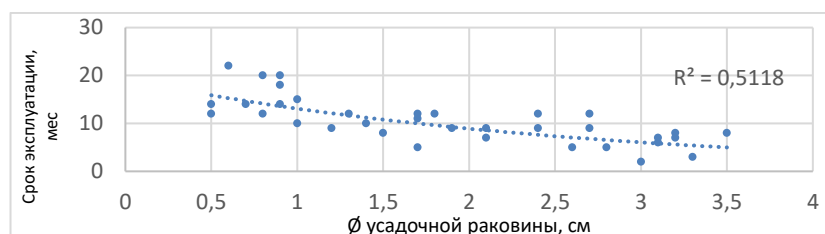


Рисунок 4. Зависимость срока эксплуатации от размера усадочной раковины с экспоненциальной линией тренда, достоверность аппроксимации $R^2=0,52$

Таким образом была установлена следующая **зависимость эксплуатационного ресурса колосников от диаметра усадочной раковины** (рис. 4): для достижения срока эксплуатации колосников не менее 3-х лет – максимально допустимый средний диаметр усадочной раковины не должен превышать 5 мм. Данная зависимость была дополнительно подтверждена моделированием по методу конечных элементов с применением ПК ANSYS (как описано далее).

Коррозионное разрушение или локальная межкристаллитная коррозия (МКК) проявлялась в виде «растрескивания» поверхности колосника (рис. 5) и проверялась микроанализом (рис. 6, 8). МКК хорошо различима уже после 6 месяцев эксплуатации и протекает по известному механизму: в структуре стали в интервале температур $500 \div 550^\circ\text{C}$ (температура эксплуатации колосников идентична) происходит образование карбидной сетки M_{23}C_6 на базе карбида хрома Cr_{23}C_6 по границам зёрен. Стоит отметить, что МКК локальна - у «верхней» поверхности (обращённой к горелкам).



Рисунок 5. Колосники после 6 месяцев эксплуатации

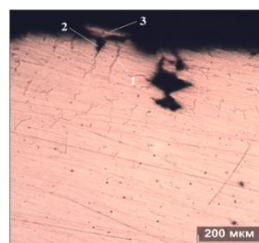


Рисунок 6. Верхняя часть колосника после 6 месяцев эксплуатации, $\times 150$

Обозначения: а – установленные на обжиговой тележке, б – средняя часть демонтированного с балок колосника, вид сверху

Обозначения: выделения карбидов в поверхностной зоне 1, коррозия, распространяющаяся по ним 2 и отслаивающиеся участки 3

При этом, МКК протекает с участием всего углерода в матрице металла, а хрома, лишь из приграничных участков, таким образом, появляются зоны с пониженным содержанием хрома (менее 12 %) у границ карбидов. Последнее объясняется большой разницей в скоростях диффузии углерода и хрома. Также, в пользу этой версии говорит округлый характер пустот, образовавшихся в результате коррозионного разрушения колосника при эксплуатации, так как произошло обесхромливание матрицы металла по границам зёрен, и они подверглись коррозионному разрушению (рис. 6) под воздействием высоких температур.

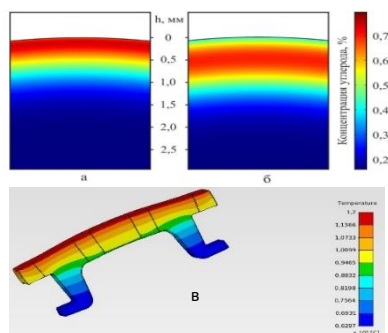


Рисунок 7. Модель диффузии углерода и градиент температур в колоснике

Обозначения: а, б – распределение углерода в поверхностном слое 15Х после 5 часов и 10 часов одно- и двухстадийного процесса цементации соответственно, в – распределение температур по сечению колосника во время эксплуатации (5 минут в зоне обжига)

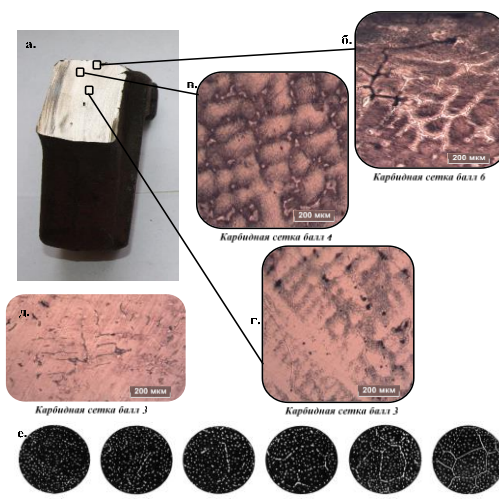
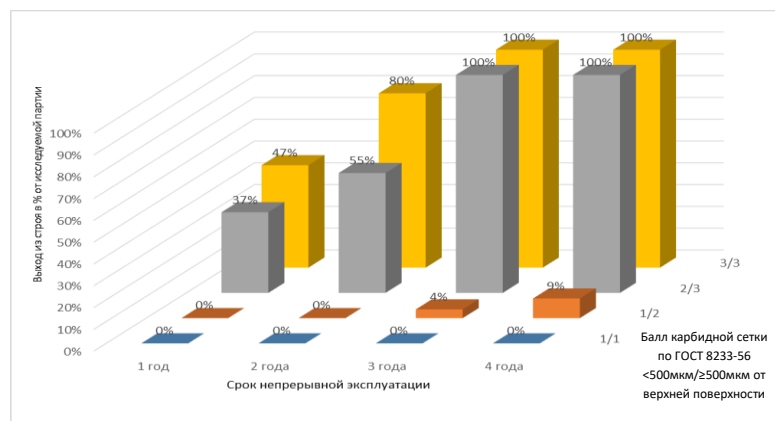


Рисунок 8. Балл карбидной сетки по ГОСТ 8233-56 колоснике отечественного производства, изготовленного по стандартной технологии (подверженного МКК при эксплуатации), x500

Обозначения: а. колосник 8 мес. эксплуатации; б. микроструктура «верхней» поверхности колосника (до 500 мкм от края детали); в. микроструктура в 5 мм от «верхней» поверхности колосника; г. микроструктура середины колосника; д. микроструктура нового колосника; е. эталоны карбидной сетки.

Высокая скорость диффузии углерода в твердом растворе дополнительно доказана в большом количестве работ, так применением численного моделирования для определения скорости диффузии углерода в аустените Fe-C-Cr стали 15Х (рис. 7,а,б), при нагреве до 855°C диффузия углерода на глубину 0,5÷1,2 мм произошла за 5÷10 часов. Температура нагрева колосников на современных обжиговых машинах достигает ~1000°C (рис. 7, в), длительность температурного воздействия ~60 минут в сутки (12 циклов по 5÷8 мин), что показывает наличие достаточных условий для диффузии углерода со всей глубины детали при выравнивании его концентрации в матрице металла после выпадения углерода и хрома в карбиды $[\text{Cr,Fe}]_{23}\text{C}_6$ в поверхностном слое (≤ 500 мкм от верхней поверхности) колосника.

В дальнейшем, была выполнена оценка зависимости **склонности к МКК от балла карбидной сетки**. Оценка выполнялась по ГОСТ 8233-56 у 4-х партий (включая зарубежных поставщиков – рис. 9). До эксплуатации выборочно оценивался средний балл карбидной сетки на глубине <500 мкм/ ≥ 500 мкм от верхней поверхности и сопоставлялся с временем партии в работе (удельной динамикой выхода колосников из строя по МКК, рис. 8).



Поставщик	Партия, шт	Срок эксплуатации	Выходы из строя в % от исследуемой партии в зависимости от балла карбидной сетки на глубине: <500 мкм/≥500 мкм от верхней поверхности			
			1/1	1/2	2/3	3/3
1	2323	1 год	0%	0%	37%	47%
2	4529	2 года	0%	0%	55%	80%
3	111672	3 года	0%	4%	100%	100%
4	300 (+21350)	4 года	0%	9%	100%	100%

Рисунок 9. Зависимость срока эксплуатации или склонности к МКК от балла карбидной сетки на глубине <500 мкм/≥500 мкм от верхней поверхности

Для высокой стойкости против МКК оптимально привести структуру стали к состоянию равномерного распределения карбидов относительно малых размеров (менее первичных) – на всей глубине детали иметь структуру с 1 баллом карбидной сетки.

Для определения склонности к МКК колосников из стали 40X24H12СЛ по ГОСТ 8233-56 не достаточно замерять балл карбидной сетки одной области, необходимы замеры на разной глубине (что объясняется более обильным процессом связывания углерода в карбиды на всей глубине детали).

Таким образом, повышения срока службы колосников можно добиться за счёт «стабилизации структуры» (связывания углерода в карбиды на всей глубине детали и созданием благоприятных условий для выделения мелких карбидов глобулярной формы), чего можно достичь в результате термической обработки.

Моделирование процесса эксплуатации колосников.

Для апробации гипотез о закономерностях протекания дефектообразования в колосниках было выполнено моделирование условий их эксплуатации в ANSYS. Граничными условиями моделирования являлись: геометрические размеры детали и наличие/отсутствие усадочных раковин разного среднего диаметра, количество и распределение узлов поиска решений (распределение конечно-элементарной сетки), нагрузка на верхнюю поверхность колосника (давление слоя окатышей), температура теплоносителя (окружающей среды), температура на поверхности контакта колосник – постель, время нахождения в высокотемпературной зоне, ограничение степеней свободы (имитация крепления на балку), масса детали, коэффициенты линейного расширения и теплопроводности, теплоёмкость и др.

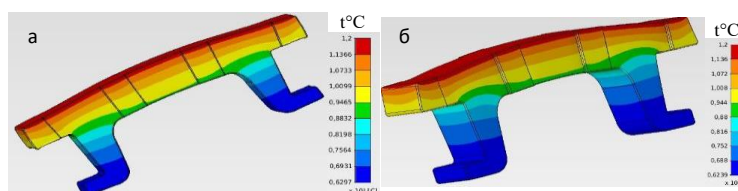


Рисунок 10. Распределение температур по сечению колосника во время эксплуатации
Обозначения: а – без усадочных раковин, б – с тремя усадочными раковинами

В результате моделирования были получены данные распределения температур по сечению колосника (рис. 10), степеней деформации во время эксплуатации (рис. 11) и суммарных напряжений в различных участках (рис. 12).

Установлено, что во время эксплуатации наибольшему прогреву, до 1200°C, подвергается верхняя часть детали, а замковая часть имеет высокий градиент температур: (рис. 10). Очевидно, что в верхней части колосника создаются

температурные условия для развития МКК, что объясняет её локальный характер и коррелируется с экспериментальными данными.

На основании полученных результатов моделирования деформаций, возникающих в колосниках во время эксплуатации (рис. 11) можно сделать вывод, что величина деформации увеличивается от периферии к центру детали, а зона максимальных деформаций в колосниках с усадочными раковинами имеет в 4-ре раза большую площадь и на 52% большие значения деформационных нагрузок.

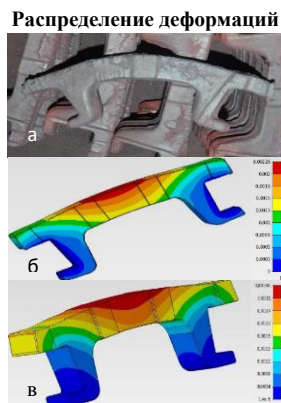


Рисунок 11. Моделирование механизма коробления колосника
Обозначения: а – колосники после 12 мес. эксплуатации, б, в – распределение деформаций/интенсивности напряжений при эксплуатации по сечению без усадочных раковин и с ними соответственно

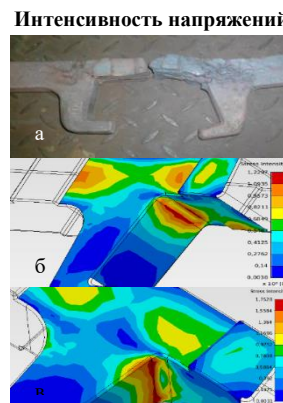


Рисунок 12. Моделирование механизм излома замковой части колосника
Обозначения: а – колосники после 12 мес. эксплуатации, б, в – распределение деформаций/интенсивности напряжений при эксплуатации по сечению без усадочных раковин и с ними соответственно

Модель распределения интенсивности напряжений (рис. 12) показывает, что причиной образования продольных трещин колосников при эксплуатации является наличие в них усадочных раковин, что подтверждает достоверность заданных условий моделирования и описывает механизм трещинообразования с последующим изломом замковой части детали.

Причиной коробления и трещинообразования являются усадочные раковины, а локальный характер межкристаллитной коррозии (МКК) связан с локальным перегревом поверхности.

1.4 Разработка технологии получения литых колосников из стали 40Х24Н12СЛ с повышенным ресурсом

В результате лабораторных изысканий были подобраны оптимальные параметры термообработки и скорректирован химический состав стали 40Х24Н12СЛ для воспроизводимости результатов термообработки:

Сталь	C, %	Si, %	Mn, %	Ni, %	S, %	P, %	Cr, %
Рядовая	≥ 0,4	0,5÷1,5	0,3÷0,8	11,0÷13,0	до 0,03	до 0,035	22,0÷26,0
Опытная	0,3÷0,4	0,5÷2,0	0,3÷0,8	11,0÷13,0	до 0,03	до 0,035	22,0÷26,0

ТО: закалка 1100°С с охлаждением в воде, масле, на воздухе (ГОСТ 977-88), время выдержки под закалку не оговорено

ТО: закалка при 1100°С на протяжении 80 мин с последующим охлаждением на воздухе и отпуск при 900°С на протяжении 150 мин

Так, карбидообразующие элементы (углерод и хром) должны находиться в ограниченных пределах. По ГОСТ 977-88 количество хрома ограничено в достаточной степени (22÷26%), но углерод имеет ограничение лишь по верхнему пределу (≥ 0,4 %). Предложено ограничить количество углерода, не выходя за рамки требований ГОСТ 977-88, в пределах: 0,30÷0,40%. А количество кремния, в результате выполнения расчета активностей легирующих элементов, предлагается увеличить до уровня зарубежных успешных аналогов (до 2%), это дополнительно повысит жаростойкость стали.

Температуры ТО подбирались теоретически, время выдержки – экспериментально.

Закалка. Чтобы крупные первичные (эвтектические) карбиды частично растворились в структуре металла, оставив точечные участки, способные служить центрами выделения карбидов при отпуске и эксплуатации.

Карбиды растворяются при температурах: 723°С - $(CrFe)_7C_3$ и 1100°С - $(CrFe)_{23}C_6$ – нагревать сталь при закалке ниже 1100°С не целесообразно. При температурах выше 1100°С структура стали переходит линию γ-сольвус и попадает в область существования двухфазной аустенито-ферритной структуры (α+γ), а при температуре выше 1200°С количество феррита (α) будет максимальным (анализ произведен при помощи диаграммы псевдобинарных сечений тройной системы: Fe-Cr-Ni, при

содержании железа 60%) – нагревать сталь при закалке выше 1100°C также не целесообразно. Температура закалки по ГОСТ 977-88 – оптимальна. Подбиралось только время выдержки под закалку: литые образцы, соответствующие скорректированному химсоставу, выдерживали на протяжении 70, 80 и 90 мин. Микроанализом выбрано оптимальное время выдержки - 80 мин., первичные карбиды растворились в матрице металла не полностью, оставшиеся карбидные выделения имели размеры до 5 мкм и малую протяжённость границ, при этом расстояния между крупными выделениями (остатками) составляли не менее 4 мкм (рис. 13,в).

Отпуск. Для активации процесса роста, коагулирования и создания новых центров выделения карбидных фаз, при отпуске необходимо создать структуру, при которой исключается возможность образования сплошных выделений карбидов в процессе эксплуатации (связать углерод в карбиды).

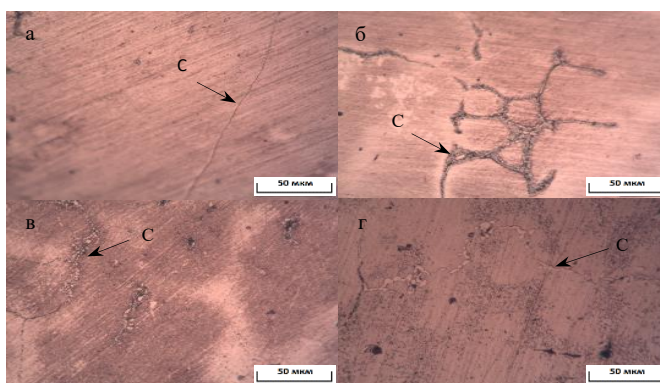


Рисунок 13. Микроструктура до 1,5 мм от «верхней» поверхности

Обозначения: а – колосник после литья, карбидная сетка толщиной 1-2 мкм, б – колосник после литья и стандартной термообработки, первичный карбид (до 25 мкм), в – кубик после литья и закалки, первичные карбиды и карбидная сетка растворены в матрице металла, карбиды средних размеров (до 5 мкм), г – кубик после литья, закалки и отпуска, карбиды мелких размеров (до 1 мкм) и рост карбидов средних размеров (до 10 мкм)

При температурах выше критической температуры А3 резко увеличивается диффузия, температура А3 для стали 40Х24Н12СЛ находится в пределах 850-880°C (при более низких температурах процесс роста и коагулирования карбидных фаз активно не развивается). Помимо этого, в интервале температур 600-900°C существует риск обильного выделения σ -фазы. Температура отпуска теоретически определена в пределах 900÷910°C, что близко к эксплуатационным температурам.

Длительность отпуска определялась экспериментально. Микроанализ образцов после разного времени выдержки под отпуск (100, 150 и 200 мин.) показал оптимальную длительность - 150 мин. (рис. 13,г). В структуре предварительно закаленной стали создано большое количество новых центров для выделения карбидов по всей структуре детали, а интенсивность этого процесса значительно снижена из-за приведения материала к более равновесному состоянию при температурах близких к эксплуатационным. В результате проведения процедуры отпуска снижена интенсивность перераспределения объёмов в колосниках при их эксплуатации (выделение карбидов и фазовый переход $\alpha \leftrightarrow \gamma$). В структуре стали после отпуска отсутствуют крупные карбиды и карбидная сетка.

Выполненная ТО теоретически снизила склонность колосников к МКК в процессе эксплуатации.

Модернизация технологии выплавки и разливки колосников (ноу-хау). Далее, для изготовления опытной партии опытных колосников из скорректированной по химсоставу стали 40Х24Н12СЛ на ОАО «ЧЛМЗ» применено ноу-хау:

На этапе выплавки: оптимизированный химический состав стали (повышение содержания кремния и среднего содержания углерода) позволили оптимизировать этап плавки за счет применения высокоуглеродистого лома Б28 и уменьшить угар легирующих элементов в среднем на 5,7%.

На этапе разливки: изменена технология формовки колосников – общая безопасная формовка в ХТС 6-и колосников с обязательной покраской поверхности полуформ антипригарной цирконовой краской, отказ от формовки в стопку, температура разливки $t_{\text{лик.ж}}$ на уровне 1560±20° при коэффициенте массы литниково-питающей системы $k = 2.1$, что составляет 56 кг (рис. 14).

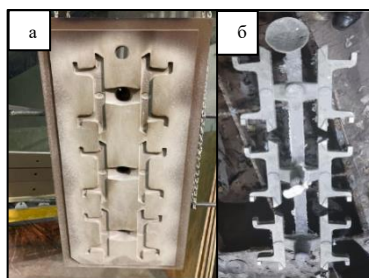


Рисунок 14. Новая технология формовки колосников.

Обозначения: а – полуформа из ХТС окрашенная противоспаггарной цирконовой краской, б – готовая отливка (6 деталей).

1.5 Опробование результатов. Промышленные испытания

Для определения эффективности разработанной технологии получения колосников были проведены промышленные испытания. Изготовленная на ОАО «ЧЛМЗ» партия колосников (400 шт.) была поставлена на АО «СГОК» (годовая производительность ОМ до 8 млн. тонн, температурный режим – стандартный: 20÷1310°C).

Входной контроль по факту поставки показал удовлетворительные качества (дополнительно проверялось отсутствие усадочных раковин в новых колосниках и структура новых колосников рис. 15, 16).



Рисунок 15. Фото поверхностей разреза колосника

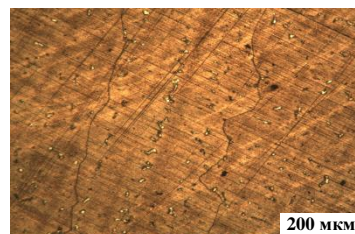


Рисунок 16. Микроструктура 3,0 мм от «верхней» поверхности колосника поставки «ЧЛМЗ»

15 октября 2018 года опытная партия колосников была смонтирована на обжиговую тележку №175 и установлена на ОМ с составлением соотв. актов монтажа колосников на телегу и телеги на машину (приложения 4,7,8,11 дисс.).

Промышленные испытания производились в сравнении колосников, изготовленных по опытной технологии, с колосниками поставки ф. Outotec (ФРГ) из стали GX40CrNiSi25-12, схожей по составу с испытуемой, принятых за эталон (рис. 16,17), все результаты активировались (приложения 13,14 дисс.).

По прошествии 24-х месяцев промышленных испытаний (рис. 16) не обнаружено дефектов колосников и выходов из строя по любым причинам (в том числе не выявлено МКК, трещин, коробления). По состоянию на апрель 2022 года ОАО «ЧЛМЗ» продолжает поставлять на АО «СГОК» колосники, изготовленные по опытной технологии. При этом, экспериментальная партия находится в непрерывной эксплуатации без замечаний уже более 3-х лет.

Удельный расход колосников опытной партии, изготовленных по экспериментальной технологии, ниже на 23,13 % по сравнению с колосниками поставки ф. Outotec (акты и протоколы замеров см. приложения 14, 15 дисс.).

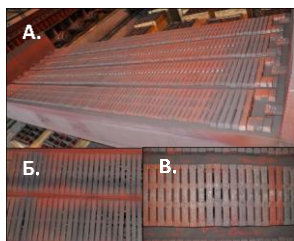


Рисунок 16. Фото колосников
Обозначения: А, В. ЧЛМЗ, экспериментальная технология, 26 месяцев эксплуатации; Б. Outotec, 50 месяцев эксплуатации



Рисунок 17. Фото разреза новых колосников ф. Outotec – выше и ОАО «ЧЛМЗ» – ниже

Металлографические исследования микроструктуры опытных и эталонных колосников до и после эксплуатации (рис. 18) показали, что у обоих поставщиков достаточное качество структуры, с отличием в структуре распределения карбидной фазы. Колосники, изготовленные по опытной технологии, обладают более благоприятной карбидной структурой (меньшей протяженностью границ карбидных выделений), в меньшей степени обедняя металл хромом в прилегающих к карбидам участках, чем может объясняться повышенная на 23,13% жаростойкость по сравнению с эталонными (ф. Outotec).

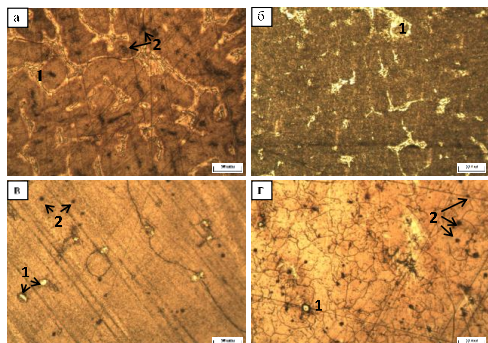


Рисунок 18. Микроструктура 1,5-3,0 мм от «верхней» поверхности, увеличение $\times 150$

Обозначения: а, б – ф. Outotec нового и после 12-и месяцев эксплуатации соответственно, в, г – ОАО «ЧЛМЗ» нового и после 12-и месяцев эксплуатации соответственно;

Отметки: 1 – карбиды, 2 – пустоты, от разрушения карбидов при подготовке шлифа

Экономический эффект от применения опытных колосников: уменьшение простоев ОМ и уменьшение затрат на закупки.

1.6 Общие выводы.

1. Установлены основные виды дефектов, приводящих к преждевременному массовому выходу стальных колосников (40X24H12СЛ) из строя: межкристаллитная коррозия (65,5%) и усадочные раковины (34,5%). Определено, что карбидная сетка литых и термообработанных колосников имеет решающее значение на стойкость колосников против МКК. Установлены закономерности протекания межкристаллитной коррозии, коробления и изломов колосников в современных, агрессивных условиях эксплуатации конвейерных обжиговых машин, установлены критические параметры дефектов, в том числе на основании сопоставления результатов от моделирования условий эксплуатации колосников методом конечных элементов и от статистического, микро- и макроанализа колосников на производстве.

2. Выполненная корректировка технологии изготовления колосников обжиговых тележек на этапах выплавки, разливки и термообработки из оптимизированной по химическому составу стали 40X24H12СЛ позволила исключить возможности образования усадочных раковин и повысить стойкость колосников против МКК. Выполнена корректировка химического состава стали 40X24H12СЛ для достижения воспроизводимости свойств термообработки и оптимизации технико-экономических параметров плавки. Разработан режим термообработки, увеличивающий стойкость стали 40X24H12СЛ с скорректированным химическим составом против МКК. Для устранения усадочных раковин в колосниках применено ноу-хау – скорректирована технология выплавки и разливки колосников из стали 40X24H12СЛ.

3. Выполнен анализ причин массовых выходов колосников из стали 40X24H12СЛ из строя, который позволил установить первопричины дефектообразования колосников отечественного производства: МКК (65,5%), и усадочные раковины, приводящие к короблению (21,3%) и трещинообразованию с последующим изломом (13,2%).

4. Установлены критические параметры усадочных раковин – при среднем диаметре ≥ 5 мм эксплуатационный ресурс колосников составляет менее 2-х лет.

5. Установлена зависимость между баллом карбидной сетки в структуре детали после ТО и склонностью колосников к МКК: оптимальный балл карбидной сетки – 1. Для высокой стойкости против МКК оптимально привести структуру стали к состоянию равномерного распределения карбидов относительно малых размеров (менее первичных) – на всей глубине детали иметь структуру с 1 баллом карбидной сетки на всей глубине детали (проверка микроанализом на глубине <500 мкм/ ≥ 500 мкм от верхней поверхности).

6. Все изыскания по оптимизации технологии изготовления колосников были успешно опробованы при выполнении промышленных испытаний, доказан экономический эффект, опытная технология используется в промышленном производстве колосников с 2018 г.

2. Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Иванов, Д.И. Механизм высокотемпературной коррозии жаростойкой хромоникелевой стали / Д.И. Иванов, А.А. Кожухов, Л.Ф. Уразова // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия. - 2016. - Том 59. - № 3. - С. 180–184.
2. Иванов, Д.И. Анализ причин снижения эксплуатационного ресурса колосников обжиговых тележек из стали 40Х24Н12СЛ методом математического моделирования / Д.И. Иванов, А.А. Кожухов, В.А. Скляр // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия. - 2018. - Том 61. - № 7. - С. 536–542.
3. Иванов, Д.И. Повышение эксплуатационного ресурса колосников обжиговых тележек из стали 40Х24Н12СЛ / Д.И. Иванов, А.А. Кожухов // ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ. Бюллетень научно-технической и экономической информации. - 2021. - № 10. ТОМ 77
4. Литая жаростойкая сталь: пат. 2550457 Рос. Федерация. № 2013159138/02, заявл. 30.12.13; опубл. 10.05.15, Бюл. № 13 15 с.
5. Способ изготовления колосников обжиговых тележек с повышенным эксплуатационным ресурсом: пат. 2708728 Рос. Федерация. № 2018131970, заявл. 28.11.2018; опубл. 11.12.2019, Бюл. № 35 32 с.
6. Иванов Д.И., Стадничук В.И. Неметаллические включения в стали//VII региональная научн. – практ. конф. студентов и аспирантов. Старый Оскол, СТИ НИТУ МИСиС, ТОМ 1, С.16-17.
7. Иванов Д.И., Стадничук В.И. Образование, наука, производство и управление//Всеросс. научн. практ. конф. преподавателей, сотрудников и аспирантов //7-8.12.2011г.
8. Иванов Д.И., Стадничук В.И. Особенности структуры жаростойкой стали//VII региональная научн. – практ. конф. студентов и аспирантов. Старый Оскол, СТИ НИТУ МИСиС, ТОМ 1, С.16-17.
9. Иванов, Д.И. Механизм коррозионного разрушения жаростойкой хромоникелевой стали / Д.И. Иванов, А.А. Кожухов // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство: материалы Двенадцатой Всероссийской научно-практической конференции, с международным участием / СТИ НИТУ МИСиС, Старый Оскол, 2015, - С. 244-249.
10. Иванов, Д.И. Определение и анализ причин раннего выхода из строя колосников обжиговых тележек / Д.И. Иванов, А.А. Кожухов // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство: материалы Двенадцатой Всероссийской научно-практической конференции, с международным участием / Старооскольский Технологический Институт НИТУ МИСиС, Старый Оскол, 2015, - С. 14-19.